

공진특성을 가지는 온도제어시스템의 스위칭 기법 연구

A Study for the Switching Method of the Temperature Control System with the Resonance Feature

박 활 곤*, 박 철 우*, 최 연 호**, 구 본 호***, 권 우 현*

* 경북대학교 전자공학과(전화:(053)940-8526, 팩스:(053)950-5526, E-mail : isoull119@naver.com, true@palgong.knu.ac.kr, whkwon@ee.knu.ac.kr)

** 비주얼 테크(전화:(053)382-3613, 팩스:(053)950-5526, E-mail : space@visual-tech.co.kr)

*** 경일대학교 컴퓨터제어·전기공학부(전화:(053)850-7320, 팩스:(053)950-5526, E-mail : dockoo@kiu.ac.kr)

Abstract : There are generally two temperature control methods using ac voltage regulators - the phase control method and the on-off control method. The phase control method uses thyristor's angles of extinction for the output power regulation and the on-off control method uses the control of on and off times for the output power regulation. Both of methods have the problems that are the unbalance of the three phase and surge current caused system's destruction.

The main object of this study proposes a solution of problems of surge currents and unbalance of three phase when thyristor voltage regulator is switching. To solve the problem, It is proposes that the solution of surge currents is using a tap transformer and an additional switch with adjustable resistance and applies zero crossing of switching voltage of two input line to power load. This method is discuss and verified by computer simulations and experiments.

I. 서 론

유도가열(Induction heating)은 전자기유도현상에 의하여 도체에 전류를 유도하여 가열하는 방식으로 동일한 시간에 훨씬 높은 열을 발생시킨다는 장점을 가진다. 또한 자동화와 온도의 제어가 용이하며, 금속 표면으로부터 가열 깊이를 조절할 수 있어 열처리에도 이용이 가능하다. 뿐만 아니라 오염이 적고 깨끗한 작업 환경을 제공하면서, 작업공간이 넓지 않고 유지 비용이 적게 든다.[1] 이러한 이유들로 산업현장에서 널리 응용되고 있으며 특히 제철산업에서 활발하게 응용하고 있다.[2-5]

아연보온로는 제철공정에서 사용되고 있는 유도가열의 응용중의 하나로서, 교류-교류 변환기를 사용한다. 교류-교류 변환기에는 교류 전력의 크기와 위상을 모두 바꿀 수 있는 방식과 전류나 전압의 크기만 바꾸고 주파수는 고정시켜 사용하는 방식이 있다.[6] 후자의 경우, 교류-교류 위상제어 컨버터 혹은 교류전압조정기라고 불린다. 교류전압조정기는 사이리스터 양방향 스위치를 전원단과 부하단을 직렬연결한 구조로서 기본 주파수를 사용하는 경우에 유리하며 회로구조가 간단하다는 이점이 있다.

기존의 사이리스터 전압조정기를 사용하여 로(furnace)의 온도를 제어하고자 할 때 널리 사용되는 두 가지 제어방식이 있는데 이 두가지 방식은 온 오프(on-off)제어방식과 위상제어(phase control)방식이다.

위상제어는 사이리스터의 저지각(retard angle)을 이

용하여 전원전압의 매사이클 내의 선정된 구간 동안 부하회로와 전원을 연결하여 출력을 제어한다. 위상제어는 정상상태에서의 역률이 저지각(retard angle)에 따라서 부하역률이 크게 변한다는 단점을 가지고 있다.[7] 뿐만 아니라 로(furnace)의 역률개선을 위한 공진시스템의 추가된 C로 인해서 심각한 서지전류를 일으킬 뿐만아니라 잦은 스위칭으로 인한 스위칭 손실 및 고조파의 발생등의 문제가 있어서 로(furnace)의 제어를 위해서는 문제점이 있다.

온 오프 제어는 스위치의 개폐를 몇주기 단위로 주기적으로 하는 방식인데 반응속도가 위상제어에 비해서 느리다. 공진특성을 가지는 부하에 연결된 경우 완전히 차단되었다가 다시 연결되는 순간에 큰 서지전류가 발생하여 이 방법 역시 문제점이 있다.

