

입력단의 초핑 제어에 의한 인버터의 출력제어

이봉설*, 최신행*

*강원대학교 제어계측공학과

e-mail: mirine@Kangwon.ac.kr

Output Power Control of Inverter by Chopping Control on input a stage

Bong-Seob Lee*, Sin-Hyung Choi**

Dept of Computer Control Engineering, Kangwon National University

요 약

본 논문에서는 고주파 전류형 인버터의 출력을 제어하기 위하여 입력단의 초핑 스위칭 방법을 제안한다. 인버터의 출력제어는 스위칭 소자에 인가되는 구동신호에 위상천이의 크기에 따라 제어하고 있으며, 제한회로의 동작원리를 서술하였다. 또한 회로설계에 필요한 출력특성은 수치해석에 의해 평가 자료를 도출하고 실험 장치를 제작하여 이론결과와 비교 검토하여 특성평가의 정당성을 입증하였다.

1. 서론

최근의 반도체 스위칭 소자는 전압 구동 제어 소자로 구동 전력도 극히 적고, 스위칭 속도가 고속으로 되는 등 우수한 특징을 가지고 있으며, 고주파 스위칭용 전력 트랜지스터 계열인 MOSFET, SIT, IGBT를 비롯하여, 사이리스터 계열인 SI 사이리스터의 도입에 따라 스위칭 주파수가 수십 kHz ~ 수백 kHz 이상의 고주파 스위칭 동작이 가능하게 되었다[1]. 고주파 인버터의 응용분야로서는 유도 가열용, 강력 초음파 발전용 전원 및 고주파 링크형 컨버터, 무정전 전원 장치(UPS) 등의 분야가 있다[2].

반도체 스위칭 소자를 고속으로 구동시킬 경우, 턴 온·오프에 따른 스위칭 소자의 전압과 전류 스트레스의 증가, 그리고 회로의 표유 에너지를 처리하기 위한 실장 기술 등의 문제점이 발생하므로, 최근에는 공진 특성을 이용한 ZCS, ZVS 및 소프트 스위칭에 의해 이를 극복하여 주파수를 MHz 대까지 고속 스위칭 동작을 실현시키고 있다[3][4]. 본 논문에서는 상기와 같은 기술적 배경으로 종래의 고주파 공진 인버터 회로에 인버터의 고주파 출력을 선형적으로 제어하기 위하여 스위칭 소자에 인가하는 신호에 위상천이의 크기에 따라 스위칭하는 방법을 제안하고 있다. 스위칭 동작에 따른 특성평가를 수행하였으며, 실험을 통하여 이론과 비교·검토하여

이론해석의 정당성을 입증하고 있다.

2. 전류형 고주파 인버터

그림 1은 종래의 고주파 유도 가열용 전류형 인버터를 나타낸다. 이 회로에서 스위칭 소자의 동작은 (Sw1, Sw2)와 (Sw3, Sw4)를 듀티비를 50[%]로서 상호 대각으로 게이트에 신호를 인가하여 스위치를 턴-온(turn-on), 턴-오프(turn-off)하며, 이 때 부하의 탱크 회로에 구형파의 입력 전류를 공급한다. 이 구형파 전류는 탱크 회로의 소자 L, C값에 의하여 공진하며, 공진에 의해 부하에는 거의 정현파에 가까운 출력 전압을 발생하여 고주파 교류 전력을 발생시킨다.

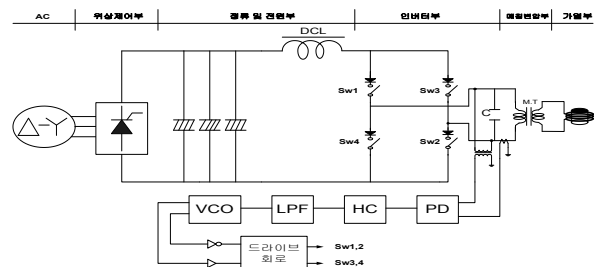


그림 1. 풀-브릿지 고주파 공진 인버터

종래 인버터의 부하 출력을 제어하기 위해서는 인버터 내부에 가변주파수(VF : Variable Frequency) 제어나 입력단을 위상제어 하여 전원을 조정하는 방법이 있다. 주파수제어 방법은 인버터 회로의 동작

이 용량성이나 유도성 부하로 동작할 경우에는 공진점이 벗어나 인버터 자체의 파형이 일그러지거나 노이즈 등이 동반되어 효율이 떨어질 뿐만 아니라, 스위칭 소자에 스트레스가 가해지는 등의 결점이 발생할 수도 있다. 제안하는 인버터는 인버터 자체에서 제어할 수 있는 일정전압 일정주파수 (CVCF: Constant Voltage Constant Frequency) 하에서 고주파 인버터의 출력을 제어할 수 있는 인버터로 그림 2이다.

