

결합계수 해석에 의한 유도가열용 인버터의 공진회로 설계법

(A Resonant Circuit Design of the Inverter for Induction Heating

by Analysis of the Coupling Coefficient)

이광직* · 김주홍**

(Kwang-Jeek Lee · Joo-Hong Kim)

요 약

고주파 유도가열을 위한 인버터의 공진회로 설계에서 인덕턴스 L의 작용과, 출력전달 요소로 사용된 변압기의 결합계수, 그리고 코일을 사용한 가열부하의 결합계수가 공진회로의 출력, 회로의 Q와 공진주파수에 큰 영향을 주고 있음을 등가회로를 도출하여 그 특성을 해석하였다. 또한 변압기를 테브난 등가회로로 구성할 경우, 변압기의 二次側 임피던스를 一次側 임피던스로 환산하면, 권선비 n^2 에 비례 할 뿐만 아니라 결합계수 K^2 에도 비례함을 도출하여 결합계수형 테브난 등가회로에 의한 정확성이 큰 인버터 공진회로 설계의 기초방식을 나타냈다.

Abstract

In designing a resonant circuit of the inverter which puts induction heating with high frequency to the load, an inductance L of the circuit, the coupling coefficient of a transformer transferring the output power to load, and the coupling coefficient of load circuit heating with coil affect to the output power of a resonant circuit, the circuit Q and the frequency. Those characteristics of the circuit are analyzed through Thevenan's equivalent circuit of the coupling coefficient type which is derived from the T-type equivalent circuit of a transformer. On this equivalent circuit, the impedance of a transformer referred to its primary side is not only proportional the square of turn ratio, n^2 , but also the square of coupling coefficient, K^2 . This paper proposed a more accurate fundamental method to design a resonant circuit of the inverter by using the Thevenan's equivalent circuit.

1. 서 론

고주파 유도가열을 목적으로하는 인버터는 높은 역률과 안정성의 이유로 정전류전원을 사용하는 병렬공진회로가 주로 사용되고 있다. 물론 비공진형도 있으나 이는 역률이 낮기 때문에 비효율적이다. 또

*정회원 : 서울산업대 매체공학과 부교수

**정회원 : 동국대 전자공학과 명예교수

접수일자 : 1995. 5. 15

한 정전압전원을 사용한 직렬공진회로는 병렬공진회로보다 간단하여 전동기 구동에 사용되고 있으며, 초고압출력을 목표로하는 인버터의 경우에도 직렬공진회로가 사용되고 있다. 이러한 고주파 유도가열이나, 정전고압 응용장치의 부하는 그 결합계수나, 부하의 특성이 변화하며, 이것이 고주파 전원인 인버터의 특성에 큰 영향을 주고 있다. 특히 변압기 및 부하회로의 결합계수는 공진회로의 주파수나 임피던스 변화에 큰 영향을 미치고 있다. 본 논문에서는 결합계수에 의한 변압기의 一次側의 등가회로를 유도하고, 이 회로에 의하여 보다 정확하고 실용성이 큰 유도가열용 인버터의 공진회로 설계법을 제안하였다.

2. 결합계수로 표시된 변압기의 특성

일반적으로 변압기의 입출력 전기량의 산출은 결합계수 K 가 1인 이상변압기로 취급하고 있다. 그러나 엄밀하게 결합계수의 크기는 $K < 1$ 이므로 이러한 변압기의 특성을 정확하게 표시하려면 변압기의 특성을 나타내는 수식들이 결합계수의 함수로 주어져야 보다 정밀하게 특성의 표현이 가능하다. 특히 유도가열기의 코일(work coil)내에 피가열물체를 삽입한 부하회로는 결합계수가 낮아서 보통 $0.65 < K < 0.9$ 이며[1], 이것 또한 부하코일과 피가열체(부하)의 상관 위치, 온도 및 형태에 따라 결합계수가 변화되므로 주파수, 출력 및 정합 등의 특성변화를 살펴보고 규명하기 위하여 결합계수가 포함된 특성식의 유도가 요구된다. 이러한 변압기의 특성을 약속하면 다음과 같다[2].