본 논문에서는 보온로의 온도제어를 위한 공진특성을 가지는 부하 시스템의 전력제어를 위해서 스위칭(switching)시에 발생하는 서지전류의 문제 및 불평형문제를 해결하기 위한 방안들을 제시하였다. 온오프제어방식에 탭변압기의 사용과 스위치가 직접 온 오프될 경우 발생하는 돌입전류의 제한을 목적으로 주 스위치에 병렬로, 저항과 직렬로 연결된 보조 스위치를 삽입하였다. 보조스위치를 주스위치들과 중복동통을 시켜 주스위치의 스위칭을 보조하였다. 또한 스위치 양단의 전압이 영일 때 스위칭하지 않고 출력전압을 이용하여 스위칭하는 방법을 제안하였다. 이 방법을 사용할 경우 스위치전압을 제로크로싱하는 것보다 간편하면서도

비슷한 성능을 낼 수 있다. Matlab Simulink의 파워시스템 블록을 이용한 모의실험을 통하여 제안된 스위칭 방법의 타당함을 확인하였다.

II. 공진특성을 가지는 유도가열부하시스템

1. 공진특성을 가지는 부하시스템

온도제어시스템은 부하의 온도에 따라서 부하의 임피던스가 변한다. 순수임피던스가 아닌 유도성부하인 경우 부하의 임피던스가 바뀌게 되면 부하의 역률도 변하게 되어 이것은 시스템에 악영향을 미치므로 부하역률을 일정하게 유지하는 것이 필요하다. 또한 단상이 아닌 3상을 이용할 경우 3상평형문제도 고려해야 한다. 아래의 그림은 3상을 이용해 단상인 유도성부하를 제어하고자 할 때 부하단위역률과 3상평형을 위해서 추가의 커패시터와 인덕터가 삽입된 구조의 회로를 나타낸 것이다.

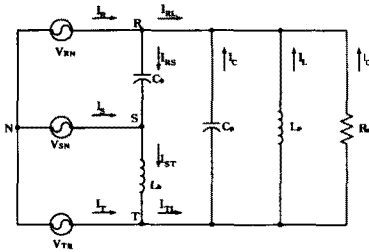


그림 1 3상 공진 시스템

2. 부하시스템의 정상상태 해석

(1). 부하단위역률

위의 그림 1은 3상 공진시스템 회로이다. 그림 1의 회로를 해석하기 위해서 우선 3상입력전원인 v_{RN} , v_{SN} , v_{TN} 을 아래와 같이 정의한다

$$v_{RN} = V \angle 0^\circ, v_{SN} = V \angle 120^\circ, v_{TN} = V \angle 240^\circ \quad (1)$$

위의 식 (1)을 이용하여 R단과 S단 사이의 선간전압 v_{RS} , S단과 T단 사이의 선간전압 v_{ST} 그리고 T단과 R단 사이의 선간전압 v_{TR} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{RS} &= \sqrt{3} V \angle 30^\circ, v_{ST} = \sqrt{3} V \angle -90^\circ \\ v_{TR} &= \sqrt{3} V \angle -210^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

R과 S사이의 임피던스를 Z_{RS} , S와 T사이의 임피던스를 Z_{ST} , T와 R사이의 임피던스를 Z_{TR} 라고 하면

$$\begin{aligned} Z_{RS} &= -j \frac{1}{\omega C_b}, Z_{RS} = j \omega L_b, \\ Z_{TR} &= \frac{j \omega L_b}{1 - \omega^2 L_b C_p} // R \end{aligned} \quad (3)$$

이다.

부하역률이 단위 역율이 되기 위해서는 부하전압 v_{TR} 과 부하전류 i_{TL} 의 부하역률이 단위역율이기 위해서

는 되기 위해서는 식(3)에 의해서

$$1 - \omega^2 L_b C_p = 0 \quad (4)$$

이 되면 된다.

(2). 3상평형과 입력단위역률조건

출력측의 부하역률이 단위역률인 시스템에서 R단에서 S단으로 흐르는 전류 i_{RS} 와 S단에서 T단으로 흐르는 전류 i_{ST} 그리고 T단에서 R단으로 흐르는 전류 i_{TR} 에 의해서 선전류 i_R, i_S, i_T 는 다음과 같이 구해진다.

식(2)와 식(3)을 이용하면 선전류 i_R 은 식(5)로 주어진다.

$$i_R = |i_R| \angle \alpha \quad (5)$$

$$\text{단, } |i_R| = \frac{\sqrt{6} V}{2} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{R} - \omega C_b\right)^2 + \left(\omega C_b \sqrt{3} - \frac{1}{R}\right)^2}$$

$$\angle \alpha = \tan^{-1} \frac{\omega C_b \sqrt{3} - \frac{1}{R}}{\frac{\sqrt{3}}{R} - \omega C_b}$$

입력측의 R선상에서의 역률이 1이 되기 위한 조건은 i_R 과 v_{RN} 의 위상이 같을 때, 즉 $\alpha = 0$ 이므로

$$\omega C_b \sqrt{3} - \frac{1}{R} = 0 \quad (6)$$

이어야 한다.

