

부유 인덕턴스를 고려한 새로운 유도 가열용 부하 공진형 인버터

이병국* 유상봉 서범석 현동석
한양대학교 전기공학과

A New Load Resonant Inverter Topology Considering Stray Inductance Influences for Induction Heating

Byung-Kuk Lee*, Sang-Bong Yoo, Bum-Seok Suh and Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - An analysis of a new load resonant inverter considering stray inductance is given. There are several different types for load resonant inverters. They can offer zero turn-on as well as zero turn-off switching losses, yielding high efficiency at high power and high frequencies. However, they didn't consider the influences of stray inductance. In conventional topology using lossless snubber capacitor, stray inductances result in very high frequency resonant current. Especially, these influences can be problematic in high power system such as induction heating system with large current of some 10A associated with it. These currents increase EMI problem, give harmful effects in gate driver's operation and increase loss of dc-link capacitor as well as snubber capacitor. Therefore, the effect of stray inductances should be treated and reduced. This paper presents a new load resonant inverter topology, which can reduce the effect of stray inductances.

1. 서론

Class-D 직렬 부하 공진형 인버터는 스위치 양단 간의 전압이 입력 전압으로 구속 된다는 장점에 의해 고전압, 고주파 시스템에서 널리 사용되어 왔다[1,2]. 또한, 지금까지 턴-오프 시의 손실을 줄이고자 하는 여러 형태의 Class-D 인버터가 소개되었다[1,2]. 그러나, 지금까지 소개된 여러 Class-D 인버터는 시스템에 존재하는 부유 인덕턴스에 대한 고려를 하지 않았다. 부유 인덕턴스를 고려하게 되면 턴-오프 시에 스위치 양단 간에 썩지 전압이 인가되어 턴-오프 시 손실을 증가시키게 되며, 심각한 고주파 공진 전류가 발생하게 된다. 고주파 공진 현상은 큰 di/dt를 야기하므로 EMI문제를 심각하게 하며 게이트 드라이브에 간섭을 일으켜 안정적 동작을 방해하고 tan δ로 나타내어지는 커패시터의 손실각이 증가하여 유전체 손실과 발열의 원인이 된다. 또한 이러한 문제는 전류가 작은 저 출력의 시스템에서는 크게 문제되지 않으나 유도 가열 장치와 같은 큰 출력을 요구하는 시스템에서는 심각하게 될 수 있다. 그러므로, 시스템의 보다 안정한 동작과 고주파 노이즈를 감소시키기 위해서는 부유 인덕턴스에 대한 고려를 반드시 해야 하며 이에 대한 대책이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 지금까지 사용되어 온 Class-D 인버터에 대한 과도 상태 특성 고찰과 부유 인덕턴스가 시스템에 미치는 영향을 해석하여 부유 인덕턴스에 의한 고주파 공진 현상을 줄일 수 있는 새로운 회로를 제시하고 그 회로의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 기존의 Class-D 부하 공진형 인버터

회로 고찰을 위한 시스템 파라미터는 다음과 같다.
부하 $R=5\Omega$, $L=67mH$, $C=0.8\mu F$, 스너버 커패시터 $C_{F1}=C_{F2}=27nF$, 부유 인덕턴스 $L_S=0.1\mu H$, $L_{F1}=L_{F2}=0.5nH$, 특성 임피던스 $Z_0=9.15$, 양호도 $Q=1.83$, 공진 주파수 $f_0=22kHz$, 스위칭 주파수 $f_S=1.2f_0=26kHz$, 스위치 전압 상승/하강 시간=460ns, 스위치 전류의 하강 시간=100ns, 입력 전압=300V, 부하 전류=30A, 출력 전력 $P_R=2.5kW$.

