

인덕션 조리기기의 인버터 출력 최적제어

이세민, 박정욱
연세대학교

Optimal Inverter Power Control for Induction Heating Appliance

Se-Min Lee, Jung-Wook Park
Yonsei University

Abstract - 본 논문은 고주파 IH(Induction Heating) 조리기기의 전원으로 사용되는 인버터를 PI 제어를 사용하여 듀티비를 가변시켜 출력을 최적 제어하는 회로를 제시하였다. 분석에 사용된 기본 인버터 회로는 Single-Ended Push-Pull (SEPP) 영전류 스위칭 공진인버터이며 실제 IH 조리기기의 동작을 구현하기 위해 입력단의 전원으로 220V 60Hz 정현파와 브리지 정류기, 평활 콘덴서를 사용하였다. 회로의 해석과 시뮬레이션을 위해 범용 시뮬레이션 툴인 Pspice를 이용하여 분석하였다. 향후, 제안된 제어방법은 유사한 IH 기기, DC-DC 컨버터, 인덕션 모터등의 시스템에 활용되리라 기대된다.

1. 서 론

고주파 유도가열 기술은 전자유도 작용에 의한 것으로 고주파 교류 전류가 흐르는 코일 주변에 있는 금속체에 와전류가 유도되어 금속체에 열이 발생하는 현상을 이용한 것이다. 60Hz 교류 입력을 25~40kHz의 고주파 교류로 변환하여 유도코일에 공급하여 유도코일 위에 놓여 있는 금속 팬에 와전류가 유기기되어 이 전류에 의해서 팬은 직접 가열된다. 기존의 조리용 전기레인지와 가스레인지에서는 상당한 양의 열이 대기 중으로 발산되기 때문에 열효율이 낮다. 그러나 유도가열 방식은 기존의 방식에 비하여 효율이 월등히 높고 직접적으로 용기를 가열할 수 있으며, 오염물질의 발생이 없다. 또한 인버터의 제어 주파수나 듀티비에 의해 출력 및 동작제어가 용이한 장점이 있다[2].

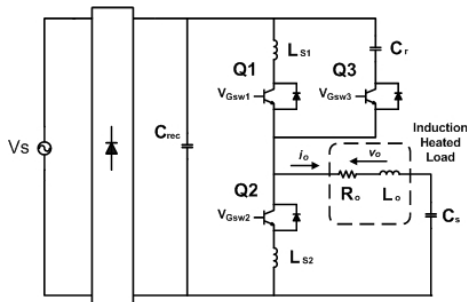
본 논문의 연구대상 회로는 참고된 논문에서 제시된 ZCS-SEPP 인버터에 AC-DC 컨버터와 평활 콘덴서를 추가하여 실질적인 입력 전원인 220V 60Hz 정현파를 공급한 회로이다. 또한 인버터 출력의 응답속도를 증가시키고 듀티비에 대한 PI 제어를 구현하기 위해 피드백 루프를 부가하여 PWM 회로의 입력 듀티를 가변시킬 수 있는 회로를 구현하였다. Pspice를 사용하여 기존 인버터 출력과 PI제어기가 추가된 회로의 출력 응답의 비교분석 및 성능을 검토하였다.

