

새로운 유도가열용 소프트 스위칭 고주파 인버터

김칠용^{*} 문상필^{*} 김영문^{*} 김해재^{*} 류재엽^{**} 김수욱^{***}
 마산대학^{*} 한국폴리텍[®]창원대학^{**} 한국폴리텍[®]부산대학^{***}

Soft Switching High Frequency Inverter for New Induction Heating

C. Y. Kim^{*} S. P. Mun^{*} M. Y. Kim^{*} H. J. Kim^{*} J. Y. Lyu^{**} S. W. Kim^{***}

Masan College^{*} Changwon College of Korea Polytechnic^{**} Busan College of Korea Polytechnic^{***}

Abstract - This research presented the new zero-current switching pulse width modulation SEPP(Single Ended Push-Pull)high frequency inverter for solving the problem of the zero-current SEPP high frequency inverter circuit which is using widely in the practical application of an induction heating apparatus, the soft switching operation and power control are impossible when the lowest power supply in the zero-current switching pulse width modulation SEPP high frequency inverter. The inverter circuit which is attempted by on-off operation of a switch has the reduction effect of the power loss due to a soft switching and a high frequency switching. And it confirmed that the power regulation is possible continuously from 0.25[kW] until 2.84[kW] in the case the duty rate(D) changes from 0.08 to 0.3 under zero-current switching operating by a dissymmetry pulse width modulating control and the power conversion efficiency comes true the efficiency of 95[%]. Due to the result above, the ZCS PWM SEPP high frequency inverter will be effective as sources of an induction heating apparatus.

소프트 스위칭 동작 영역의 확대와 저전력 영역에서의 고전력변환 효율화를 실현하고자 한다. 이러한 모든 사항의 바탕으로 제시한 인버터 회로의 유도가열(IH) 조리기용으로서의 유효성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 증명하고자 한다.

1. 서 론

2. 시도한 유도가열용 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터

최근에 IGBTs, 전력용 MOSFETs, MCTs, SITs, SITHs 등과 같은 전력용 반도체 소자의 평장한 장점과 함께 이들 전력용 반도체 소자를 사용한 고주파 공진 시스템의 연구와 개발에 많은 관심을 갖고 있다.

유도가열(IH : Induction Heating)은 패러데이(Faraday)의 전자유도현상을 이용한 금속의 가열 방법의 일종이다. 금속과 같은 도체에 코일을 감고, 이 코일에 고주파 전류를 흘려주면 패러데이에 의해 밝혀진 전자유도 작용에 의해서 도체의 내부에는 유기 기전력(EMF : Electro Motive Force)이 발생하게 되고, 이 유기기전력에 의해 도체의 내부에는 와전류(Eddy Current)가 발생하게 된다. 도체 내부를 흐르는 와전류는 표면부의 저항에 의해서 와전류 손실이 발생하게 되고 이 손실은 줄(Joule)의 법칙에 의해 열에너지로 변환하게 된다. 그림 1에 나타나는 것처럼 몇 번 감은 코일 속에 금속 막대를 넣어 이 코일에 교번전류(진동전류)를 통했다고 하면 이 금속 막대 속에는 자속이 생긴다.

부하공진 고주파 인버터와 반공진 컨버터등 전력시스템의 다양한 기술의 발전에 따라 유도 가열 전원용 고주파 공진 인버터는 단조, 성형, 풀림, 표면경화, 용접, 용해 등의 산업현장에서 폭넓게 응용되고 있다. 물체를 전기적으로 가열하는 방법은 저항 가열, 아크 가열, 빔 가열, 고주파 유도가열이 있다. 그중에서 고주파 가열의 응용분야에 일반적으로 사용되는 유도가열 장치는 고주파 하프브리지 인버터 회로로 필요시 스위칭 소자의 내압이 작으며, 영전압 턴-온 스위칭 동작이 가능하다는 장점을 지니고 있을 뿐만 아니라 대용량으로서의 확장이 용이하여 유도가열 시스템에 많이 사용되고 있다.