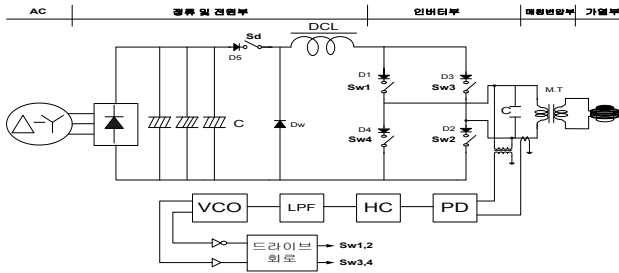


그림 2. 제안하는 풀-브릿지 고주파 공진 인버터

2.1 스위칭 구동방법

그림 3은 종래의 방법으로 스위칭 소자에 인가하는 구동방법이다. 전 주기에서 한주기에 대한 그림으로 적용한 듀티비(duty rate)는 50[%]로 상호대각으로 스위칭 소자(Sw1, Sw2)를 먼저 턴-온하고 스위칭 소자(Sw3, Sw4)는 턴-오프하며, 다시 스위칭 소자(Sw1, Sw2)는 턴-오프하고 스위칭 소자(Sw3, Sw4)는 턴-온을 연속 반복한다.

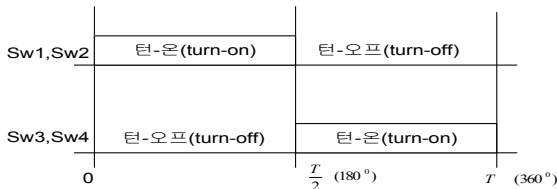


그림 3. 종래의 스위칭 방법

그림 4는 제안하는 스위칭 방법으로 이 스위칭 방법은 스위칭 소자(Sw1, Sw3)의 신호를 고정시키고 스위칭 소자(Sw2, Sw4)를 위상차 동기를 부여하여 초평용 스위치(Sd)의 게이트 신호를 제어한다.

그림에서 펄스폭 φ 는 $0^0 \sim 180^0$ 까지 펄스폭(φ)제어를 하며, 펄스폭(φ)이 0^0 이 되면 에너지 주입이 최대가 되고 180^0 이면 인버터의 탱크회로에는 에너지가 거의 주입이 되지 않아 출력은 거의 나오지 않는다. 탱크회로의 입력전류는 펄스폭에 의해 초평용 스위치의 턴-온, 오프제어에 의하여 출력을 제어하게 된다. 또한 회로에서 스위치 Sd에 신호가 인가되지 않으면 입력전원은 차단되거나 리액터에 축적되

어 있는 에너지를 방출시키기 위하여 프리휠링 다이오드(Dw)가 반드시 필요하다.

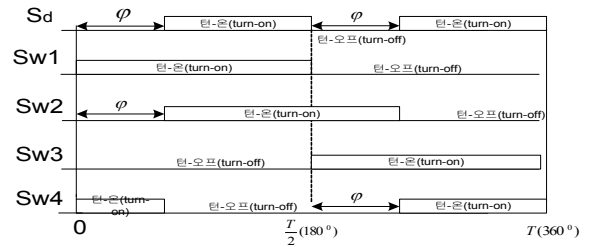


그림 4. 입력전류 제어를 위한 스위칭 방법

2.2 제안회로의 해석 및 동작모드

그림 5는 제안회로를 해석하기 위하여 등가회로이다. 그림에서 나타낸 각 소자의 전류 전압은 회로의 시뮬레이션 및 특성평가를 수행하기 위하여 다음 그림과 같이 나타낸다.

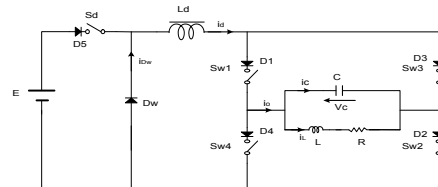


그림 5. 등가회로

제안한 인버터 회로는 스위칭 소자의 게이트의 구동신호 방법에 따라 제안회로의 동작모드는 표 1과 같다.

표 1. 동작모드

Switch Mode	S _d	Sw ₁	Sw ₂	Sw ₃	Sw ₄
1	turn-off	turn-on	turn-off	turn-off	turn-on
2	turn-on	turn-on	turn-on	turn-off	turn-off
3	turn-off	turn-off	turn-on	turn-on	turn-off
4	turn-on	turn-off	turn-off	turn-on	turn-on

제안회로의 해석결과에 범용성을 부여하고 특성평가를 위하여 표 2의 정규화 파라미터를 도입하여 나타내었다.