2-1. 특성 고찰

그림 1은 기본적인 직렬 공진형 Class-D 인버터 회로를 나타내고 있다. 스위치는 MOSFETs, MCTs, SITs 등을 사용할 수가 있다. 이 회로는 턴-온 시에 손실이 없으나 턴-오프 시에는 큰 손실이 발생하게 되는 단점을 가지고 있다. 그림 3은 무손실의 턴-오프 스너버 커패시터를 사용한 회로를 보여 주고 있다. 그림 4는 한 개의 스너버 커패시터를 사용하여 그림 3과 같은 효과를 얻을 수 있는 회로이다[2]. 그러나 증, 방전시 커패시터로 흐르는 전류가 그림 3의 회로에 비해서 2배가 되므로 같은 전압 상승 시간을 갖기 위해서는 2배의 용량을 가진 커패시터를 사용해야 하는 것에 유의해야 한다. 그림 11에서는 위에 제시한 Class-D 인버터들의 출력 전압/전류 파형과 턴-온/오프 시의 스위치 전압/전류 파형을 보여 주고 있다.

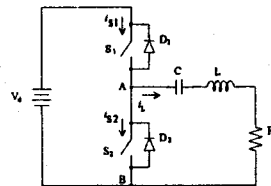


그림 1. 기존의 Class-D 부하 공진형 인버터

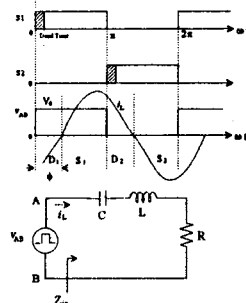


그림 2. 스위치 인가 신호 및 등가회로

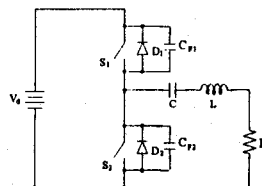


그림 3. 두 개의 턴 오프 스너버를 갖는 Class-D 부하 공진형 인버터

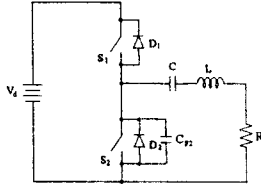


그림 4. 한 개의 턴 오프 스너버를 갖는 Class-D 부하 공진형 인버터

2-2. 부유 인덕턴스를 고려한 특성

그림 5은 그림 1의 회로에서 입력측의 부유 인덕턴스를 고려한 회로다. 부유 인덕턴스 L_S 에 의해 출력 전압에 과전압이 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 6은 그림 3의 회로에 입력 측의 부유 인덕턴스 L_S 와 스너버 커패시터 측에 존재하는 부유 인덕턴스 L_{F1}, L_{F2} 를 고려한 회로다. 인버터 입력 전류, D_1, D_2 , 그리고 C_{F1}, C_{F2} 에 심한 고주파 공진 전류가 나타남을 알 수 있다. 스위치 S_1 이 오프 할 때는 C_{F1} 이 충전하는 동안 4MHz의 고주파 공진 전류가 흐르고 충전이 끝난 뒤에는 3MHz의 고주파 공진 전류가 흐르게 된다. C_{F2} 의 경우에는 방전하는 동안 4MHz의 고주파 공진 전류가 흐르고 방전이 끝난 뒤에는 40MHz의 고주파 공진 전류가 흐르게 된다. 따라서 스위치 S_1 의 과도상태 시 C_{F1}, C_{F2}, D_2 에 고주파 공진 전류가 흐르게 되는 것이다. 그림 7은 그림 4에 부유 인덕턴스를 고려한 회로다. 이 회로에서도 과도상태 시 인버터 입력 전류, C_{F1}, C_{F2} 와 D_1, D_2 에 심한 공진 전류(S_1 의 오프시 40MHz, S_2 오프시 3MHz)가 흐르게 된다. 지금까지 검토한 회로에서 나타나는 고주파 공진 현상을 없애기 위해서는 공진을 감쇠시키는 감쇠 저항의 추가가 필수적이다. 그림 3과 4의 회로에 RCD스너버를 사용한 회로를 그림 8과 9에서 보여 주고있다. 그림 6, 7과 비교시 공진 현상이 많이 줄어든 것을 볼 수가 있다. 그러나, RCD스너버를 사용하는 경우에는 사용 소자의 증가와 감쇠 저항에 의한 손실이 야기된다. 따라서 공진 현상을 줄이기 위해서는 감쇠 저항 값의 증가가 요구되나 감쇠 저항에 의한 손실은 저항 값에 비례하여 증가하므로 감쇠 비의 설정에 매우 유념해야 한다. 그림 12에서 부유 인덕턴스를 고려한 회로들의 특성을 보여주고 있다.

