

유도가열용 전류형 인버터의 콘덴서 초기 충전회로 설계

전태원 · 최명규

전기공학과

<요 약>

유도가열용 병렬공진형 전류형인버터의 싸이리스터를 역방향 걸어주기 위하여 초기 콘덴서전압이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 유도가열용 전류형인버터의 초기 콘덴서전압의 충전 장치를 설계하고자 한다. 집합변압기 및 전달선을 포함한 전체 유도가열 부하를 등가 저항 및 인덕턴스 값으로 표시하고, 병렬공진형 전류형인버터에 적당한 초기 충전장치를 구성한다. 시뮬레이션을 통하여 유도가열 부하에 대한 가장 적합한 초기 충전장치의 인덕터 및 커패시터 값을 구한다.

Design of Initial Capacitor Charge Circuit in the Current Source Inverter for Induction Heating

Tae-Won Chun · Meong-Kyu Choi

Dept. of Electrical Eng

<Abstract>

The parallel resonant current source inverter for the induction heating requires the initial capacitor voltage in order to apply the reverse voltage to thyristor. This paper presents the design of the initial capacitor charge circuit in the current source inverter for the induction heating. The overall induction heating load including the matching transformer and transmission line is represented by the equivalent resistance and inductance, and then the charge system is constructed, which is proper circuit for the parallel resonant current source inverter. Through simulation results, the best values of inductor and capacitor in the charge system are derived with the impedance of induction heating load.

1. 서 론

유도가열은 교번자계 중에 놓여 있는 도전성 물체 내에 발생하는 와전류손 또는 히스테리시스손을 이용하여 가열시키는 방식이다. 피열물이 도전성일 때는 피열물 중에 직접 열이 발생하지만, 절연성일 때는 우선 도전성 용기 중에서 발생하는 열을 가지고 용기 속에 있는 피열물을 간접적으로 가열시키게 된다. 초창기의 유도가열은 금속을 용해하는 목적으로 응용되었으나, 고주파 전류의 표피작용을 이용하여 금속체의 표면을 국부적으로 급속 가열한 후 즉시 냉각하여 금속의 표면을 강화시키는 고주파 소입법이 실용화 되었다.

이 고주파전류를 발생시키는 한 방법으로 전동기/발전기 시스템이 오래 전부터 사용되어 왔으나, 이 전동기/발전기 시스템은 효율이 상당히 떨어지고, 또한 정기적인 유지 보수가 필요하다. 최근에는 반도체 기술의 발달로 이 전동기/발전기 시스템 대신 고주파 인버터를 사용하여 위의 단점을 제거하였다. 현재 많이 사용되고 있는 유도가열용 인버터는 콘덴서를 가열코일과 직렬로 연결하는 직렬공진형과 콘덴서를 가열코일과 병렬로 연결하는 병렬공진형으로 나누어 진다.[1]

그림 1은 콘덴서를 가열코일과 병렬로 연결하는 병렬공진형 유도가열용 인버터의 구조이다. 직렬공진형과 비교하면, 인버터 주파수가 RLC의 공진주파수에 비해 더 높게 설정하여 인버터의 스위칭소자를 부하전류 (Load commutation) 시킬 수 있으므로, 인버터의 스위칭소자로 싸이리스터를 사용할 수 있다. 또한 싸이리스터의 전류실패 (Commutation failure)가 발생하여 두 싸이리스터가 거의 단락상태에 있었을 때, 직류링크 인덕터 때문에 전류가 급격히 증가하는 것을 방지할 뿐만 아니라, 콘덴서전압이 가열코일로 방전하여 그 전압이 급속히 감소되므로 싸이리스터를 보호할 수 있다. 따라서 이와 같은 장점 때문에 이 전류형 인버터는 대용량에 많이 이용되고 있다.[2]