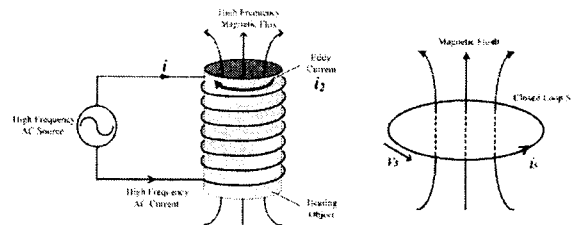


그림 1 고주파 유도가열의 원리

본 연구에서는 이러한 기술적 배경으로 새로운 유도 가열용 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터를 제작, 설계하여 열 기체를 발생시키는 소형의 간접 유도가열 시스템에 대하여 서술하고자 한다. 그리고 전자 유도 가열 기술의 특징, 유도 가열 부하의 등가 전기 회로 모델과 부하 파라미터의 측정 방법에 관하여 서술하고자 한다. 또한, 기존의 ZVS PWM SEPP 고주파 인버터와 비교하여

만일 이 금속체가 쇠와 같은 자성체일 것 같으면 그 자속은 전류의 교번(진동)에 대해서 히스테리시스 루프를 그린다. 이 루프가 둘러싸는 면적이 클수록 히스테리시스 손실(Hysteresis Loss)이 큰 것으로서 이 손실은 Steienmetz에 의해 실험적으로 구해져 식 (1)과 같은 값으로 된다.

$$P_h = \eta f B_m^{1.6} V \quad [W] \quad (1)$$

단, η : 히스테리시스 상수, f : 주파수[Hz]

B_m : 최대자속밀도[T/m], V : 철심체적[m³]

히스테리시스 η 는 자성체의 재질에 따라 다른 것으로, 통상(보통)의 변압기의 경우에는 규소강판과 같이 η 가 작은 재질을 선택할 필요가 있으나, 유도 가열의 경우에는 도리어 η 가 큰 편이 가열하기 쉽다. 그러나 피 가열체가 철과 같은 자성체라도 일반적으로 유도가열 때는 피 가열체가 변압기처럼 폐자로를 만들지 않는 편(쪽)이 많고, 자속밀도도 (1[T/m]=10,000 가우스)정도로 매우 크므로, 실효 투자율을 작고, η 도 작다. 또, 상용 주파수가 수 10[kHz]이상으로 높아지면, 주파수의 2제곱에 비례해서 증가하는 와전류손 쪽이 훨씬 크게 되므로, 히스테리시스 손은 거의 무시해도 지장 없다. 이러한 도체내에는 전자유도 작용에 의하여 코일내에 있는 금속은 변압기의 2차 권선에 기전력이 발생하는 것과 그림 1과 같이 유도 전류가 발생하여 와전류(Eddy Current)가 흐르게 되며, 이 와전류는 그림 2와 같이 금속체의 횡단면 각부에 균일하게 흐르는 것이 아니고, 식 (2)에 표시하는 바와 같이 금속의 표면에 집중적으로 흐르게 되며, 내부로 갈수록 지수 함수적으로 감소한다.

$$I_x = I_0 \epsilon^{-\left(\frac{x}{p}\right)} \left(\frac{x}{p}\right) \quad (2)$$

여기서, I_x : 표면에서 중심으로 향해서 x [m]점의 전류의 값 [A], I_0 : 원통형 금속체의 표면의 전류값[A], p : 전류값이 표면의 $1/\epsilon$ 로 감소하는 깊이[m] (ϵ 는 자연대수의 값)

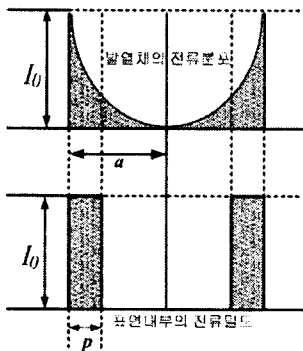


그림 2 와전류의 분포

이 와전류가 임의의 저항을 가진 도체내를 흐르면 그 도체내에 주울열이 발생하며, 이것을 와전류 손실(Eddy Current Loss)이라 하며, 식 (3)과 같다.