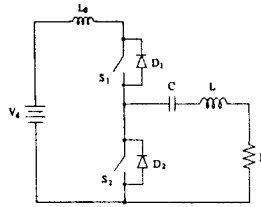


그림 5. 그림 1의 회로에 부유 인덕턴스를 고려한 회로

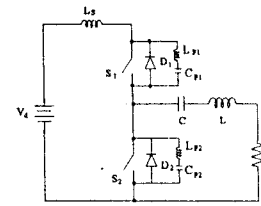


그림 6. 그림 3의 회로에 부유 인덕턴스를 고려한 회로

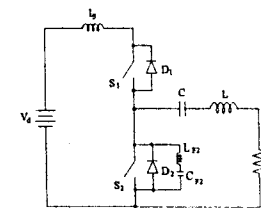


그림 7. 그림 4의 회로에 부유 인덕턴스를 고려한 회로

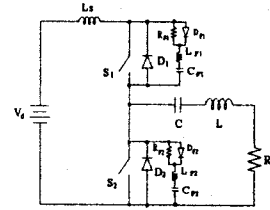


그림 8. 그림 3의 회로에 RCD스너버를 사용한 회로

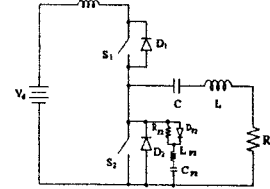


그림 9. 그림 4의 회로에 RCD스너버를 사용한 회로

2-3. 시스템 해석

위에서 제시한 Class-D 인버터 회로들은 스너버 커패시터 및 부유 인덕턴스의 크기가 매우 작아 공진 탱크의 입력 전압을 구형파로 모델링 할 수 있다. 따라서 동일한 출력 특성을 고려하여 스너버 커패시터 및 부유 인덕턴스의 영향을 무시한 해석을 한다 [2,3].

2-3-1. 회로 특성 해석에 사용되는 표준화 변수

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{공진 주파수 (1)}$$

$$\omega_n = \omega_s / \omega_0 \quad \text{스위칭 주파수 대 공진 주파수 비 (2)}$$

$$Z_0 = \sqrt{L/C} = 1/\omega_0 C = \omega_0 L \quad \text{특성 임피던스 (3)}$$

$$Q = \omega_0 L / R = 1/\omega_0 RC = Z_0 / R \quad \text{양호도 (4)}$$

2-3-2. 입력 임피던스의 크기 및 위상각

$$Z_{in} = R + j(\omega_n L - 1/\omega_n C) = R(1 + jQ(\omega_n - 1/\omega_n)) \quad (5)$$

$$|Z_{in}| = R\sqrt{1 + Q^2(\omega_n - 1/\omega_n)^2} \quad (6)$$

$$\Phi = \tan^{-1}(Q(\omega_n - 1/\omega_n)) \quad (7)$$

2-3-3. 입력 전압, 전류 및 부하 전류

입력 전압의 기본파는 다음과 같이 주어진다.

$$v_{AB1} = V_m \sin \alpha, \quad \text{at } 0 < \alpha \leq \pi$$

$$V_m = 2V_d / \pi \approx 0.637V_d \quad (8)$$

입력 전류 i_{in} 은 아래와 같이 정해진다.

$$i_{in} = I_m \sin(\alpha - \Phi) \quad \text{at } 0 < \alpha \leq \pi \quad (9)$$

입력 전류의 DC 성분은 다음과 같다.

$$I_{DC} = 2V_d / \pi^2 R(1 + Q^2(\omega_n - 1/\omega_n)^2) \quad (10)$$

직렬 공진 탱크를 흐르는 부하 전류는 아래의 식으로 정해진다.