$$\begin{aligned} \text{전압} \quad V_2 \Big|_{z_2 \rightarrow \infty} &= \frac{KV_1}{n} \\ \text{전류} \quad I_2 \Big|_{z_2 \rightarrow 0} &= K_n I_1 \\ \text{임피던스} \quad Z_2 &= \left(\frac{1}{n}\right)^2 Z_1 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)은 변압기의 一次側의 요소를 二次側으로 표시한 것이며, 여기서 n 은 변압기의 권선비로 N_1/N_2 이다. 전술한 바와같이 인버터의 공진회로를 해석하

는데 있어서 변압기가 공진회로의 요소인 경우는 공진 회로에 적용된 인덕턴스 L 가 변압기의 결합계수를 변수로한 함수로 주어지므로 이를 이용한 등가회로의 구현은 인버터의 부하회로 설계에 정확성을 기할 수 있다.

3. 변압기의 二次側이 一次側으로 환산된 등가회로의 특성

그림 1은 누설자속이 있는 일반변압기의 T형 등가회로이다. 이와같이 대표적인 변압기의 등가회로에서 二次側의 임피던스를 一次側으로 환산하여 결합계수 K 를 포함하는 결합계수형 테브난 등가회로의 도출은 다음과 같다. 여기서 Z_0 는 부하 임피던스로 $R_0 + j\omega L_0$ 로 표시하였다. 그리고 Z_0 와 $L_2 - M$ 와 합성 임피던스를 Z'_2 라고 하면

$$Z'_2 = R_0 + j\omega(L_0 + L_2 - M) \quad (2)$$

가 되고 여기서

$$\alpha = L_0 + L_2 \quad (3)$$

$$\beta = 1 + \frac{L_0}{L_2} = \frac{\alpha}{L_2} \quad (4)$$

로 代置하면 식 (2)는

$$Z'_2 = R_0 + j\omega(\alpha - M) \quad (5)$$

가 된다. 그리고 상호인덕턴스 M 과 Z'_2 의 합성 임피던스를 Z''_2 라 하면

$$Z''_2 = \frac{-w^2 M(\alpha - M)R_0 + jwMR_0^2 + w^2 \alpha MR_0 + jw^2 \alpha M(\alpha - M)}{R_0^2 + w^2 \alpha^2}$$

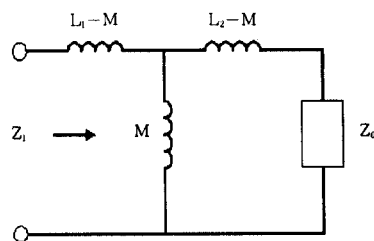


그림 1. 변압기의 T형 등가회로
Fig. 1. The T type equivalent circuit of a transformer.

으로 표시된다. 그리고 실제회로에서 부하저항 R_o 는 $R_o \ll \omega L_2$ 이고, $R_o^2 + \omega^2 \alpha^2 \approx \omega^2 \alpha^2$ 으로 놓으면

$$Z_2'' \approx \frac{-M(\alpha-M)R_o}{\alpha^2} + \frac{MR_o}{\alpha} + j\omega \left[\frac{M(\alpha-M)}{\alpha} + \frac{MR_o^2}{\alpha^2 \omega^2} \right]$$

로 정리된다. 위 식의 대괄호 [] 안의 두 번째항 $\frac{MR_o^2}{\alpha^2 \omega^2} \ll 1$ 로 취급하여 이식을 정리하면

$$Z_2'' \approx \frac{M^2 R_o}{\alpha^2} + j\omega \left(M - \frac{M^2}{\alpha} \right) \quad (6)$$

으로 표시된다.