$$P_e = \frac{8\pi^5 \cdot a^4 \cdot f^2 \cdot \mu_r^2 \cdot n^2 \cdot I^2}{\rho} \times 10^{-14} [W/m] \quad (3)$$

여기서, a : 철심의 반지름[m], f : 주파수[Hz],
 μ_r : 재료의 비투자율[H/m], ρ : 저항률[Ω /m],
 n : 코일의 턴-수[turn수/m], I : 전류[A]

식 (2)의 p 는 고주파 전류의 침투 깊이라고 해서 식 (4)에 표시하는 바와 같이 재료의 비투자율 μ_r 나 저항률(고유저항) ρ [Ω /m], 주파수 f [Hz]에 의해서 정해지는 것이다.

$$p = \frac{\sqrt{\rho \times 10^7}}{2\pi \sqrt{\mu_r f}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} [m] \quad (4)$$

여기서, ρ : 고유저항, f : 주파수, μ_r : 비투자율(보통=1로 함)

식 (4)에서 고유저항 ρ 를 [$\mu\Omega \cdot cm$]단위로 환산하면 식 (5)와 같다.

$$p = 5.033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} [cm] \quad (5)$$

그림 3은 일반적인 SEPP형 고주파 공진 인버터의 스위칭 S2양단에 병렬로 커패시터(C_2)를 연결하여 전압이 영(0)이 되는 시점에서 스위칭 동작 즉, ZVS 기법을 도입한 SEPP형 고주파 공진 인버터의 주회로 구성을 나타낸 것이다.

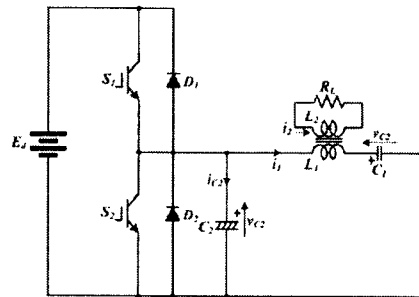


그림 3 ZVS를 이용한 SEPP형 고주파 공진 인버터

그림 3에서 스위칭 소자(S_1, S_2)는 자기소호형 소자라면 어떤 것이나 가능하며, 다이오드(D_1, D_2)는 회로 운전 특성상 나타나는 무효전류를 흘려주기 위한 통로로 사용되고 있다. 부하로는 유도 가열부하를 모델로 하고 있으며, 회로 구성은 워킹 코일의 1차측 인덕턴스 L_1 과 공진용 커패시터 C_1 이 연결되어 있고, 스위칭(S_2)소자양단에 ZVS용 커패시터 C_2 를 연결한 회로가 구성되어 있다. 또한, L_1 과 부하의 인덕턴스 L_2 와의 상호유도에 의한 누설 인덕턴스 분을 공진용 인덕턴스로 사용하고 있다. 그림 4는 각 부 전압과 전류의 파형을 나타낸 것이며, 스위칭 주파수(f_{sw})가 공진 주파수(f_r)보다 큰 경우에만 동작이 가능하고, 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 작은 경우에는 동작이 불가능하다.

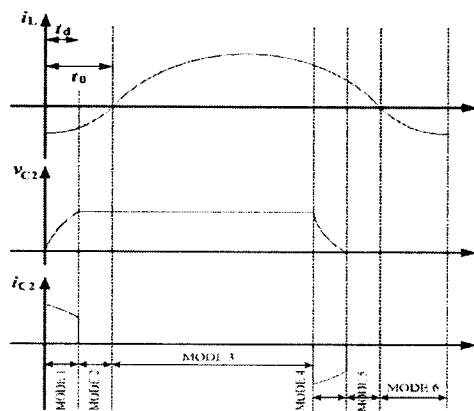


그림 4 각 부의 전압과 전류 파형($f_r < f_{sw}$)

그리고, 역회복시간 동안 다이오드 전압은 부(-)전압에서 정(+) 전압으로 증가하고, 다이오드 전류와 전압은 동시에 높아져 높은 역회복 전력손실의 원인이 되기도 한다. 이 인버터의 스위칭 동작에 따른 모드 분류는 표 1과 같다.