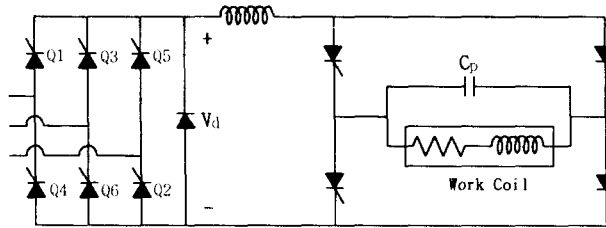


그림 1. 병렬공진형 유도가열용 인버터 구조

그러나 이 전류형 인버터는 직렬형 인버터에 비하여 인버터주파수가 비교적 낮으며, 또한 싸이리스터를 전류시키기 위하여 운전시작 전에 콘덴서전압을 충전시키는 콘덴서 초기 충전장치가 필요하다. 그런데 콘덴서에 직류전압을 충전시키더라도 이 콘덴서에 저항과 인덕턴스로 구성된 유도 가열부하가 병렬로 연결되어 있으므로, 인버터의 게이팅 신호에 관계없이 충전된 전압이 바로 이 콘덴서 값과 부하의 등가 저항 및 인덕턴스 값으로 결정되는 공진주파수로 발진하면서 제동계수 (Damping Factor)로 이 전압의 크기가 감소되어 0으로 수렴되는 특성을 가지고 있다.[3,4]

따라서 본 논문에서는 위의 문제점을 해결하기 위한 초기 충전장치를 설계하고자 하며,

연구 내용을 간략하게 기술하면 다음과 같다.

가열코일과 피가열체 등 전류형 인버터의 유도가열 부하에 대한 모델링식을 유도하고, 이 식을 사용하여 등가회로를 구성하며, 콘덴서의 초기충전 장치를 해석한다. 시뮬레이션을 수행하여 부하 임피던스 변화에 대하여 가장 적절한 초기 충전장치를 설계하고자 한다.

2. 유도가열 부하의 수학적 모델링

그림 2는 유도가열을 위한 병렬공진형 전류형 인버터 시스템의 부하에 대한 블록도이다.

유도가열 시스템을 해석 및 설계하기 위하여, 가열코일 (Work coil), 피가열체 (Work piece) 및 접합변압기 (Matching transformer)와 함께 커패시터 뱅크 (Capacitor bank)와 이 접합변압기를 연결하는 연결선 (Transmission line)에 대한 수학적 모델링을 수행한다.

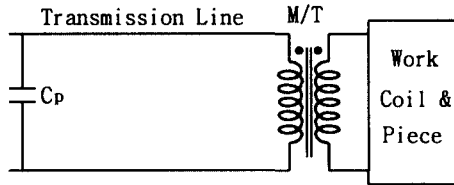


그림 2. 유도가열 부하의 블록도

2-1. 가열코일과 피가열체에 대한 수학적 모델링

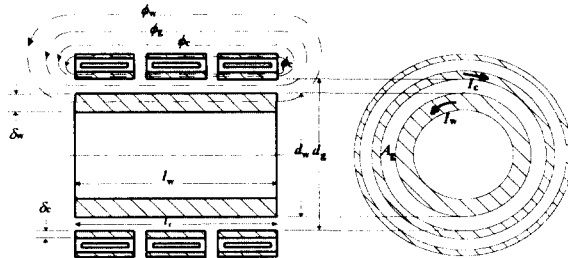


그림 3. 가열코일과 피가열체의 구조 및 자속 경로도

그림 3은 가열코일과 피가열체의 구조 및 가열코일에 흐르는 전류에 의하여 발생하는 3가지 자속경로를 그린 것이다. 피가열체에 쇄교되는 자속 ϕ_w 와 공극으로 흐르는 자속 ϕ_g 및 가열코일에 흐르는 자속 ϕ_c 의 식을 사용하여, 가열코일의 입력전압 E_c 에 대한 전압방정식을 다음과 같이 유도한다.[5]

$$E_c = (\mu_0 N_c^2 / l_c) [(\omega \mu_r p A_w + 0.5\omega K_r \pi d_c \delta_c) + j\omega(A_g + \mu_r q A_w + 0.5K_r \pi d_c \delta_c)] \quad (2-1)$$

여기서 각 변수를 설명하면 다음과 같다.

- K_r 은 가열코일에 대한 보상계수로 코일구조에 따라 1.2 - 1.5로 정한다.
- δ_c 은 가열코일의 표피깊이(Skin depth)이며 다음 식과 같이 표현된다.

$$\delta_c = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\omega\mu_c}} \quad (2-2)$$

(여기서 ρ_c = 가열코일의 저항율, μ_c = 가열코일의 투자율이다.)

- δ_w 는 피가열체의 표피깊이이며 다음 식과 같이 표현된다.

$$\delta_w = \sqrt{\frac{2\rho_w}{\omega\mu_w}} \quad (2-3)$$

(여기서 ρ_w = 피가열체의 저항율, μ_w = 피가열체의 투자율이다.)

