

부하 환류모드를 제공하는 새로운 반 브리지 인버터의 손실해석

연재율  
한양대학교 메카트로닉스 공학과

조규민  
유한대학 정보통신과

김희준  
한양대학교 전자 컴퓨터 공학부

Loss analysis for the novel half bridge inverter with load free-wheeling mode

Jae-Eul, Yeon  
Dept' of Mechatronics Engineering  
Hanyang Univ.

Kyu-Min, Cho  
Dept' of Information and Communication  
Engineering  
Yuhan College

Hee-Jun, Kim  
School of Electrical Engineering  
& Computer Science  
Hanyang Univ.

**Abstract** - The resonant inverter is widely used for induction heating, electronic ballast and supersonic motor driving circuit. In the meantime, control techniques of PWM, PFM etc.. are mainly applied to control the output power of the resonant inverter. But, in the case of using the half bridge resonant inverter, it is difficult to control the output power by PWM, because its main circuit does not provide the load free-wheeling mode. Therefore, PAM or PFM was usually applied to control output power of half bridge resonant inverter. However, PAM needs a variable DC voltage source, which makes the system structure more complex. On the other hand, in case of PFM, efficiency is declined by operation with poor power factor. This paper proposed the novel half bridge resonant inverter which can provide the load free-wheeling mode. Also its analysis results for PWM operation with unity fundamental power factor are presented and compared with other resonant inverters using PWM and PFM.

1. 서 론

공진형 인버터를 적용하는 시스템에서 인버터 출력단은 공진을 위해 삼입한 공진 소자 및 부하의 변동으로 인해 등가 고유 공진 주파수가 변동하게 된다. 펄스폭 변조방식의 공진형 인버터에서 부하의 고유 공진 주파수가 변동하게 될 경우 공진전류의 왜곡률이 증가하여 결국 부하측 역률을 감소시키는 원인으로 작용하게 된다. 따라서 부하측 고유 공진 주파수를 추종하여 고효율의 운전유를 유지하기 위해서는 펄스 주파수 변조방식이 도입되어야 한다. 또한, 공진형 반 브리지 인버터의 경우 두개의 스위치가 교대로 온, 오프되기 때문에 풀 브리지 인버터와 비교할 때 절반의 스위칭 손실만 발생하지만 주회로의 구성상 부하 환류모드를 제공할 수 없기 때문에 부하측 인가전압과 공진전류는 동 위상을 갖을 수 없기 때문에 기본파 역률은 항상 1 이하이다. 반면 풀 브리지 공진형 인버터의 경우에는 부하 환류모드가 제공되므로 이론적으로 기본파 역률을 1로 만들 수 있기 때문에 전체 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 그러나 매 순간마다 두개의 스위치가 온 상태이어야 하므로 스위칭 손실은 반 브리지 인버터의 두 배가 되어야 한다.<sup>[1]-[4]</sup>

본 연구에서는 부하 환류모드를 제공하는 반 브리지 인버터를 제안하였다. 제안된 반 브리지 공진형 인버터는 반 브리지 형태이면서도 네 개의 스위칭 소자가 필요한 것과 두 개의 전압원을 필요로 하는 단점을 가지

고 있다. 그러나 기존의 위상변위 풀 브리지 공진형 인버터의 장점인 부하 환류모드를 제공함으로써 출력단의 기본파 역률을 1로 운전시킬 수 있다. 또한 통상의 반 브리지 컨버터와 마찬가지로 매 순간 오직 하나의 스위칭 소자만이 도통되어 스위칭 손실을 줄일 수 있는 장점을 갖는다.

본 논문에서는 부하 변동에 따른 스위칭 소자에서의 전도 손실 및 스위칭 손실의 해석을 토대로 제안된 인버터가 나타나는 효율 특성을 타 방식의 공진형 인버터와 비교 고찰하였다.

2. 새로운 반 브리지 공진형 인버터

공진형 인버터 시스템에 있어서 출력전압의 기본파와 공진전류의 기본파 간의 위상차 및 공진전류의 왜곡은 전체 시스템의 전력전달 효율, 즉 역률을 저하시키는 큰 요인으로 작용하며 이는 아래의 식을 통해 명확히 알 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$I_T = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (1)$$

$$PF = \frac{V I_1 \cos\phi_1}{V I_T} = \frac{I_1 \cos\phi_1}{I_T} \quad (2)$$

여기서,  $I_T$ 는 공진전류의 실효값이며,  $\cos\phi_1$ 은 출력전압과 공진전류간의 위상차이다. 식 (1) 및 식 (2)를 통해 알 수 있듯이, 공진형 인버터의 이용에 있어서 높은 전력 변환효율을 얻기 위해서는 출력전압과 공진전류의 기본파간의 위상차를 0으로 하는 것과 더불어 공진전류의 왜곡을 최소화하는 것이 바람직하다.