$$i_L = I_m \sin(\alpha - \Phi)$$

$$I_m = V_m / |Z| = 2V_d / \pi R \sqrt{1 + Q^2(\omega_n - 1/\omega_n)^2} \quad (11)$$

2-3-4. 입력 전력 및 출력 전력

DC 입력 전력은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{DC} = I_{DC} V_d = 2V_d^2 / \pi^2 R(1 + Q^2(\omega_n - 1/\omega_n)^2) \quad (12)$$

또한, 출력 전력은 아래와 같다.

$$P_{out} = I_m^2 R / 2 = 2V_d^2 R / \pi^2 R^2 (1 + Q^2(\omega_n - 1/\omega_n)^2) \quad (13)$$

3. 새로운 Class-D 부하 공진형 인버터

기존의 Class-D 부하 공진형 인버터에서 부유 인덕턴스의 영향으로 인해 발생하는 문제를 해결할 수 있는 새로운 Class-D 부하 공진형 인버터 회로를 그림 10에 제시한다. 기존의 Class-D 부하 공진형 인버터 회로에 턴-오프 스너버 커패시터 C_F , 과전압 스너버 커패시터 C_{NF} 및 감쇠 저항 R_{NF1}, R_{NF2} 를 사용하였다.

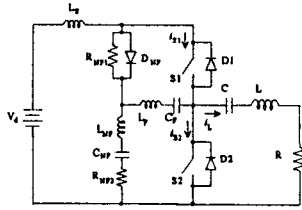


그림 10. 제한한 Class-D 부하 공진형 인버터

3-1. 동작설명

회로 고찰을 위한 시스템 파라미터는 다음과 같다.

$C_F=35nF$, $C_{NF}=1\mu F$, $R_{NF1}=0.1\Omega$, $R_{NF2}=1\Omega$, $L_S=0.1\mu H$, $L_F=0.5nH$, $L_{NF}=1nH$, 전압 상승 시간=600ns 이며 다른 파라미터들은 2절과 같은 조건을 가진다.

S_1 의 턴-오프 과도상태 시 고주파 공진 전류의 발생과 감쇠 경위는 다음과 같다. S_1 을 통해 흐르던 부하 전류가 S_1 이 오프가 되면 D_{NF} 를 통해 C_F 를 충전시키면서 흐른다. C_F 가 충전이 되면 L_S 에 유기된 에너지가 D_{NF} 를 통해 C_{NF} 로 들어온다. 부하 전류가 D_2 를 통해서 환류하고 있는 동안 C_F 와 C_{NF} 는 부유 인덕턴스에 의해 고주파 공진을 하게 된다. 만일, 감쇠 저항 R_{NF} 가 없으면 C_{F1} , C_{F2} , L_F , L_{NF} 의 공진에 의해 25MHz의 고주파 공진 전류가 흐르게 되나, R_{NF1} 과 R_{NF2} 로 인해 고주파 공진 전류는 신속히 감쇠하게 된다. S_2 의 경우에는 S_2 를 흐르고 있던 전류가 S_2 의 오프 시 C_F 를 방전시키면서 dc-link 단으로 흘러들어간다. 방전이 완료되면 부하 전류는 D_1 을 통해 환류하게 된다. L_S 의 전류가 부하 전류와 같아질 때 까지 부하 전류의 일부는 D_{NF} 를 통해 C_{NF} 에 들어오게 된다. 이 때부터 고주파 공진이 발생하게 된다. 만일 C_F 가 방전할 때 큰 전류가 R_{NF1} 과 L_S 를 통해 흐르게 하면, 부하 전류가 환류 할 때 L_S 전류가 이미 부하 전류와 거의 같게 되어 C_{NF} 로 전류가 들어오는 시간이 현저히 감소하게 되므로 고주파 공진이 일어나는 시간이 줄어들게 된다. 따라서 작은 저항값의 R_{NF1} 이 요구되고, 이것은 턴-오프 스너버가 무손실의 특성을 갖게한다. 또한, R_{NF1} 과 R_{NF2} 로 인해서 고주파 공진은 신속히 감쇠하게 된다.그림 13에서는 새로운 제시한 Class-D인버터의 출력 전압/전류, C_F , C_{NF} , D_1 , D_2 에 흐르는 전류 및 턴-온, 오프 시의 스위치 전압/전류를 보여 주고 있다. 기존의 Class-D인버터 회로들에서 나타났던 고주파 공진 전류가 없어진 것을 알수있다.