- p 와 q의 값은 피가열체의 표피깊이에 대한 피가열체 직경의 비 즉 (d_w/δ_w)의 함수로 표시되며, 대부분 (d_w/δ_w)의 값이 8이상 이므로 이 경우 p와 q값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p = \frac{2}{(1.23 + d_w/\delta_w)} \quad (2-4)$$

$$q = \frac{2}{(d_w/\delta_w)} \quad (2-5)$$

식 (2-1)을 등가 저항 및 등가 인덕턴스로 표시하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} E_c &= [(R_w + R_c) + j\omega(L_g + L_w + L_c)] I_c \\ &= (R_e + j\omega L_e) I_c \end{aligned} \quad (2-6)$$

식(2-6)을 사용한 가열코일 및 피가열체의 등가회로는 다음과 같다.

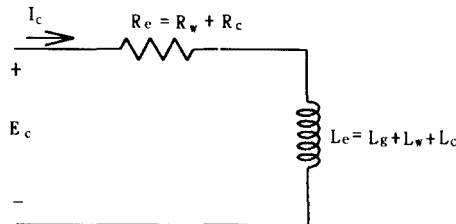


그림 4. 가열코일 및 피가열체의 등가회로

2-2. 접합변압기 (Matching Transformer) 등가회로

그림 5는 1차측 및 2차측 누설 인덕턴스와 철손을 무시한 접합변압기의 등가회로이다.

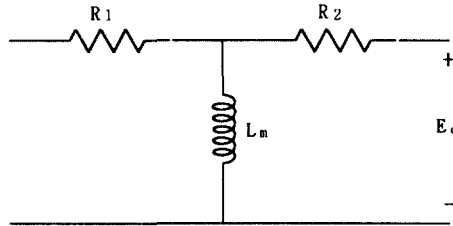


그림 5. 접합변압기의 등가회로

여기서 R1과 R2는 각각 1차측 및 2차측 권선저항이며 Lm은 상호 인덕턴스이다. 부하의 임피던스 매칭 또는 주파수를 가변시키기 위하여 이 접합변압기의 탭 (즉 권선비)을 조정하므로, 이 탭의 조건에 따라 R1과 Lm의 값이 변동된다.

2-3. 연결선 인덕턴스 계산

커패시터 뱅크와 접합변압기 사이에 연결되는 연결선에 대한 인덕턴스 값을 계산하며, 그림 6은 이 연결선의 단면도 그림이다.

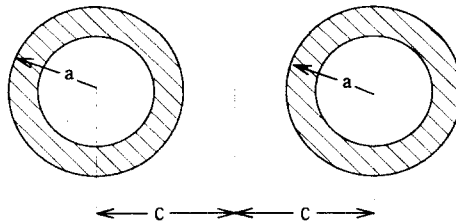


그림 6. 연결선의 단면도 그림

연결선 길이가 l_w 일 경우, 상호 인덕턴스와 누설 인덕턴스들을 포함한 전체 인덕턴스의 식은 다음과 같다.

$$L_{tw} = \frac{\mu_0}{\pi} [\log_e((c/a) + \sqrt{(c/a)^2 - 1})] \times l_w \quad [H] \quad (2-7)$$

2-4. 전체 유도가열 부하의 등가회로

가열코일 및 피가열체 등가회로, 접합변압기 등가회로, 연결선 인덕턴스를 모두 고려한

전체 유도가열 부하의 등가회로를 구한다. 접합변압기 권선비가 N_w 일 때 접합변압기의 2차측 값을 1차측으로 환산하면 다음 그림과 같다.

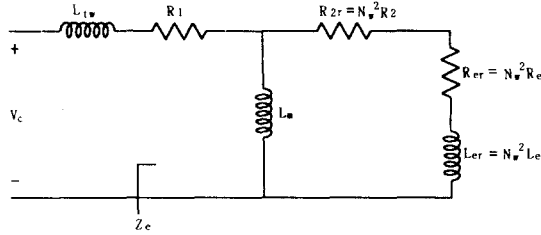


그림 7. 전체 유도가열 부하의 등가회로

이 그림에서 접합변압기 1차측에서의 등가 임피던스 Z_e 식은 다음과 같이 표현된다.

$$Z_e = R_1 + \frac{(R_{2r} + R_{er}) \cdot (\omega L_m)^2}{Z_c} + j\omega \left[\frac{L_m \{ (R_{2r} + R_{er}) + \omega^2 L_{er} (L_m + L_{er}) \}}{Z_c} \right] \quad (2-8)$$

$$= R_q + j\omega L_q$$

$$(\text{여기서 } Z_c = (R_{2r} + R_{er})^2 + \omega^2 (L_m + L_{er})^2)$$

식(2-8)을 사용하여 그림 7을 다음 그림 8와 같이 간략하게 구성할 수 있다.