선전류 i_S 는 $i_S = |i_S| \angle \beta$ 이다.

$$\text{단, } |i_S| = \sqrt{6} V \sqrt{\left(\frac{-1}{\omega L_b} + \frac{\omega C_b}{2}\right)^2 + \left(\omega C_b \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2}$$

$$\angle \beta = \tan^{-1} \frac{\omega C_b \frac{\sqrt{3}}{2}}{\left(\frac{-1}{\omega L_b} + \frac{\omega C_b}{2}\right)}$$

i_S 의 위상각 β 는 v_{SN} 과 같으므로 $-\frac{2}{3}\pi$ 이다.

$$\therefore \frac{1}{\omega L_b} = \omega C_b \quad (7)$$

i_T 는 $i_T = \frac{\sqrt{2} V}{R} \angle -\frac{4}{3}\pi$ 이다. 또한 식 (6)와 식 (7)을 만족할 때 $|i_R| = |i_S| = |i_T|$ 이다. 따라서 그림 2와 같은 3상평형 상태를 얻을 수 있다.

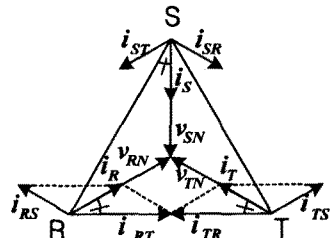


그림 2. 3상 평형 상태

III 사이리스터 전압조정기를 사용한 기존의 전력제어

1. 위상 제어

전원전압의 여러 주기가 지나기를 기다리지 않고 반복되는 반주기가 지난 어떤 시간에 스위치를 닫아서 출력의 실효치를 제어하는 방법을 위상제어라고 한다 [8]. 출력이 입력주파수와 같은 주기를 가진 매주기마다의 사이리스터의 소호각에 의해서 결정되므로 빠른 응답특성을 가지며, 넓은 범위의 전력조절이 가능하다. 하지만 전류와 전압사이의 위상불일치와 전류의 효율이 매우 많이 변하기 때문에 역률이 일정하지 않다. 또한 잦은 스위칭으로 인한 서지전류의 발생이 심하다.

2. 온 오프(on-off) 제어

입력주파수의 m 개의 사이클 동안은 스위치를 도통시켜서 입력에서 출력으로 에너지를 전송하고 n 개의 사이클 동안은 스위치를 차단하여 입력에서의 에너지 전달을 차단하여 출력의 실효치를 제어하는 방법을 온 오프(on-off)제어라고 한다. 온 오프(on-off) 제어에서의 실효치를 V_o 라고 할 때 $V_o = V_i \sqrt{D}$ 이다. 이때 $D = \frac{m}{m+n}$ 이다. 따라서 이 제어방법은 응답속도가 느려도 되는 시스템에 적당하다. 그림 1과 같은 시스템 경우, 단순히 온 오프(on-off)제어를 하면 완전 차단 시에 직렬공진회로가 되어 이상전압이 발생되고 다시 도통될 경우 큰 전압차로 인해 큰 서지전류가 발생된다.

IV. 제안하는 전력제어

1. 탭변압기의 사용

온도 제어를 위한 스위칭시에 그림 3과 같은 평형상태를 방해하는 가장 큰 요소 중 하나는 전압차이다. 따라서 본 논문에서도 역시 전압차를 줄이는 방법으로 탭변압기를 사용하되 탭은 두개의 탭만을 사용한다.

2. 보조 스위치를 사용한 중복구간의 도통

사이리스터 스위치는 역회복시간의 존재로 인해 두 스위칭 신호간에 약간의 갭(gap)이 필요하다. 갭(gap)을 그냥 사용시 완전 차단상태가 발생하여 다음 도통시 큰 서지전류가 발생한다. 이를 막기 위해 약간의 저항을 포함하는 스위치를 gap 구간동안 중복도통시킴으로써 완전차단상태도 방지하고 전압차도 줄이는 효과도 기대할 수 있다. 탭간의 스위칭 전이가 끝나면 중복구간 바로 없애주면 저항으로 인한 소모도 최대한 줄일 수 있다.