3-2. 시스템 파라미터 선정 기준

턴-오프 스너버 커패시터 C_F 의 값을 크게 할수록 스위치 오프 시 dv/dt 를 줄일 수 있다. 그러나, 너무 큰 값을 갖게 되면 공진 탱크에 영향을 미치게 되므로 유의해야 한다. 전압 상승 시간에 따라 커패시터의 충전 시간을 정한 뒤, 다음과 같은 식에 의해 커패시터 값을 정한다.

$$C_F = I_c / V_d = I_m \sin \Phi t_c / V_d = 2(\omega_n - 1/\omega_n)t_c / \pi Z_0 ((R/Z_0)^2 + (\omega_n - 1/\omega_n)^2)$$

Dead-Time선정시 유의해야 하는 사항은 스너버 커패시터의 충전 시간 보다는 길어야 한다는 것이다. 만일, 충전 시간 보다 짧게 되면 영 전압 스윗칭이 이루어지지 않게 된다. Dead-Time의 상한치와 하한치는 다음과 같이 주어진다.

$$t_c < t_{Dead-Time} < t_o$$

C_{NF} 의 경우 L_S 에 유기된 에너지를 감당해야 하므로 ΔV 를 정한 뒤,아래와 같이 크기를 정한다.

$$C_{NF} = L_S I_m^2 / \Delta V^2$$

R_{NF1} 와 R_{NF2} 의 선정시에 고려해야 할 새가지 사항은 다음과 같다. 첫째, R_{NF1} 의 선정시 턴-오프 스너버가 무 손실의 스너버 특성을 가질 수 있도록 한다. 둘째, C_{NF} 와 C_F 가 부유 인덕턴스와 공진을 할 때 고주파 공진 현상을 방지 하기 위해 감쇠 저항으로서의 역할을 할 수 있는 값으로 정해야 한다. 셋째, C_{NF} 가 스윗칭의 반 주기내에 완전히 방전을 할 수 있는 시정수를 갖도록 저항값을 정한다.

4. 결론

기존의 Class-D 부하 공진형 인버터에서 나타날 수 있는 부유 인덕턴스의 영향을 고려하여 고주파 공진 전류를 없애는 새로운 Class-D 부하 공진형 인버터를 제안하였고 회로의 특성에 대해서 고찰 하였다. 부유 인덕턴스는 인버터 Class-D 부하 공진형 인버터에 심각한 영향을 준다. 따라서, 부유 인덕턴스에 의한 고주파 공진 전류를 없애는 새로운 Class-D인버터 구조는 유도 가열 장치와 같은 큰 출력을 요구하는 시스템에 적합할 것으로 전망된다.

5. 참고문헌

- [1] M.K.Kazimierczuk, "Class-D Voltage-Switching MOSFET Power Amplifier," IEE Proc., vol.138, No. 6, Nov.,1991.
- [2] M.K.Kazimierczuk et al., "Class-D Zero-Voltage-Switching Inverter with only One Shunt Capacitor," IEE Proc., vol. 139, No. 5, Sept., 1992.
- [3] L.Grajales et. al., "Design of a 10KW, 500kHz Phase-Shift Controlled Series-Resonant Inverter for Induction Heating," IEEE IAS Conf. Rec., pp843-849, 1993.