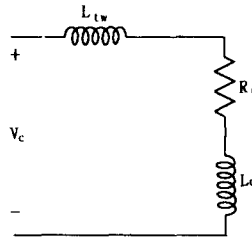


그림 8. 간략화 시킨 유도가열 부하의 등가회로

3. 콘덴서 초기충전 장치

전원이 투입되어 운전을 시작할 때 전류형인버터의 싸이리스터를 역방향 걸어주기 위하여 콘덴서 초기전압이 반드시 필요하다. 유도가열을 위한 전류형인버터의 콘덴서에 전압을 초기 충전할 시 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 먼저 콘덴서에 직류전압을 충전시키더라도 이 콘덴서에 저항과 인덕턴스로 구성된 유도 가열부하가 병렬로 연결되어 있으므로, 인버터의 게이팅 신호에 관계없이 충전된 전압이 바로 이 콘덴서값과 부하의 등가 저항 및

인덕턴스 값으로 결정되는 공진주파수로 발진하면서 제동계수 (Damping factor)로 이 전압의 크기가 감소되어 0으로 수렴되는 특성을 가지고 있다.

따라서 이러한 특성을 고려한 유도가열용 전류형인버터의 콘덴서전압 초기 충전장치의 구성도는 다음 그림 9와 같다.

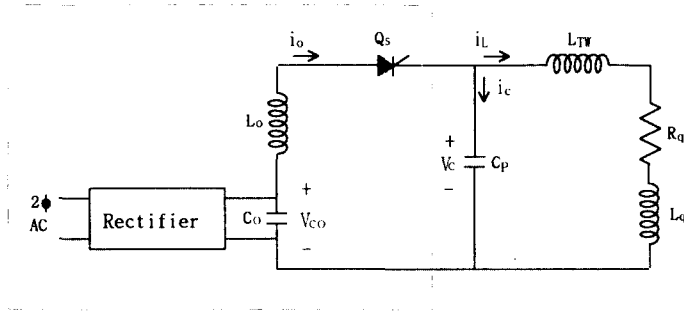


그림 9. 콘덴서전압 초기 충전장치의 구성도

그림 9에서 초기충전을 위한 인덕터 L_o 와 콘덴서 C_o 는 중간에 몇개의 탭을 설정하여 여러 값으로 조절할 수 있도록 하였으며, 콘덴서 C_o 에 단상 전파정류기를 연결하여 이 콘덴서에 직류전압을 충전시킨다. 싸이리스터 Q_s 는 콘덴서 C_o 에 충전된 전압을 인버터의 콘덴서 C_p 로 충전시키기 위하여 사용한다.

3-1. 콘덴서 초기충전 장치 해석

단상 전파정류기로 콘덴서 C_o 에 직류전압을 충전시킨 후, 싸이리스터 Q_s 를 도통시킨다. C_o 에 충전된 전압에 의하여 인버터 콘덴서 C_p 에 전압이 충전되면서 동시에 부하쪽으로 전류가 흐른다. 이 때 L_o 와 C_o, C_p 에 의한 공진 주파수 및 C_p 와 $(L_{Tw}+L_q)$, R_q 에 의한 공진주파수 등, 두 개의 공진주파수에 따라 각 부분의 전압 및 전류파형에 영향을 미친다. 따라서 초기충전이 성공하기 위하여 가열부하의 등가 저항, 인덕턴스 및 인버터 콘덴서 값에 따라 초기 충전장치의 L_o 와 C_o 값을 조정하여 두 공진주파수를 조정하여야 한다.

콘덴서의 초기충전이 성공하기 위한 조건이 다음 두 가지가 있다.