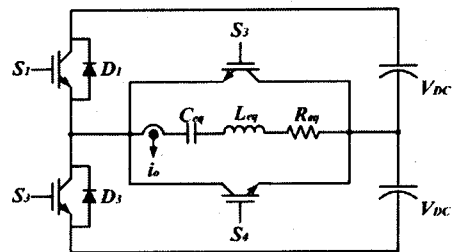


그림 1 제안된 인버터의 주회로

그림 1은 제안된 새로운 형태의 반 브리지 공진형 인버터의 주 회로를 나타낸다. 이는 통상의 반 브리지 인버터에 부하 환류모드를 제공할 수 있도록 하기 위하여 공진 소자를 포함한 부하단에 환류 모드용 스위칭 소자  $S_3$ 과  $S_4$ 를 부가하고 부하 고유 공진주파수를 추종하여 공진전류의 정 가운데에서 스위칭 신호가 발생할 수 있

도록 하기 위해 공진 전류검출기를 추가한 형태이다.

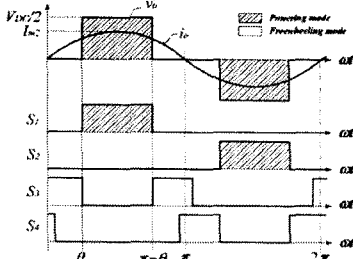


그림 2. 제안된 인버터의 스위칭 신호패턴

제안된 인버터의 스위칭 신호 패턴을 그림 2에 나타내었다. 주 스위치  $S_1, S_2$ 는 통상의 반 브리지 인버터와 마찬가지로 부하에 전력을 공급하는 파워링 모드를 제공하지만, 주 스위치가 오프된 구간동안은 공진전류의 극성에 따라서 스위치  $S_3$  또는  $S_4$ 를 도통시킴으로써 부하 환류모드를 구성할 수 있고 이 구간동안 출력전압은 0이 된다. 이는 결과적으로 출력전압과 공진전류간의 위상차 발생을 방지하는 역할을 하게 되므로 기본파 역률을 1로 만들 수 있다.

### 2.1.1 제안된 인버터의 출력특성

제안된 공진형 인버터의 출력전류의 반주기를 샘플링 구간  $T_s$ 라 하고, 시비율에 해당하는 반주기 동안의 전압 출력구간을  $T_d$ 라고 하면 시비율  $D$ 는 다음과 같다.

$$D = \frac{T_d}{T_s} \quad (3)$$

출력전압을 푸리에 급수로 전개하여 출력전압의 실효치와 기본파분의 크기를 구하면 다음과 같다.

$$V_o = V_{DC} \sqrt{D} \quad (4)$$

$$V_{o1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{DC} \sin \frac{D}{2} \pi \quad (5)$$

또한, 공진부하의 출력전류  $i_o$ 를 완전한 정현파라고 가정할 경우 PWM 시비율에 따른 출력전류의 실효치  $I_o$  및 출력 전력  $P_o$ 는 각각 식 (6)과 식 (7)로 표현된다.

$$I_o = \frac{2\sqrt{2}}{\pi R_{eq}} V_{DC} \sin \frac{D}{2} \pi \quad (6)$$

$$P_o = \frac{8}{\pi^2 R_{eq}} V_{DC}^2 \sin^2 \frac{D}{2} \pi \quad (7)$$

출력의 기본파 역률은 1로 제어되지만, 전압파형이 구형파이므로 이를 고려한 종합역률은 1보다 작을 수 밖에 없다. 식 (3)-(7)을 이용하여 인버터 출력단의 종합역률 및 고조파 함유율을 구하면 다음과 같다.

$$PF = \frac{P_o}{V_o I_o} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{D}\pi} \sin \frac{D}{2} \pi \quad (8)$$