그림 1에서 입력 임피던스 Z_1 은 변압기 1차측의 누설인덕턴스 $L_1 - M$ 과 임피던스 Z_2'' 와 합성 임피던스 이므로

$$Z_1 = \frac{M^2}{\alpha^2} R_o + j\omega \left(L_1 - \frac{M^2}{\alpha} \right) \quad (7)$$

로 유도된다. 여기서 입력 임피던스 Z_1 을 $Z_1 = r + j\omega L$ 로 표시하면 입력저항 r 과 입력 인덕턴스 L

$$r = \frac{M^2 R_o}{\alpha^2} \quad (8)$$

$$L = \left(L_1 - \frac{M^2}{\alpha} \right) \quad (9)$$

가 된다. 식 (8)은 변압기의 일반 정리식인 $M = K \sqrt{L_1 L_2}$ 와 $n^2 = \frac{L_1}{L_2}$ 의 관계를 대입하고, 식 (4)에서

편의상 $\beta = \frac{\alpha}{L_2}$ 를 취하면

$$\begin{aligned} r &= \frac{M^2 R_o}{\alpha^2} \\ &= \frac{K^2 n^2 L_2^2}{(L_2 + L_o)^2} R_o \\ &= \frac{K^2 n^2}{\beta^2} R_o \end{aligned} \quad (10)$$

으로 된다. 그리고 식 (9)도 동일한 방법으로 두 번 제항인 $\frac{M^2}{\alpha}$ 은

$$\frac{M^2}{\alpha} = \frac{K^2 n^2 L_2}{\beta}$$

로 표시되나, 위식에 포함된 L_2 를 식 (4)로부터 유도하여 $L_2 = L_2 \beta - L_o$ 를 취하면

$$\frac{M^2}{\alpha} = K^2 L_1 - \frac{K^2 n^2 L_o}{\beta} \quad (11)$$

이 되므로 변압기의 인덕턴스 L 는

$$L = L_1 (1 - K^2) + \frac{K^2 n^2}{\beta} L_o \quad (12)$$

가 된다. 식 (10)과 식 (12)에서, 분모의 β 를 식 (4)의 중간항으로 대치하여 변압기의 임피던스 Z_1 을 표시하면

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{K^2 n^2}{\beta^2} R_o + j\omega \left[L_1 (1 - K^2) + \frac{K^2 n^2}{\beta} L_o \right] \\ &= \frac{K^2 n^2}{\left(1 + \frac{L_o}{L_2}\right)^2} R_o + j\omega \left[L_1 (1 - K^2) + \frac{K^2 n^2}{1 + \frac{L_o}{L_2}} L_o \right] \end{aligned} \quad (13)$$

으로 유도된다. 식 (13)은 일반임피던스 $r + j\omega L$ 로 표시되는 변압기의 결합계수형 임피던스로서 변압기의 二次側 임피던스가 一次側으로 환산 될 때 이상변압기의 경우와는 달리 권선비 2승에 비례 할 뿐만 아니라 결합계수 2승에도 비례함을 나타내고 있어 보다도 정확한 변압기의 동작 특성을 일목연하게 해석할 수 있다.

그림 2는 식 (13)으로 표시되는 결합계수형 테브난 등가회로이다.

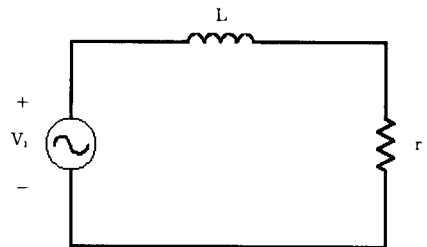


그림 2. 一次側으로 換算된 變壓器의 結合係數形 等價回路
Fig. 2. The coupling coefficient equivalent circuit of transformer referred its primary side.

4. 제안한 동기회로의 검토

그림 2에 표시된 결합계수형 등가회로의 특성은

다음과 같다.

1) K가 1인 경우는

$$Z_1 = \frac{n^2}{(1 + \frac{L_0}{L_2})^2} R_0 + jw \left[\frac{n^2}{1 + \frac{L_0}{L_2}} L_0 \right]$$

이나 일반적으로 변압기는 부하측의 인덕턴스 L_0 보다 변압기 2차측의 인덕턴스 L_2 의 크기가 $L_2 \gg 10L_0$ 이므로

$$Z_1 \approx n^2 R_0 + jw n^2 L_0$$

로 표시되어서 종래의 일반등가회로와 같다.

2) K가 0 인 경우에 있어서

$$Z_1 = jwL_1$$

이 되어 一次側의 전력이 二次側에 전달되지 않음을 보여준다.