2. 본 론

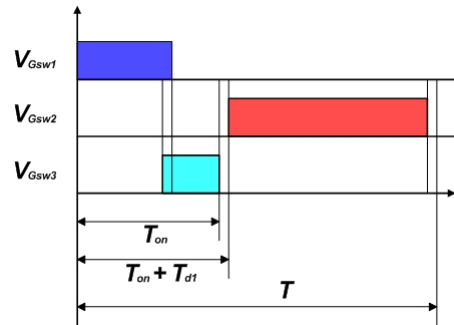
2.1 SEPP 영전류 스위칭 공진인버터 회로

그림 1은 유도가열 부하를 동작시키기 위한 영전류 소프트 스위칭 공진 인버터(ZCS-PWM SEPP)와 입력단에 AC-DC 컨버터를 추가한 회로이다. 이 회로는 3개의 IGBT 스위치를 사용하며, 스위치 Q_1 , Q_2 에 직렬로 스위칭 손실을 줄일 수 있는 인덕터 스너버를 연결하였고 스위치 Q_3 에는 스너버로 준공진 커패시터 C_r 를 첨가하였다. 그리고 부하단에는 역률보상용 부하공진 커패시터 C_s 를 직렬로 연결하였다. 이 회로의 PWM gate 펄스의 스위칭 패턴은 그림 2와 같다. 출력을 제어하기 위한 듀티비 D는 다음과 같이 정의된다[1].

$$D = (T_{on} + T_{d1}) / T \quad (1)$$

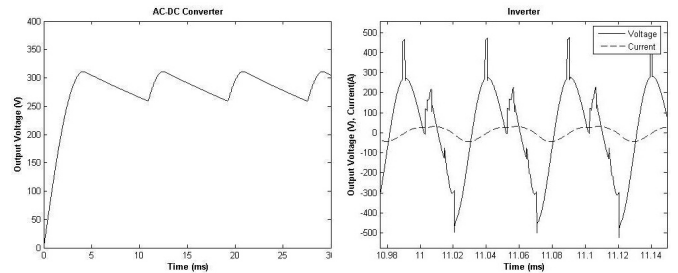


<그림 1> ZCS-PWM SEPP 인버터



<그림 2> PWM gate 펄스 스위칭 패턴

듀티비를 가변시켜 고주파 출력을 제어할 수 있으며, PWM과 PDM을 동시에 제어하여 저출력 조건에서의 영전류 소프트 스위칭 동작범위를 증가시킨다. 따라서 고출력 뿐 아니라 저출력에서도 영전류 소프트 스위칭에 따른 효율증가의 효과를 볼 수 있다[1][3].



<그림 3> AC-DC 컨버터 출력전압 및 인버터 출력전류 및 전압파형

그림 3은 그림 1의 회로를 Pspice로 시뮬레이션하여 얻은 인버터 입력단 (AC-DC 컨버터 출력단)의 전압파형과 인버터 부하에 공급되는 출력 전압과 전류 파형이다. 듀티비에 따른 부하출력, 효율 그리고 THD를 <표 1>에 나타내었다. 듀티비에 의해 인버터 출력이 제어될 수 있으며, 저출력 조건에서도 상당히 좋은 효율을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

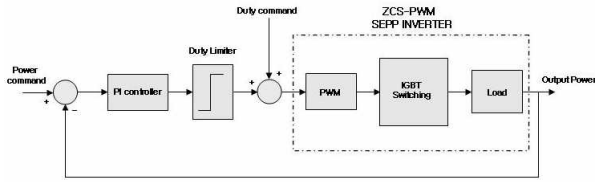
<표 1> 듀티비(D)에 따른 인버터 출력

D	입력전력(W)	출력전력(W)	효율(%)	THD(%)
0.34	2267	2160	95.28	19.45
0.30	1729	1621	93.75	26.77
0.25	1139	1055	92.63	32.94
0.20	694	627	90.36	37.75
0.17	442	384	86.88	40.37

2.2 PI 출력 제어기

그림 1의 인버터 회로에서 고주파 출력전력을 제어하기 위한 방법으로 PI 제어를 도입하였다. 인버터 부하의 출력 응답을 빠르게 하고 입력전원의 불안정과 같은 시스템 외란에 대응하여, 인버터 출력전력값을 피드백 루프를 통하여 듀티비를 최적 가변시킬 수 있도록 하였다. 제어 시스템의 피드백이 외란과 파라미터 변동의 영향을 줄일 수 있도록 하여, 출력이 개루프내의 이득변동과 외란이 나타났을때 그 외란에 둔감

하도록 제어를 설계하는 것이 목적이다[4]. 그림 4의 블록선도를 보면, 인버터 출력전력값을 정격출력값에 부채환시킨후 PI 제어를 통해 부하변동을 검출하여 듀티비에 보상값을 가감시켜 부하변동시 응답지연을 개선할 수 있도록 하였다. 비례기(P)를 설계하여 응답속도를 개선하고 오버슈트를 적절한 값으로 유지시켰고, 적분기(I)로 시스템 안정도를 유지하면서 정상상태 오차를 감소시켰다.