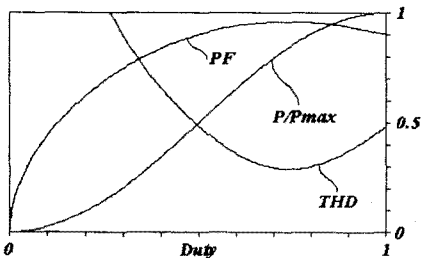


그림 3. PWM 시비율에 따른 출력특성

$$THD = \sqrt{\frac{D\pi^2}{4(1 - \cos D\pi)} - 1} \quad (9)$$

위 식들을 종합해 PWM에 의한 출력전력, 역률 및 THD의 관계를 살펴보면 그림 3과 같이 나타난다. 그림 3을 통해 제안된 인버터의 경우 0.5 이상의 시비율에서 매우 높은 역률을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

### 2.1.2 제안된 인버터의 스위치 손실특성

제안된 인버터는 통상의 반 브리지 인버터에서와 같이 매 순간 오직 하나의 스위치 소자만이 도통된다. 따라서 전도 손실측면에서 볼 때 매 순간 두개의 스위치 소자가 도통되는 풀 브리지 인버터의 절반에 해당하며, 공진전류를 추종하는 스위칭 신호패턴을 통한 부하 환류모드의 제공은 기본파 역률을 1로 만들 수 있기 때문에 대부분의 동작 영역에서 출력전압과 공진전류간의 위상차를 갖고 있는 통상의 반 브리지 공진형 인버터보다 낮은 전도손실을 기대할 수 있다. 그러나 제안된 인버터는 턴 온 및 턴 오프 순간 모두 하드 스위칭이 이루어지고 따라서 스위칭 손실 측면에서 고려해보면 스위칭 주파수가 높아질수록 불리해진다.

공진형 인버터에 있어서 스위치 손실은 공진전류의 반주기 구간동안 발생하는 손실의 총합을 구하면 알 수 있다. 제안된 인버터의 공진전류의 반주기동안의 전도손실 및 스위칭 손실을 계산하기 위해 공진전류의 반주기를 구간별로 나눈 그림을 그림 4에 나타내었다.

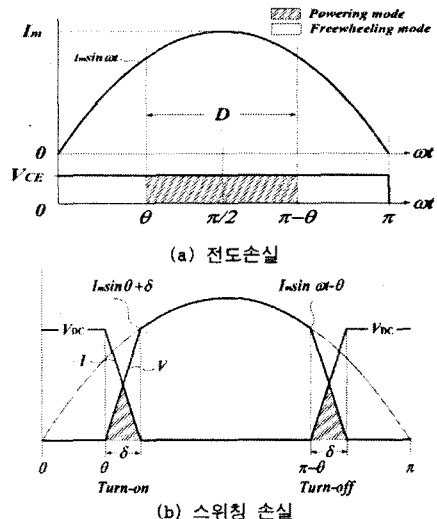


그림 4. 제안된 인버터의 스위치 손실

그림 4(a)에서 제안된 인버터의 각 스위치간의 데드타임은 무시하고 스위칭 신호는 이상적이라고 가정한다. 그림 4(a)로부터 동일한 조건에서 타 방식의 공진형 인버터들의 스위치 손실 비교를 위해 출력전력을 구하면 다음과 같다.

$$P_{out} = \frac{2V_{DC}I_m \cos \theta}{\pi} = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot R \quad (10)$$

위 식으로부터 공진전류의 최대값  $I_m$ 은

$$I_m = \frac{4V_{DC}I_m \cos \theta}{\pi R} \quad (11)$$

이다.

또한, 제안된 인버터의 스위치 전도손실을 구하면 다음과 같다.

$$P_{CI} = \frac{2V_{CE}I_m}{\pi} \quad (12)$$

그림 4(b)에서 턴 온 및 턴 오프 구간동안 스위칭 전압  $V$ 와 공진전류  $I$ 를 구하면 각각 다음과 같이 구해진다.

$$V = V_{DC} \left\{ 1 - \frac{1}{\delta} (wt) \right\} \quad (13)$$

$$I = \frac{I_m \sin \theta + \delta}{\delta} (wt) \quad (14)$$

따라서, 공진전류 반주기 동안의 스위칭 손실

$$P_{SI} = \left( \frac{V_{DC} I_m \sin \theta + \delta}{3} \right) \delta \quad (15)$$