3) 부하인덕턴스 L_0 가 $L_0 \ll L_2$ 인 경우에는

$$Z_1 = K^2 n^2 R_0 + jw [L_1(1 - K^2) + K^2 n^2 L_0]$$

로 표시되어 부하가 임피던스 성분으로 구성된 변압기의 등가회로와 동일하다.

5. 병렬공진형 유도가열기의 등가회로와 그 특성

그림 3은 병렬공진회로로 구성된 유도가열기의 등가회로이다. 등가회로에서 TF_1 은 유도가열기의 출력 전달용 변압기로, 그 결합계수와 권선비를 각각 K_1, n_1 으로 표시하였다. TF_0 는 유도가열기의 부하측을 등가적으로 표시한것이다. 그리고 부하회로의 결합계수, 인덕턴스, 권선수, 권선비를 K_0, L_0, N_0, n_0 로 표시하였고, 부하 임피던스는 $Z_0 = R_0 + jw L_0$ 로 취급하였다.

그림 3의 등가회로에서 a, a'간의 임피던스는 전술한 바와같이

$$\begin{aligned} Z_a &\approx r + jwL \\ &= (n_0 n_1 K_0 K_1)^2 R_0 + jw [1 - k_1^2] L_1 \\ &\quad + (n_1 K_1)^2 (1 - K_0^2) L_1 + (n_0 n_1 K_0 K_1)^2 L_0 \end{aligned} \quad (14)$$

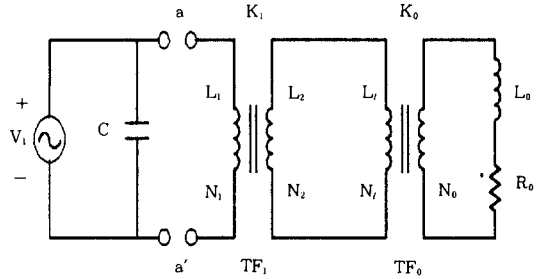


그림 3. 공진형 유도가열기의 등가회로
Fig. 3. The equivalent circuit of a resonant induction heater.

로 도출된다. 위 식은 부하인덕턴스 L_0 가 $L_0 \ll L_1 \ll L_2$ 인 경우로 실용상 지장이 없는 근사치로 표시한 것으로 2단계의 결합계수를 거쳐 부하에 에너지가 전달되는 유도가열기에 있어 一次側에서 부하측을 살펴본 결합계수형 테브난 등가회로를 모델링 한 것이다. 따라서 유도가열기의 一次側, 卽 共振回路側에서 본 저항 r 및 인덕턴스 L이 직렬로 구성된 등가회로를 그림 4에 제시하였으며, 그림5는 이 등가회로를 병렬로 구성한 등가회로이다.

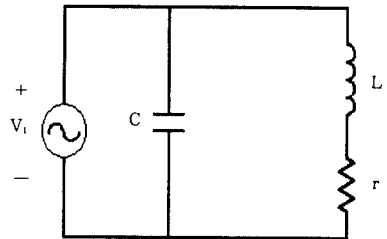


그림 4. 회로의 임피던스가 변압기 一次側으로 환산된 유도가열기의 등가회로
Fig. 4. The equivalent circuit of induction heater with impedance referred to transformer's primary side

그림 4에서

$$r = (n_0 n_1 K_0 K_1)^2 R_0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} L &= (1 - K_1^2) L_1 + (n_1 K_1)^2 (1 - K_0^2) L_1 \\ &\quad + (n_0 n_1 K_0 K_1)^2 L_0 \end{aligned} \quad (16)$$

이다. 여기서 r과 L은 결합계수 K_0, K_1 및 권선비 n_0, n_1 의 函數이다. 그리고 L에 직렬로 연결된 저항 r을 그림 5와 같이 병렬저항 R_p 로 환산하면,

$$R_p = Q^2 r = \frac{(wL)^2}{r} \quad (17)$$

의 관계가 성립된다.

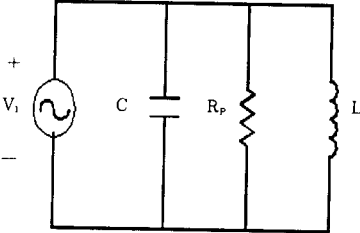


그림 5. 병렬공진회로로 표시된 유도가열기의 등가회로
Fig. 5. The equivalent circuit of induction heater composed with parallel resonant circuit.