<그림 4> PI 제어가 결합된 인버터의 동작 블록선도

이론과 실험에 의하여 설정된 PI 제어기의 파라미터는 다음과 같다.

$$\text{피드백 이득 } G=1 \quad (2)$$

$$\text{PI 제어기 } H(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} = \frac{4s + 1}{s} \quad (3)$$

$G=1$ 일때 정격출력을 트래킹하며, K_p 는 증가할수록 응답시간이 감소되나 오버슈트가 증가한다. 따라서 $K_p=4$ 로 설정하였다. 그리고 적분기 파라미터(K_i)는 응답에는 거의 영향이 없으나 단순히 적분기를 연결함으로써 개루프 전달함수 극점에 0을 추가하여 정상상태 오차를 0으로 만든다. 시스템 안정도를 유지하고 있는 $K_i=1$ 로 파라미터를 설정하였다.

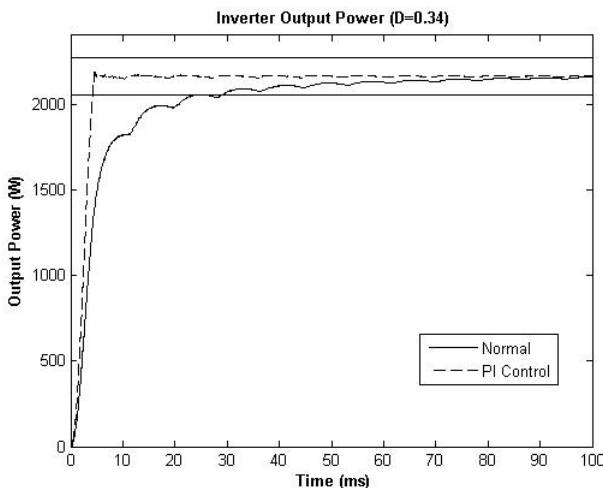
2.3 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서는 입력전원 220V 60Hz하의 다음과 같은 3가지 조건에 대하여 기존 회로와 PI 제어가 추가된 인버터의 출력응답을 비교해 보았다.

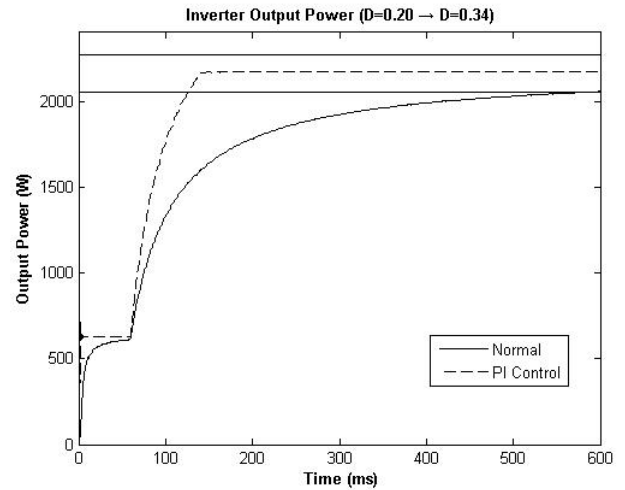
- (a) 인버터 초기 가동시의 출력응답 (그림 5)
 - 조건 : 듀티비 0.34, 출력전력 2160W, 동작시간 150ms
 - 기존 회로: $T_s = 28.90ms$
 - PI 제어 회로: $T_s = 4.65ms$
- (b) 부하용량 변경, 출력 가변시의 출력응답 (그림 6)
 - 조건 : 듀티비 0.20 → 0.34, 출력전력 627 → 2160W, 가변시간 50ms, 동작시간 600ms
 - 기존 회로: $T_s = 580.32ms$ (2160W의 T_s)
 - PI 제어 회로: $T_s = 123.00ms$ (2160W의 T_s)
- (c) 시스템에 외란이 유입 되었을 때 출력전력의 변동 (표 2)