3. 스위치 전압에 의한 재료 스위칭

탭의 수를 줄이면서 안정된 스위칭을 하는 가장 효과적인 방법은 스위치 양단의 전압을 체크하여 영이 되는 시점에서 사이리스터를 점화시키는 방법이다. 전압이 영인 시점에서 점화되기 때문에 스위칭 손실도 줄이면서 공진커패시터에 의한 영향도 최대한 줄일 수 있다. 하지만 하이 탭(high tap)과 로우 탭(low tap)의

두 개의 tap만 있어도 적어도 6개의 양방향 스위치를 제로크로싱(zero crossing)순간에 온해야 하는 번거로움이 있다.

4.4 제안하는 출력전압에 의한 스위칭

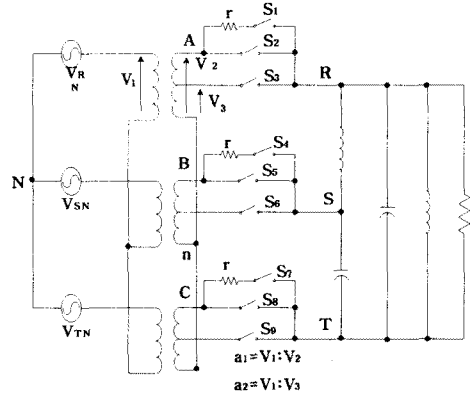


그림 3. 보조 스위치를 사용하는 회로

그림 3은 하이탭과 로탭을 삼상변압기로 구현한 후 보조스위치를 사용한 회로이다. 보조스위치 S_1, S_4, S_7 이 도통된 상태에서의 S_2, S_5, S_8 또는 S_3, S_6, S_9 의 어느 한 스위치가 도통되어도 이 스위치는 아무런 영향을 주지 않는다. S_5 나 S_8 을 도통시킨 후 남은 스위치를 순서대로 v_{TR} 이 영인 시점에서 턴오프시키면, 이때 C 의 양단의 전압은 영이므로 서지전류의 발생을 최소화시킬 수 있다. 또한 온도제어를 위해서 부하전류 i_R 를 측정할 경우 부하전류 i_R 와 부하전압 v_{TR} 의 위상이 같으므로 i_R 만을 측정하여 v_{TR} 을 대신하면 i_R 하나만을 측정하고 나머지 전류 및 전압은 측정하지 않아도 된다는 이점이 생긴다.

V. 모의 실험 및 고찰

본 논문에서 제안한 방법을 모의실험을 통하여 확인하고자 한다.

표 1은 모의실험에서 사용한 파라미터들이다.

표 1 모의 실험조건

교류입력전압[V]	440
공진주파수[Hz]	60
부하저항 R[Ω]	8.7
부하인덕턴스 L_F [mH]	3.6
역률조정커패시터 C_F [mF]	1.954
위상평형인덕터 L_B [mH]	40
위상평형커패시터 C_B [μF]	176
변압기 권선비 $a_1(v_1:v_2)$	1
변압기 권선비 $a_2(v_1:v_3)$	0.8
중복도통용 스위치의 r[Ω]	1

표 1의 파라미터들은 식(4),(6),(7)을 만족시킨다.

먼저 그림 4의 (a)는 온 오프제어시 전전류파형과 스위

칭신호이고 (b)는 탭을 사용했을 때의 파형이다. 4의 (b)의 스위칭파형에서 표현한 S2는 하이탭 스위치이고 S3는 로우탭 스위치이다. 그림 5의 (a)는 gap에 의해서 전류의 불연속구간이 생긴 경우의 파형으로 전류가 완전 차단되었다가 다시 도통될 때 큰 서지전류가 발생됨을 알 수 있다. 그림 5의 (b)는 보조스위치를 이용하여 전류의 불연속구간을 없앤 경우의 파형으로 전류의 불연속만 막아도 전류파형이 많이 개선되어짐을 알 수 있다. 그림 6의 (a)는 제로크로싱에 의한 스위칭시의 파형으로 여기서 사용된 회로는 그림 3과 같고 스위치 양단전압은 실제파형의 1/40배로 축소한 파형이다. 그리고 스위칭 파형은 각각 로우 탭이 온되는 순간(0.02초에서 0.06초사이)과 하이탭이 온되는 순간(0.15초에서 0.19초사이)을 확대한 그림이다. 그림 6의 (b)는 제안한 부하전압 v_{TR} 을 이용한 스위칭시의 파형이다. 부하전압 v_{TR} 은 스위칭 신호와 비교하기 위해 실제크기의 1/40배로 축소하여서 표현하였다. 그림 6의 (a)와 같이 스위칭순간을 확대표시하였다. 그림 6을 보면 알 수 있듯이 제로크로싱시의 파형과 제안한 방법의 파형이 거의 비슷한 성능을 가지고 있다. 하지만 제안한 방법은 스위칭시 출력단에 대해서 두개의 스위치단만을 제어하면 되므로 훨씬 제어가 간단하다.