그림 5 등가회로의 Q_p 는

$$Q_p = \frac{P_p}{wL} = \frac{wL}{r} \quad (18)$$

로 표시된다. 또한 출력은

$$P_o = I^2 R_p = \frac{V^2}{R_p} \quad (19)$$

이다. 따라서 수식에서 주어진 바와같이 회로의 등가저항, 등가인덕턴스, 킬리티 팩터 그리고 출력 등 r, L, Q_p, P . 모두가 부하회로 및 변압기의 결합계수 K_o 및 K_1 과 권선비 n_o, n_1 에 상관됨을 규명 하였다.

그림 5와 같이 표시되는 공진형 유도가열기의 등가회로를 이용하여 결합계수 K_o 및 K_1 이 변동 할 때, 출력과 회로의 Q , 그리고 주파수에 대한 변화를 시뮬레이션 한 결과를 그림 6, 그림 7 그리고 그림 8에 나타내었다. 설계 규격은 전원측의 결합계수 K_1 을 0.99로 하고, 부하회로의 결합계수 K_o 는 0.75로 정하고 출력 $P=25\text{kW}$ 그리고 주파수 $F_q=25$ [kHz] 및 $Q=8$ 을 기준으로 하였다.

그림 6에서 부하측의 결합계수를 $K_o=0.75$ 로 기준하고 전원측의 결합계수 K_1 을 0.95에서 1까지 증가시키면 출력이 증가하나, 이때의 출력변화량은 최소 15[kW]에서 최대 31[kW]의 범위로 주어지 전원측 결합계수 K_1 의 아주 적은 변화에도 불구하고 출력 변동이 많음을 나타내고 있다. 이 결과는 그림 4의 등가회로와 식 (14)에서 $w[(1-K_o^2)L_1 + (n_1K_1)^2$

$(1-K_o^2)L_1]$ 로 표시되는 누설인덕턴스의 값이 부하저항값에 비해 상대적으로 크기 때문이다.

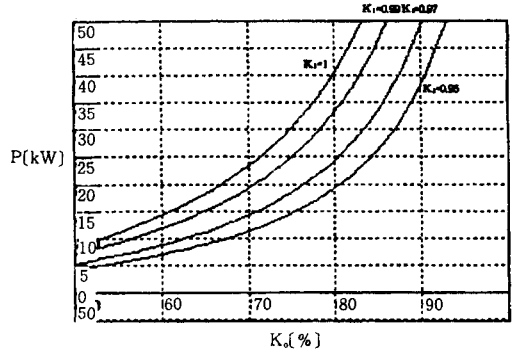


그림 6. 유도가열기의 결합계수 변화 대 출력 곡선
Fig. 6. The output power curve depending on the variable coupling coefficient of a induction heater.

그림 7은 식 (18)로 표시되는 회로의 Q 값이 전원측의 결합계수 변화에 따라 변동됨을 나타내고 있다. 부하측의 결합계수 $K_o=0.75$ 로 기준하였을 때 회로의 Q 값은 최소 7.5에서 11로 변화함을 나타내고 있으며, 이 값은 전원측의 결합계수와 부하측의 결합계수의 값이 증가 할수록 그 값이 적어짐을 알 수 있다. 이는 식 (16)으로 주어지는 회로의 등가인덕턴스가 결합계수의 영향을 받기 때문이다.

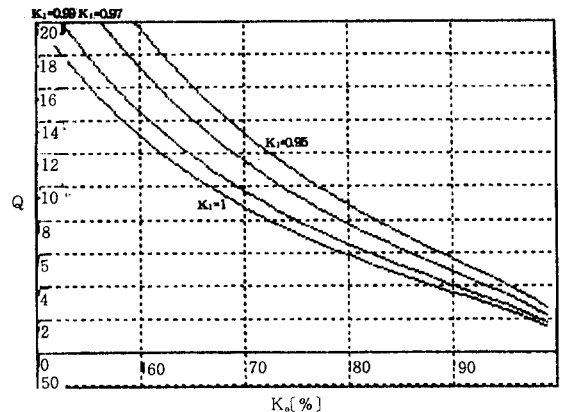


그림 7. 유도가열기의 결합계수 변화 대 Q 값
Fig. 7. The Q value depending on the variable coupling coefficient of a induction heater.