표 2. 정규화 파라미터

Value Parameter	Reference values	Normalized values
Time	$T = \frac{1}{f_0}$	$Z = \frac{t}{T}$
Frequency	$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	$\mu = \frac{f_o}{f_r}$
Impedance	$Z_s = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$	$\lambda = \frac{R}{Z_s} = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$
Voltage	$E_s = E$	$V_c^*(z) = \frac{V_c(t)}{E_s}$
Current	$I_s = \frac{E}{Z_s}$	$i^*(z) = \frac{i(t)}{I_s}$
Power	$P_s = E_s \cdot I_s$	$P^*(z) = \frac{P(t)}{P_s}$
Inductance	$L_s = L$	$a_n = \frac{Ld}{L}$
Remarks f_0 : Operating Frequency of Inverter T : Operating Period of Inverter		

각 모드에 대한 회로 상태방정식과 출력방정식을 정규화 파라메타를 도입하여 나타내면 다음 식과 같다.

$$\frac{dx}{dz} = A \cdot x + B \cdot u \quad Y = C \cdot x \quad (1)$$

여기서, $x = [i_d^* i_L^* V_c^*]^T$, $u = [100]^T$

<모드 1>

$$A1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4\pi\lambda}{\mu} & \frac{4\pi}{\mu} \\ 0 & -\frac{\pi}{\mu} & 0 \end{bmatrix} \quad B1 = 0 \quad C1 = [0 \ 0 \ 1]$$

<모드 2>

$$A2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{4\pi}{\mu \cdot a_n} \\ 0 & -\frac{4\pi\lambda}{\mu} & \frac{4\pi}{\mu} \\ \frac{\pi}{\mu} & -\frac{\pi}{\mu} & 0 \end{bmatrix} \quad B2 = \begin{bmatrix} \frac{4\pi}{\mu \cdot a_n} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C2 = C1$$

<모드 3>

$$A3 = A1 \quad B3 = B1 \quad C3 = C1$$

<모드 4>

$$A4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{4\pi}{\mu \cdot a_n} \\ 0 & -\frac{4\pi\lambda}{\mu} & \frac{4\pi}{\mu} \\ -\frac{\pi}{\mu} & -\frac{\pi}{\mu} & 0 \end{bmatrix} \quad B4 = B2 \quad C4 = C1$$

2.3 회로의 특성평가

제안한 인버터 회로의 특성평가는 앞의 식의 상태방정식을 Runge-Kutta수치 해석법에 의한 수치계산을 하였다. 그림 6은 리액터의 입력전류의 특성으로 그림에서 λ 가 클수록 φ 의 변화에 따라 리액터의 입력전류의 최대값이 점점 감소함을 볼 수 있으며 펄스폭이 180° 일 때는 0이다.

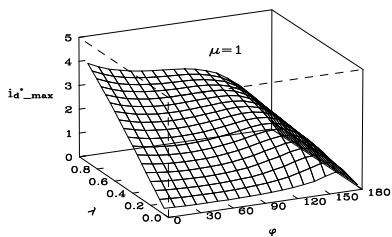


그림 6. 리액터의 입력전류

그림7은 인버터부의 출력전력으로 펄스폭 φ 는 $0^\circ \sim 180^\circ$ 까지 변화할 때 출력이 선형적으로 제어됨을 알 수 있다. λ 가 작은 값에서는 펄스폭의 크기에 따라 완만하게 감소하나 λ 가 큰 값에서는 펄스폭의 크기에 따라 급속하게 감소함을 볼 수 있다.

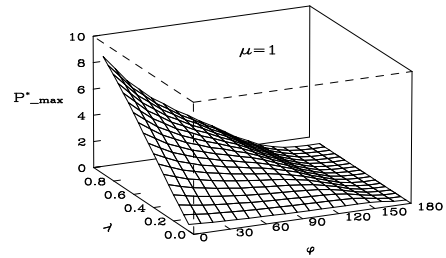


그림 7. 인버터의 출력특성

3. 실험결과 및 검토

실험에서 사용한 스위칭소자는 MOSFET(IRF450), 고속스위칭 다이오드(HER805)를 사용하였으며, 회로에 사용한 정수는 입력전원 50[V], 공진 주파수 50[kHz], L 1.05[μH], 커패시터 2.2[μH], 부하저항 0.03[Ω]으로 하였다. 그림 8은 펄스 폭 제어에 의한 스위칭 소자의 게이트 신호 파형을 나타낸다.