- 1) 인버터의 싸이리스터를 턴오프 시키기 위한 충분한 역방향 전압
- 2) 초기충전이 완료된 후 싸이리스터 Q_s 가 턴오프 될것

그림 10는 초기 충전과정을 설명하기 위하여, 초기충전회로의 공진주파수가 가열부하의 공진주파수가 보다 높을 때 각 부분의 파형을 그린 것이다. 각 구간별로 동작상태를 설명하면 다음과 같다.

i) $0 < t < t_1$

i_o 전류는 L_o 와 (C_o+C_p) 의 공진주파수로 정현파파형을 가지며, 양의 방향으로 반주기동안 흐르다가 전류가 음의 방향이 되는 시점, 즉 $t = t_1$ 에서 전류가 0되면서 싸이리스터 Q_s

가 오프 (off)된다. 가열부하 전류인 i_L 은 부하의 공진주파수가 충전회로의 공진주파수 보다 낮으므로 $t = t_1$ 에서도 이 전류는 양의 값을 유지한다. 인버터 콘덴서전류 $i_c = i_o - i_L$ 이며, 인버터콘덴서 전압 V_c 는 $t = 0$ 에서 충전을 시작하여 증가되다가 콘덴서전류가 음의 방향되는 구간에서는 감소하게 된다.

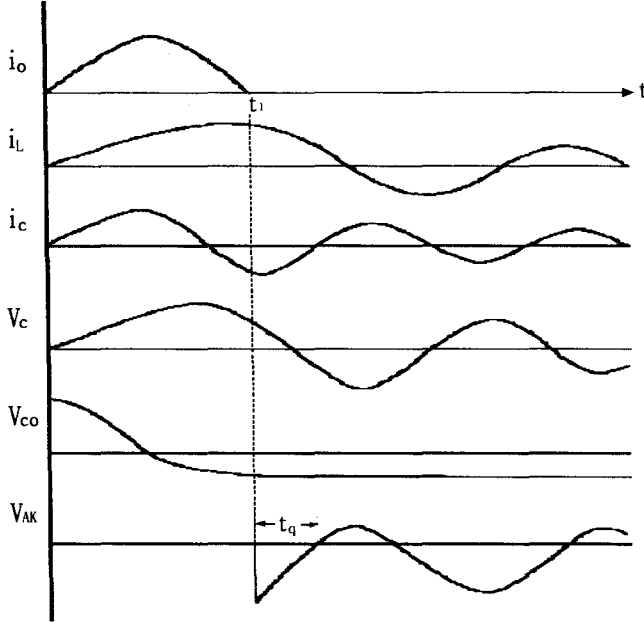


그림 10. 초기 충전회로 동작 파형

초기충전 콘덴서전압은 초기에 충전된 전압에서 공진주파수의 반주기동안 계속방전되어 $t=t_1$ 에서는 대부분 음의 값이 되며 Q_s 에 걸리는 전압 V_{AK} 는 Q_s 가 도통되는 구간이므로 0이 된다.

ii) $t > t_1$

i_o 전류는 싸이리스터 Q_s 가 오프되므로 0이 된다.

가열부하 전류인 i_L 은 $t = t_1$ 에서의 초기값으로 C_p 와 $(L_{TW}+L_q)$, R_q 의 공진주파수로 발진하면서 제동계수값에 따라 서서히 감소한다. i_c 는 i_o 가 0이므로 $i_c = -i_L$ 식의 파형을 가지며, 인버터 콘덴서전압은 $t = t_1$ 에서의 초기전압에서 i_L 과 같이 부하회로의 공진주파수로 발진하면서 제동계수값에 따라 서서히 감소한다. 충전회로 콘덴서전압은 $t = t_1$ 에서의 전압을 그대로 유지한다.

Q_s 에 걸리는 전압 V_{AK} 는 다음과 같다.

$$V_{AK} = -(V_c + V_{CO}) \quad (3-1)$$

회로 턴오프 시간 t_q 동안 역방향 전압이 인가되며, 이 t_q 시간이 이 싸이리스터 턴오프 시간보다 더 커야 싸이리스터 Q_s 가 완전히 오프된다.

4. 콘덴서 초기충전 장치의 시뮬레이션 결과

콘덴서 초기 충전회로에 대한 시뮬레이션을 하기 위하여, 시뮬레이션용 소프트웨어인 ACSL (Advanced Continuous Simulation Language)을 사용하였다.