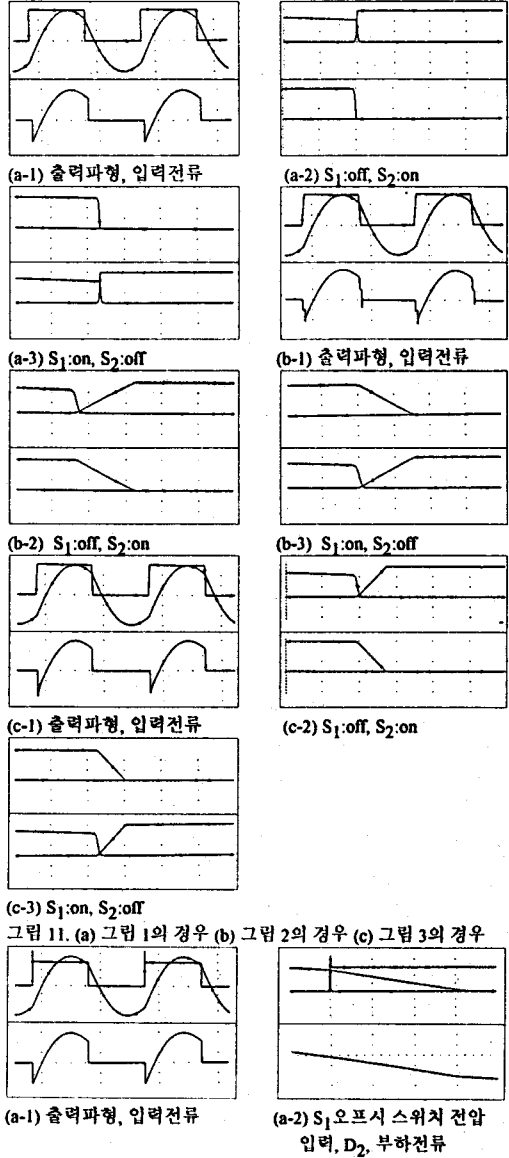
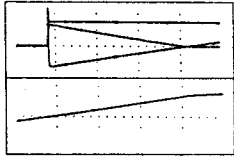
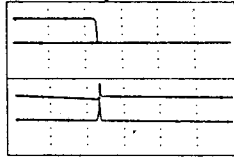


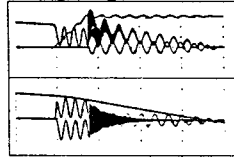
그림 11. (a) 그림 1의 경우 (b) 그림 2의 경우 (c) 그림 3의 경우



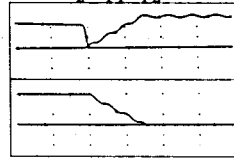
(a-3) S_2 오프시 스위치 전압
입력, D_1 , 부하전류



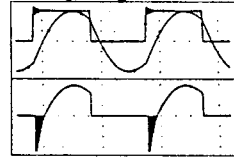
(a-5) S_1 :on, S_2 :off



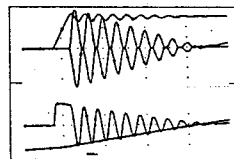
(b-2) S_1 오프시 스위치 전압
입력, D_2 , C_{F1} , C_{F2} , 부하전류



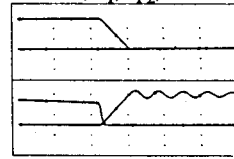
(b-4) S_1 :off, S_2 :on



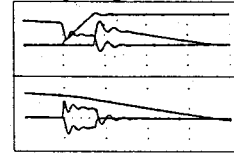
(c-1) 출력파형, 입력전류



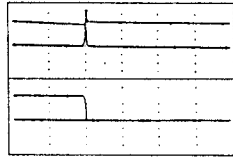
(c-3) S_2 오프시 스위치 전압
입력, D_1 , C_{F2} , 부하전류



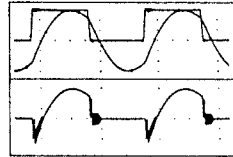
(c-5) S_1 :on, S_2 :off



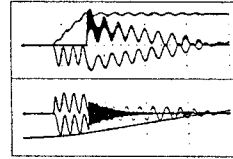
(d-2) S_1 오프시 스위치 전압
입력, D_2 , C_{F1} , C_{F2} , 부하전류