첫번째, 두번째의 실험 결과로 초기 가동시와 출력 가변시의 응답시간이 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

- 초기가동시 정정시간 개선: 기존 회로의 16.1%
- 부하용량 변경시의 정정시간 개선: 기존 회로의 21.2%



<그림 5> 인버터 초기 가동시의 출력(Power)



<그림 6> 인버터 부하 용량 변경시의 출력(Power)

또한 <표 2>에서 보는 것과 같이 기존 인버터 회로는 외란에 대해 부하출력 변동이 심한 것에 비해 PI 제어기에 의해 듀티비가 가변되는 인버터 회로는 외란에 대한 영향이 최소화 되었다.

현재 조리기기용 인버터의 외란에 대한 제어회로는 대부분 팬의 존재 유무나 전원라인 노이즈에 대항한 시스템 차단회로이다. 여기에 추가로 시스템 파라미터 변동에 의한 인버터 출력 불안정을 감소시키기 위해 PI 제어를 사용함으로써 시스템 안정도를 최적화할 수 있다. 이러한 PI 제어회로는 기존 차단회로가 전원라인이나 출력단의 전압,전류를 변류기로 피드백시켜 제어하는 방식이기 때문에 큰 추가비용 없이 기존 차단회로를 PI 제어기의 피드백 회로로써 사용할 수 있는 장점이 있다.

<표 2> 시스템 외란에 대한 성능 결과 비교

조건	용량	출력 (W)	
		기존회로	PI 제어회로
정상 상태	-	2160	2160
입력전압 변동	220 V → 250 V	2795	2170
Ro 변동	2.54 Ω → 1 Ω	1895	2150
Cs 변동	0.802 μF → 0.75 μF	1840	2155

3. 결 론

본 논문에서는 인덕션 조리기기용 인버터의 PWM gate 펄스 시그널에 PI 제어를 적용하여 인버터 출력이 따라 듀티비를 가변시켜 출력전력을 최적으로 제어할 수 있는 시스템을 제안하였다.

제안한 회로는 인버터의 초기 가동시, 동작 중 출력 가변시에 출력의 응답속도를 개선할 수 있고 또한 시스템에 외란이 가해졌을 때 외란에 대한 영향을 최소화시켜 출력에 변동을 주지 않고 안정적인 동작을 가능하게 함을 시뮬레이션 툴인 Pspice를 통하여 확인 하였다.

향후, 제안한 최적제어방식은 유도가열을 비롯하여 각종 컨버터, 인버터 등 전력변환 장치 중 시스템의 응답시간이 중요한 파라미터로 작용하는 설비, 기기에 적용될 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Nabil A. Ahmed, Toshiaki Iwai, Hideki Omori, Hyun Woo Lee and Mutsuo Nakaoka, "A Novel Auxiliary Edge-Resonant Snubber-Assisted Soft Switching PWM High Frequency Inverter with Series Capacitor Compensated Resonant Load for Consumer Induction Heating", JPE 6-2-1, 2006
- [2] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics", 2nd Edition, pp. 527 - 534, 2002
- [3] Shengpei Wang, Kiyoshi Izaki, Izuno Hirota, Hidekazu Yamashita, Hideki Omori, and Mutsuo Nakaoka, "Induction-Heated Cooking Appliance Using New Quasi-Resonant ZVS-PWM Inverter with Power Factor Correction", IEEE Trans on Industry Appliance, Vol.34, No.4, 1998
- [4] Benjamin C. Kuo, "Digital Control Systems", 2nd Edition, pp 652 - 664, 1992