그림 9에서 $C_p = 150\mu F$, $L_q = 19.1\mu H$, $R_q = 136m\Omega$ 일 경우, 초기 충전회로의 L_o , C_o 값의 변화에 대한 i_o 의 전류파형과 인버터 콘덴서전압 V_c , 충전회로의 콘덴서전압 V_{Co} , Q_s 에 걸리는 전압 V_{AK} 등의 파형을 관찰한다. 그림 11은 $C_o=C_p$ 이며, $L_o=(L_q+L_{TW})$ 일 경우, 그림 12는 $C_o=C_p$ 이며, $L_o=(L_q+L_{TW})/2$ 일 경우, 그림 13는 $C_o=C_p$ 이며, $L_o=(L_q+L_{TW})\times 2$ 일 경우, 그림14은 $L_o=(L_q+L_{TW})$ 이며, $C_o=C_p/2$ 일 경우, 그림 15는 $L_o=(L_q+L_{TW})$ 이며, $C_o=C_p\times 2$ 일 경우 각각 시뮬레이션 결과이다.

이 시뮬레이션 결과에서 보면, 그림 12경우와 같이 충전회로의 콘덴서 값은 가열부하의 등가 커패시턴스와 동일하게 설정하고, 인덕터 값은 가열부하의 등가 인덕턴스의 1/2 값으로 조정하여, 충전회로의 공진주파수가 부하의 공진주파수보다 약 2배정도 크게 하는 것이 가장 바람직함을 알수 있다. 왜냐하면 이 공진주파수가 부하의 공진주파수의 2배로 될 경우 인버터의 콘덴서전압이 최대가 될 때 전류 i_o 가 0이 되어 Q_s 가 오프되기 때문이다.

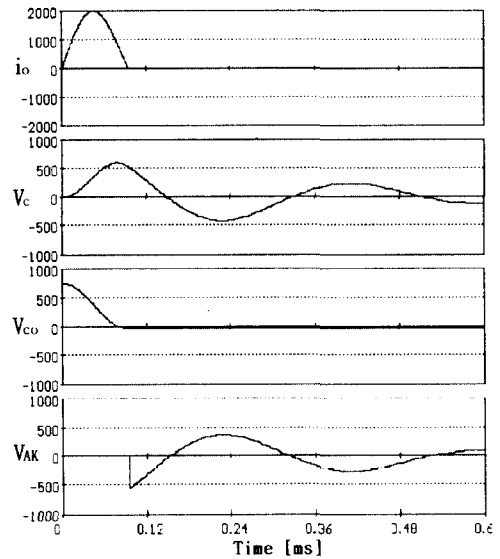
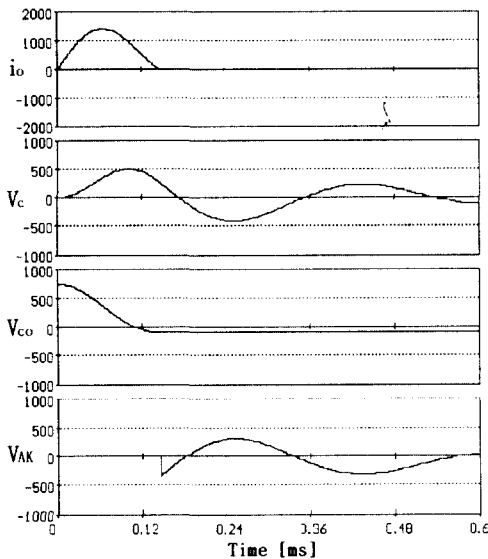