가 되며, 식(14)와 식(15)로부터 공진전류 반주기동안의 스위칭 손실의 총합은 다음과 같이 구해진다.

$$P_T = \frac{2V_{CE}I_m}{\pi} + \left( \frac{V_{DC}I_m \sin \theta + \delta}{3} \right) \delta \quad (16)$$

### 3. 통상의 공진형 인버터의 스위칭 손실

#### 3.1 위상변위 F/B 공진형 인버터의 스위칭 손실특성

위상변위 풀 브리지 공진형 인버터는 매 순간 두개의 스위치가 항상 도통 상태를 유지하며 전력전달모드에서 두개의 스위치 모두 채널을 통해 전류가 흐르게 되며 부하 환류모드에서는 두 개의 스위치중 하나의 스위치의 채널과 나머지 하나의 스위치 내장 다이오드를 통해 전류가 흐르게 되며, 턴 온 시에는 영전압 스위칭이 이루어지고 턴 오프 시에는 하드 스위칭이 이루어진다. 그림 5는 위상변위 풀 브리지 공진형 인버터의 공진전류 반주기동안의 스위치 도통 상태를 나타낸다.

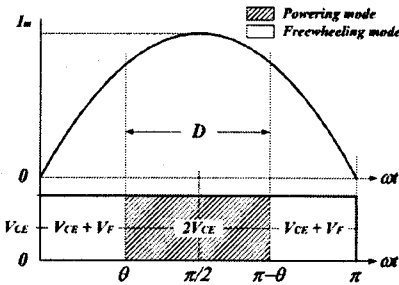


그림 5. 위상변위 F/B 인버터의 전도손실 구간

그림 5를 토대로 위상변위 풀 브리지 인버터의 공진전류 반주기 동안의 전도손실을 구하면 다음과 같다.

$$P_{C2} = \frac{2I_m}{\pi} \{ V_{CE}(1 + \cos \theta) + V_F(1 - \cos \theta) \} \quad (17)$$

위상변위 풀 브리지 인버터에서 스위칭 손실은 턴 오프 시에만 발생하므로 스위칭 손실은

$$P_{S2} = \frac{V_{DC} I_m \sin \theta}{6} \delta \quad (18)$$

가 되고 따라서, 전체 스위칭 손실은 다음과 같다.

$$P_{T2} = \frac{2I_m}{\pi} \{ V_{CE}(1 + \cos \theta) + V_F(1 - \cos \theta) \} + \left( \frac{V_{DC} I_m \sin \theta}{6} \right) \delta \quad (19)$$

#### 3.2 하프 브리지 공진형 인버터의 스위칭 손실특성

하프 브리지 공진형 인버터는 주파수 변조법을 통해 출력을 제어한다. 따라서, 공진전류의 불연속모드를 방지하기 위해서는 스위칭 주파수를 항상 고유 부하 공진 주파수 보다 높거나 같게 만들어야 한다. 이 경우 스위치의 턴 온 시 영전압 스위칭을 확보할 수 있으나, 스위칭 주파수가 공진 주파수에 비해 지나치게 높을 경우 공진전류의 왜곡이 증가하므로 전체적인 효율이 낮아질 우려가 있다. 더욱이 부하 환류 모드가 존재하지 않기 때문에 출력전압과 공진전류간의 위상차로 인한 효율저하가 더욱 증가할 우려가 있다.

반 브리지 공진형 인버터의 출력전력은 다음과 같다.

$$P_{out} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{DC} I_m \cos \phi \quad (20)$$

스위칭 시비율이 1이고 인버터 출력전압과 공진전류의 위상차가 0이라고 가정하면 반 브리지 공진형 인버터의 출력은 최대가 되고 이때의 공진전류는 다른 방식의 공진형 인버터의 공진전류 값과 같다고 할 수 있다. 따라서, 제안된 인버터의 최대출력시의 공진전류값을 대입하면 반 브리지 공진형 인버터의 출력에 따른 스위칭 손실을 계산할 수 있다.