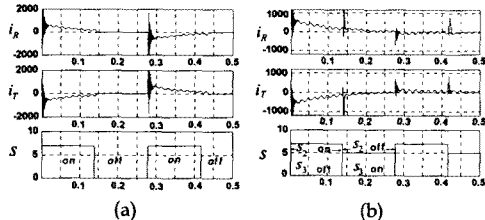


그림 4. 온 오프 제어와 탭 사용시의 선전류 파형

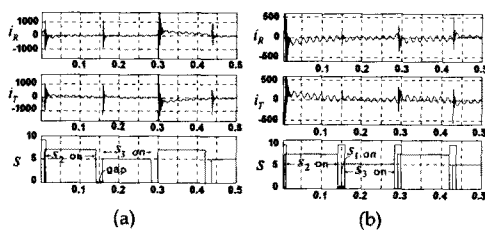


그림 5. gap이 있을 때와 보조스위치를 이용한 중복도통구간의 사용시의 선전류 파형

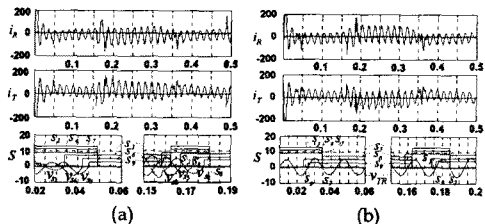


그림 6. 제로 스위칭시와 제안하는 방법으로 스위칭시의 선전류 파형

VI. 결 론

본 논문에서는 온도제어를 목적으로 하는 공진특성을 가지는 부하가 스위칭시에 발생하는 서지전류 및 불평형문제를 쉽게 해결하는 방법을 제시하였다. 큰 전압차로 인해 발생하는 과전류를 억제하기 위해 탭변압기를 사용하였고 탭간의 스위칭사이에 발생될 수 전류의 불연속을 억제하기 위해 보조스위치를 사용하여 주스위치와 중복도통시켰다. 또한 부하단에 직접연결되지 않은 입력스위치는 먼저 도통시킨후 부하에 병렬 연결된 공진커패시터의 영향을 고려하여 부하의 전압이 0이 되는 순간마다 도통되지않은 출력단에 직접연결된 두 입력선의 스위치를 차례로 스위칭함으로써 서지전류 및 불평형문제를 간단하게 해결할 것을 제안하였고 이를 모의실험으로 확인하였다. 본 논문에서 제안한 방법의 스위칭을 할 경우 복수개의 스위치를 체크하지않고 하나의 출력전압만을 체크함으로써 경비를 줄임과 동시에 간단히 스위칭할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 앞으로 실험을 통한 검증이 필요하며 변압기 및 보조스위치로 인한 전력손실문제등은 아직 고려해야 할 문제들이다.

참 고 자 료

- [1] S. Zinn, and S. L. Semnatin, "Elements of Induction Heating : Design, Control, and Applications", Palo Alto : Electric Power Research Institute, Inc, 1988.
- [2] B. R. Pelly, "Latest Development in Static Frequency Power Source for Induction Heating", IEEE, Trans. on I.E.C.I.17, pp.297-312, June, 1970.
- [3] H. Omori, H. Yamashita, M. Nakaoka, T. Maruhashi, "A Novel Type Induction-Heating Single-Ended Resonant Inverter Using New bipolar Dalrington-Transistor", IEEE PESC Conf. Rec, pp. 590-599, 1985.
- [4] S. Nagai, et al., "A New Phase-Shiftion PWM Regulated-Mode Resonant Inverter Using Static Induction Power Devices for Induction-Heating and Melting Application", EPE Conf. Rec. pp. 347-352, 1989.
- [5] 김호영 외 1인, "제철 공정에서 전자기 야금기술의 현황과 전망" RIST 연구논문 제 13권 1호, 1999
- [6] 노의철, 정규범, 최남섭, 전력전자공학, 도서출판 문운당, 1998.
- [7] Tzanev, T.; Seymenliyski, K.; Rahnev, P.; Letskowska, S.; Ivancheva, W.; "Thyristor based thermoregulator for technological oven", Microwave Electronics: Measurements, Identification, Application Conference, p220-223, 18-20 Sept 2001.
- [8] W. Peter, SWITCHING POWER CONVERTERS, Van Nostand Reinold Company, 1981.