그림 11. $C_o=C_p$ 이며, $L_o=(L_q+L_{TW})$ 일 경우

그림 12. $C_o=C_p$ 이며, $L_o=(L_q+L_{TW})/2$ 일 경우

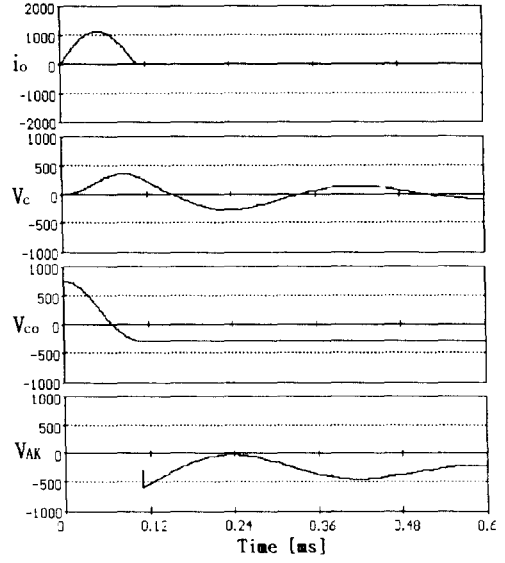
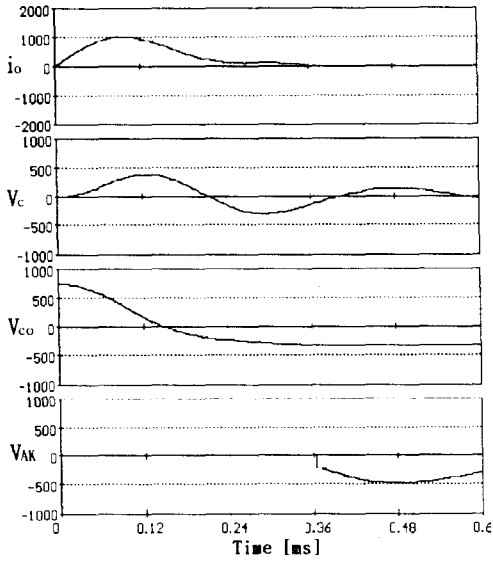


그림 13. $C_o=C_p$ 이며, $L_o=(L_q+L_{TW})\times 2$ 일 경우 그림 14. $L_o=(L_q+L_{TW})$ 이며, $C_o=C_p/2$ 일 경우

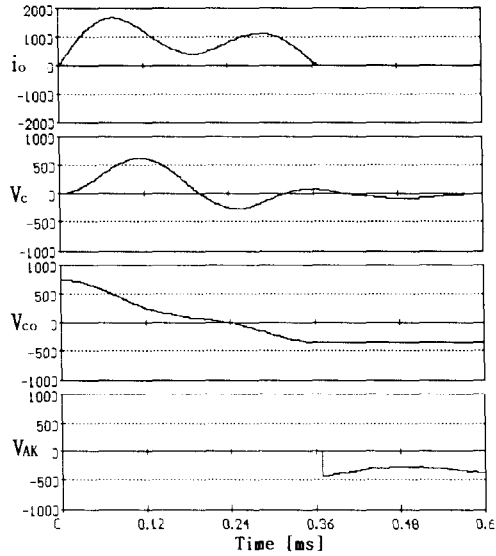


그림 15. $L_o=(L_q+L_{TW})$ 이며, $C_o=C_p\times 2$ 일 경우

5. 결 론

본 연구에서 콘덴서 초기 충전장치 설계에 대한 연구결과를 간략하게 기술하면 다음과 같다.

- 1) 가열코일과 피가열체를 등가 저항과 인덕턴스로 모델링하고, 여기에 접합변압기의 등가회로 및 연결선의 인덕턴스까지 모두 고려하여, 병렬공진형 인버터의 전체 부하에 대한 모델링식을 유도하였다.
- 2) 병렬공진 인버터에 필요한 콘덴서전압의 초기충전 장치를 해석하고, 시뮬레이션을 통하여 이 초기 충전회로 인덕터 및 콘덴서 값의 변화에 대한 이 회로의 동작특성을 분석하였다.
- 3) 이 초기 충전장치의 해석 및 시뮬레이션 결과를 통하여 충전회로의 공진주파수가 부하의 공진주파수보다 약 2배 정도 조정하는 것이 가장 좋은 특성이 나타남을 알 수 있었다.

본 연구의 결과로 다른 유도가열용 인버터의 해석 및 설계에도 도움이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] W.E.Frank, New Developments in High-Frequency Power Sources, IEEE Trans. On Ind. and Gen. Appl., Vol.IGA-6, No.1, pp.29-35, Jan./Feb., 1970.
- [2] K.B.Zhao, P.C.Sen, and G.Premchandran, A Thyristor Inverter for Medium-Frequency Induction Heating, IEEE Trans. On Ind. Elec., Vol.IE-31, No.1, pp.34-36, Feb., 1984.
- [3] P.Jain and S.B.Dewan, Starting Problems Associated with a Transformer Coupled Load in a Series Inverter, IEEE Trans. On Magnetics, Vol.24, No.6, pp.2895-2897, Nov., 1988.
- [4] P.Jain and S.B.Dewan, A Starting Inverter for a Voltage Source Series Inverter with a Tranformer Coupled High-Q Induction Heating Load (Type A Inverter) in Conf. Rec. of IAS, 1987, pp.699-704.
- [5] J.Davies and P.Simson, Induction Heating Handbook, McGraw-Hill Book Company, 1979.