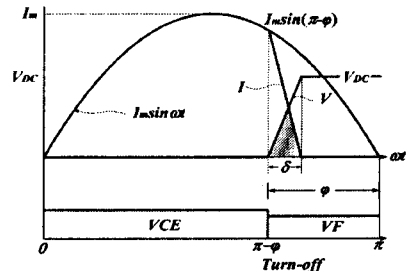


그림 6. 반 브리지 공진형 인버터의 스위칭 손실특성

그림 6은 반 브리지 공진형 인버터의 공진전류 반주기 동안의 스위칭 손실특성을 보여준다. 스위칭 소자는 턴 온 시 영전압 스위칭이 이루어지므로 스위칭 손실은 턴 오프 시에만 발생하며 공진전류의 반주기 동안 전도손실의 출력전압과 공진전류의 위상차에 해당하는  $\phi$  구간동안 내장 다이오드가 도통되고 나머지 구간은 스위치의 채널이 도통된다. 그림 6을 참고하여 반 브리지 공진형 인버터의 전도손실을 구하면

$$P_{C3} = \frac{I_m}{\pi} \{ V_{CE}(1 + \cos \phi) + V_F(1 - \cos \phi) \} \quad (21)$$

이며, 스위칭 손실은

$$P_{S3} = \frac{V_{DC} I_m \sin(\pi - \phi)}{6} \delta \quad (22)$$

이다. 식(21)과 식(22)로부터 전체 스위칭 손실은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{T3} = \frac{I_m}{\pi} \{ V_{CE}(1 + \cos \phi) + V_F(1 - \cos \phi) \} + \left( \frac{V_{DC} I_m \sin(\pi - \phi)}{6} \right) \delta \quad (23)$$

#### 4. 손실특성 비교

제안된 반 브리지 공진형 인버터의 스위칭 손실특성 및 효율특성에 대한 컴퓨터 모의 실험결과에 대하여 고찰하기로 한다. 모의실험에 적용된 주요정수는 다음과 같다.

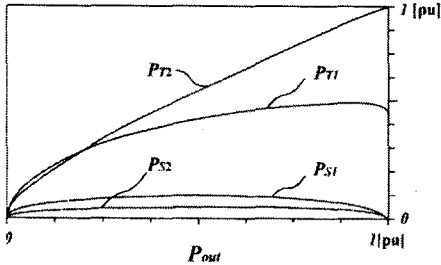
- 1) 스위칭 주파수  $f_s$  : 30[kHz]
- 2) 입력전압 : 직류 100[V]

- 3) 등가 부하저항 :  $10[\Omega]$
- 4) 스위치 소자의 지연시간  $\Delta T : 100[nsec]$
- 5) 지연각  $\delta = 2\pi f_s \Delta T$
- 6)  $V_{CE} : 2.2[V]$
- 7)  $V_F : 1.0[V]$

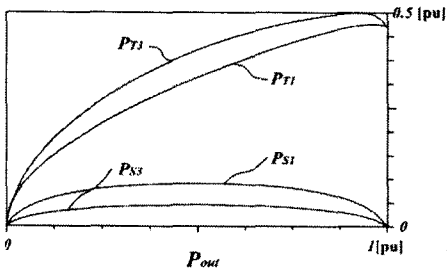
그림 7은 제안된 반 브리지 공진형 인버터와 통상의 위상변위 풀 브리지 공진형 인버터와 반 브리지 공진형 인버터의 스위칭 손실특성에 대하여 컴퓨터 모의실험을 실시한 결과로써 그림 7(a)는 제안된 반 브리지 공진형 인버터의 스위칭 손실이 위상변위 풀 브리지 공진형 인버터의 약 2배에 해당되지만, 전도손실을 감안한 전체 스위칭 손실의 측면에서는 1/2정도임을 보여준다.

이는 매우 높은 스위칭 주파수를 요하지 않을 경우, 매 순간 두개의 스위치 소자가 도통되어야 하는 풀 브리지 형태의 인버터에 비해 제안된 반 브리지 공진형 인버터가 스위칭 손실을 저감할 수 있음으로 보여준다.

반면, 그림 7(b)는 통상의 반 브리지 공진형 인버터와 제안된 인버터의 스위칭 손실을 보여주는 것으로써 제안된 인버터의 전체 스위칭 손실이 통상의 반 브리지 공진형 인버터보다 다소 높게 나타남을 보여준다. 이는 제안된 인버터의 스위칭 동작이 턴 온, 턴 오프 모두 하드 스위칭으로 이루어지기 때문이다. 그러나 통상의 반 브리지 공진형 인버터의 경우, 부하 환류 모드를 제공할 수 없다. 이것은 스위칭 손실을 저감할 수 있다는 장점에 반해 부하측 역률이 저하된다는 큰 결점을 갖게 된다는 것을 알려줌과 동시에 단순히 스위치의 손실만으로도 인버터의 효율을 결정할 수 없다는 것을 의미한다.