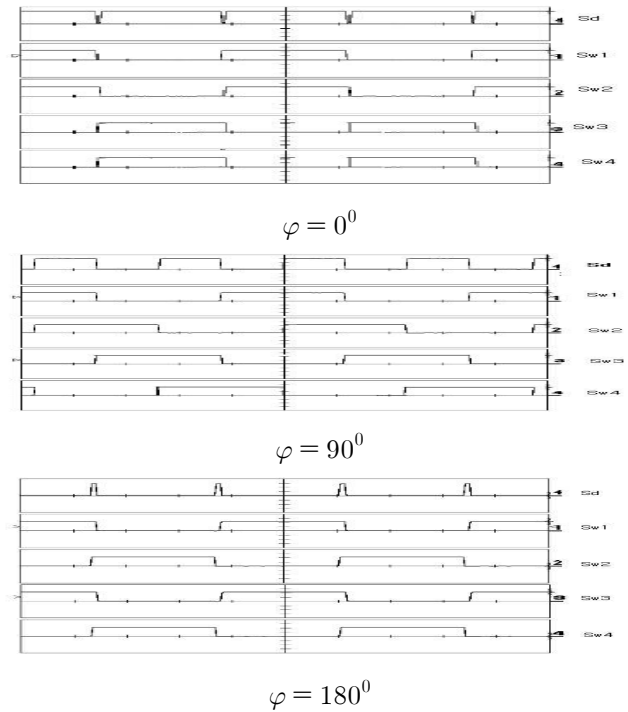


그림 8. 스위치의 게이트 신호파형

그림 9는 펄스폭 제어에 의한 인버터의 실험파형과 이론파형을 비교하기 위하여 나타내었다. 그림에서 좌는 실험파형이고 우는 이론파형으로 거의 일치함을 볼 수 있다.

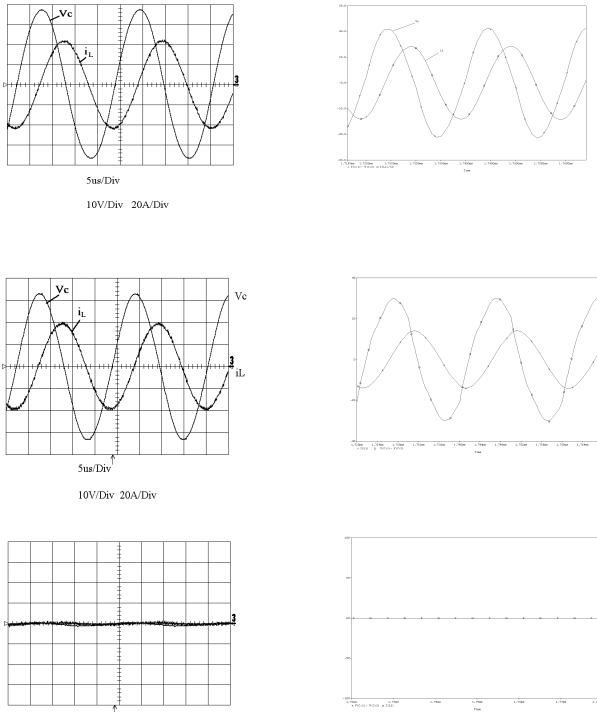


그림 9. 각부의 파형

4. 결론

본 연구에서는 공진 특성을 이용한 전류형 고주파 폴-브릿지 인버터를 제안하였으며, 인버터의 출력을 제어할 수 있는 스위칭 제어 방법을 제안하고 있다.

제안회로의 동작원리에 관하여 서술하였으며, 회로 설계시 기초자료로 사용되는 특성평가를 정규화 파라미터를 도입하여 나타내었다.

또한, 제안회로의 실용 가능성을 입증하기 위하여 파워 MOSFET를 사용하여 실제 장치를 제작하여 이론파형과 실험파형을 비교하였으며 그 특성이 일치함을 확인하였다. 실험결과 입력단의 초핑 스위칭 제어에 의해 선형적으로 출력이 제어됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] M.Yamamoto, "Latest Electromagnetic Induction based Fulid-Heating Equipment using High Frequency PWM load Resonant Inverter", PEDS97 Vol.1,p153~162.
- [2] J.M.Espi, E.J.Dede: "Features and Design of the Voltage-Fed L-LC Resonant Inverter for Induction Heating", PESC99, Vol.2, p1126~1131
- [3] Xing shing Zhou and Dan Cher, "Leading-edge Modulation Voltage-mode Control with Flux Unbalance Correction for Push-Pull Convertor.

"IEEE/APEC, Vol.1. pp.327~333, 2000

- [4] Patrick R. Palmer and Muhammad S. Abu Khaizaran, "The Series connection of IGBTs in a Current Source Inverter", PESC, Conference Proceedings, vol. 1, pp. 170~175. 2001