그림 5로 표시된 유도가열기의 등가회로에서 결합계수 K_1, K_o 의 값이 변함에 따른 병렬공진주파수를

그림 8에 제시하였다. 그림 8에서 결합계수 K_1 , K_0 가 증가하면 공진주파수도 증가함을 보여주고 있으며, 부하측의 결합계수 K_0 를 0.75로 기준하였을 때 회로의 공진주파수가 20[kHz]에서 27[kHz] 사이에서의 변화를 나타내고 있다.

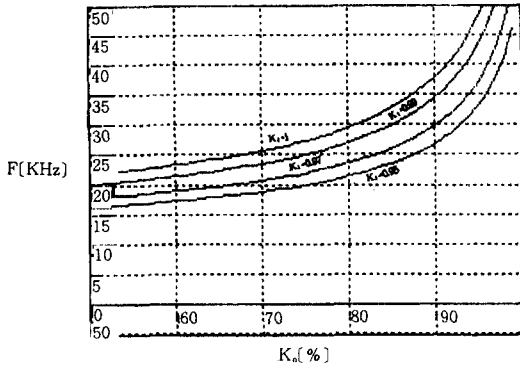


그림 8. 유도가열기의 결합계수 변화와 주파수 곡선
Fig. 8. The frequency curve depending on the variable coupling coefficient of a induction heater.

6. 결론

유도가열기의 부하나 변압기의 결합계수를 변수로 취급한 임피던스를 변압기의 一次側으로 환산하므로서 電磁機器의 보다 정확한 설계를 제시하고 그 특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 유도가열기에서 부하와 변압기의 결합계수 및 권선비를 변수로 취하여 二次側의 임피던스를 변압기 一次側 임피던스로 산출한 일반식을 도출하였다.

2. 공진회로의 요소로 작용한 변압기와 결합계수를 가진 부하회로의 임피던스 정합에 상관된 공진회로의 설계법을 제시하였다. 즉 공진회로 설계법에 機器 및 부하의 결합계수를 변수로 취한 등가회로를 사용하여 보다 정밀한 주파수 및 임피던스 정합이 가능한 방식을 제시하였다.

3. 특히 고주파 공진회로를 포함한 유도가열기의 회로에서 결합계수를 변수로 택한 등가회로의 특성을 시뮬레이션 한 결과, 결합계수의 미세한 변화에 따라 출력, 주파수 및 회로의 Q가 크게 변화됨을 규명하므로서 실제회로에서 결합계수의 조정이 기기의 출력과 특성 변화에 영향을 줄 수 있음을 명확히 파

악하였다.

본 연구는 1996년도 서울산업대학교의 학술연구 지원비에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Induction Heating Handbook, John Davies & Peter Simpson, pp. 254~256, 1979.
- [2] 김주홍외 3인, "코일간의 결합계수 측정법의 제안", 조명·전기설비학회지, Vol. 8, No. 2, pp. 63~68, 1994.
- [3] 김주홍외 1명, "결합계수형 등가회로에 의한 변압기의 특성해석", 조명·전기설비학회지, Vol.4, No. 63, pp. 86~92, 1995.
- [4] Kazushi Kodama, Yoshiyuki Ishihara, Toshiyuki Todaka, Mitsuru Kanamori, Yoshiro Kagami, "Analysis of Characteristics in Leakage Transformer Type Ballast by using Equivalent Circuits" J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol.69, No.2, pp. 53~58, 1985.
- [5] S.J.Chapman, Electric machinery fundamentals, McGraw-Hill, pp. 62~65, 1985.

◇ 著 者 紹 介 ◇



이 광 직(李光植*)

1949년 2월 11일생. 1971년 동국대학교 전자공학과 졸업. 1980년 연세대학교 학원 전자공학과 졸업. 1992년 동국대학교 학원 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 서울산업대학교 매체공학과 부교수.



김 주 홍(金周弘)

1929년 1월 5일생. 1952년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 전북대학교 학원 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 동국대 전자공학과 명예교수.