(a) 제안된 인버터와 위상변위 F/B 인버터의 스위칭 손실특성



(b) 제안된 인버터와 통상의 H/B 인버터의 스위칭 손실특성  
그림 7. 스위칭 손실 특성비교

따라서, 공진형 인버터의 방식별 효율특성을 고찰해 볼 필요가 있다. 그림 8은 공진형 인버터의 방식별 효율을 컴퓨터 모의실험을 통해 관찰한 결과이다. 앞서 살펴본 전체 스위칭 손실의 경우, 통상의 반 브리지 인버터 방식이 가장 낮은 손실특성을 나타내었으나, 반 브리지 공진형 인버터는 출력전압과 공진전류간의 위상각으로 출력전력을 제어하는 PFM 방식임으로 최대 출력이 아닌 구간에서의 전체적인 전압 전달 효율은 매우 낮게 관찰되었다. 반면, 위상변위 풀 브리지 방식과 제안된 인버터 방식의 경우 PWM 방식을 사용하므로 두 방식 모두 이론적으로 출력전압과 공진전류간의 위상차는 발생하지 않는다. 즉, 기본과 역률은 1이 된다. 따라서, 위

상변위 풀 브리지 공진형 인버터와 제안된 인버터 모두 전체적인 전압 전달효율은 전 범위 구간동안 매우 양호하게 나타나지만, 풀 브리지 방식의 인버터와 비교해 절반의 전도손실만을 갖는 제안된 인버터가 효율면에서 가장 우수하게 관찰되었다.

모의실험의 결과, 일반적으로 수십 kHz 대역의 스위칭 주파수를 사용하는 공진형 인버터에 있어서 제안된 인버터 방식이 대용량 부하에 적합하다는 것을 확인할 수 있다.

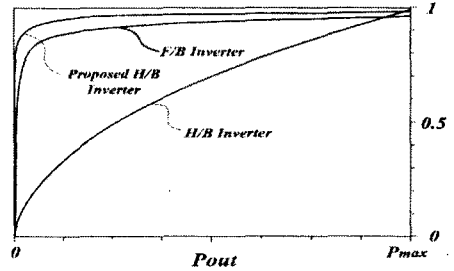


그림 8. 효율특성

## 5. 결 론

본 논문에서는 부하 환류모드를 제공하기위해 제안된 새로운 반 브리지 공진형 인버터의 전체 스위칭 손실을 해석하여 타 방식의 공진형 인버터의 전체 스위칭 손실과 비교 고찰하였고 컴퓨터 모의실험 결과로 제안된 인버터의 우수성을 검증하였다. 제안된 새로운 반 브리지 인버터는 하프 브리지 인버터와 같이 두 개의 전압원을 필요로 한다는 것과 스위치 소자의 개수가 풀 브리지 인버터와 같이 네 개를 필요로 한다는 단점을 갖고 있지만, 동작 시 매 순간 도통되는 스위치 소자는 오직 한 개이므로 도통손실을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 반 브리지 공진형 인버터에서는 적용할 수 없었던 PWM 기법을 적용할 수 있게 함으로써 고역율 운전이 가능해지고 따라서, 전체적인 시스템 효율향상을 기대할 수 있다. 특히 저압 대전류 응용분야에 제안된 반 브리지 공진형 인버터가 매우 유용할 것으로 판단된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] J. M. Alonso et al., "A Novel Low-Loss Clamped-Mode LCC Resonant Inverter for HID Lamp Supply," IEEE-PESC Conf. Rec., pp. 736-742, 1995.
- [2] L. Grajales et al., "Design of a 10kW, 500kHz Phase-Shifted Controlled Series-Resonant Inverter for Induction Heating," IEEE-IAS Conf. Rec., Vol.2, pp.843-849, 1993.
- [3] S.P. Wang et al., "Soft-Switched PWM High-Frequency Load-Resonant Inverter with Power Factor Correction for Induction Heating Cooking Appliance," EPE Conf. Rec., Vol. 2, pp. 244-249, 1997.
- [4] S. Furuya et al., "Load-Adaptive Frequency Tracking Control Implementation of Two-Phase Resonant Inverter for Ultrasonic Motor," IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 7, No. 3, pp. 542-550, July 1992.