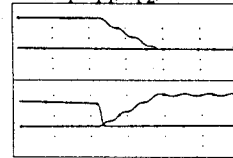
(a-4) S_1 :off, S_2 :on



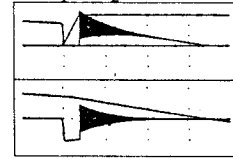
(b-1) 출력파형, 입력전류



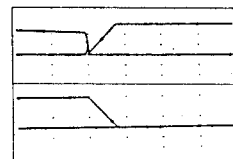
(b-3) S_2 오프시 스위치 전압
입력, D_1 , C_{F1} , C_{F2} , 부하전류



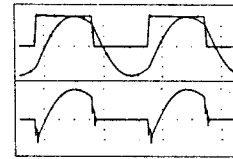
(b-5) S_1 :on, S_2 :off



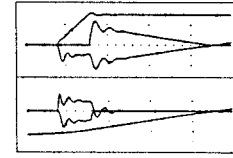
(c-2) S_1 오프시 스위치 전압
입력, D_2 , C_{F2} , 부하전류



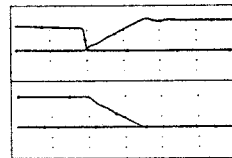
(c-4) S_1 :off, S_2 :on



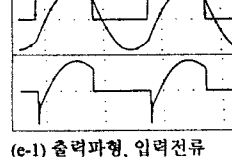
(d-1) 출력파형, 입력전류



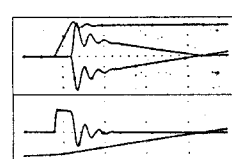
(d-3) S_2 오프시 스위치 전압
입력, D_1 , C_{F1} , C_{F2} , 부하전류



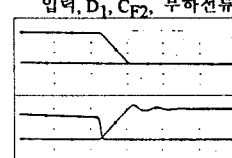
(d-4) S_1 :off, S_2 :on



(e-1) 출력파형, 입력전류

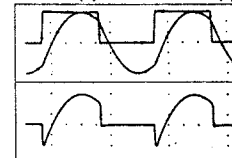


(e-3) S_2 오프시 스위치 전압
입력, D_1 , C_{F2} , 부하전류

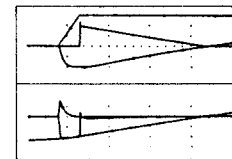


(e-5) S_1 :on, S_2 :off

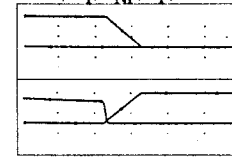
그림 12. (a) 그림 5의 경우 (b) 그림 6의 경우 (c) 그림 7의 경우
(d) 그림 8의 경우 (e) 그림 9의 경우



(a) 출력파형, 입력전류

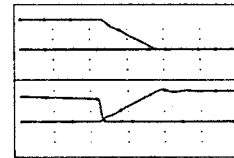


(c) S_2 오프시 스위치 전압
입력, D_1 , C_{NE} , C_F , 부하전류

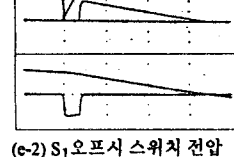


(e) S_1 :on, S_2 :off

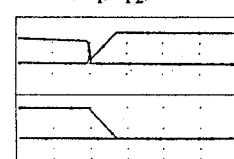
그림 13. 세로이 제사한 Class-D 부하공진형 인버터의 경우



(d-5) S_1 :on, S_2 :off



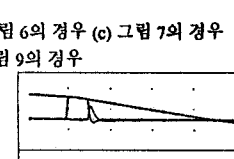
(e-2) S_1 오프시 스위치 전압
입력, D_1 , C_{F2} , 부하전류



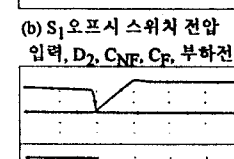
(e-4) S_1 :off, S_2 :on



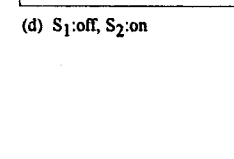
(e-5) S_1 :on, S_2 :off



(b) S_1 오프시 스위치 전압
입력, D_2 , C_{NE} , C_F , 부하전류



(d) S_1 :off, S_2 :on



(d) S_1 :off, S_2 :on