표 1. 동작 모드

MODE	S1	S2	D1	D2	Remarks	Total Mode
1	OFF	OFF	OFF	OFF	C ₂ : 방전기간	Mode A
2	OFF	OFF	ON	OFF	-	Mode B
3	ON	OFF	OFF	OFF	-	Mode B
4	OFF	OFF	OFF	OFF	C ₂ : 충전기간	Mode A
5	OFF	OFF	OFF	ON	-	Mode C
6	OFF	ON	OFF	OFF	-	Mode C

2.1 회로구성 및 동작원리

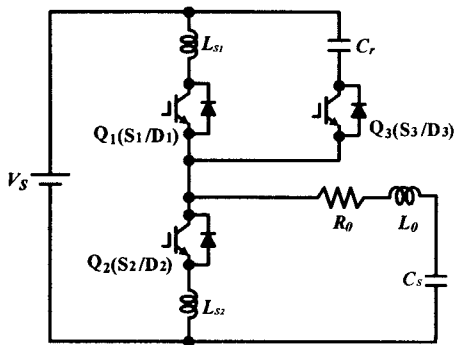


그림 5 일반적인 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터

그림 5는 현재 가장 널리 IH 조리가용에 사용되어지는 ZCS SEPP 고주파 인버터의 회로를 나타낸 것이다. 그림 5의 회로는 스위치Q1(S1/D1)과 Q2(S2/D2), ZCS 인덕터 L_{S1}, 유도 가열(IH)부하, 역률 보상 커패시터C_S로 구성되며, 전력 공급 모드 시간이 보조 부분 공진 주기이하로 설정할 수 없기 때문에 최저 전력 공급 모드 시간이 커져 출력이 0.5[kW] 이하에서는 소프트 스위칭 동작과 전력 제어가 불가능한 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 그림 6과 같이 새로운 ZCS PWM SEPP고주파 인버터를 제시하였다. 제시한 회로는 일반적인 ZCS SEPP 고주파 인버터의 상측 스위치에 병렬로 보조 다이오드D_r와 보조 스위치 Q3(S3/D3), 보조 공진 인덕터L_r, 보조 공진 커패시터C_r로 구성되는 액티브 보조 공진 스너버 회로를 추가한 구조이다. 주 스위치S1에 흐르는 전류가 역병렬 다이오드로 강제적으로 흘러 보조 공진 인덕터L_r과 보조 공진 커패시터C_r에 의해 독립적으로 보조 부분 공진을 일으키기 때문에 ZVS & ZCS 턴-오프 동작을 실현한다. 즉, 임의의 시점에서 상측에 주 스위치S1은 ZCS 턴-오프가 가능하기 때문에 인버터 회로는 정주파 비대칭 PWM 제어가 가능하다고 할 수 있다.

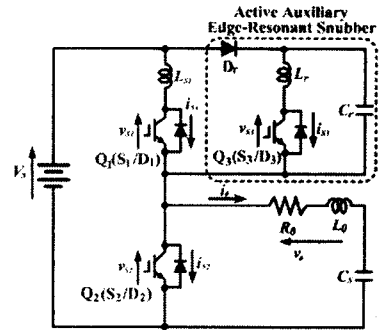


그림 6 시도한 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터

시도한 인버터 회로는 그림 7과 같이 비대칭 PWM 게이트 펄스 순서로 IH 부하에 출력된 고주파 교류 전력을 제어하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이 한 주기T동안 주 스위치S1의 온 시간(TON1)을 인가하면 전력은 연속적으로 제어되며, 보조 스위치S3의 온 시간(TON3)을 인가하면 전력은 일정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 주 스위치와 보조 스위치를 동시점에서 턴-오프시켜 IH 부하의 전력을 연속적으로 제어하기 위하여 PWM 방식의 전력 제어변수인 듀티율을 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$D = \frac{T_{Om} + T_{d1}}{T} \quad (6)$$

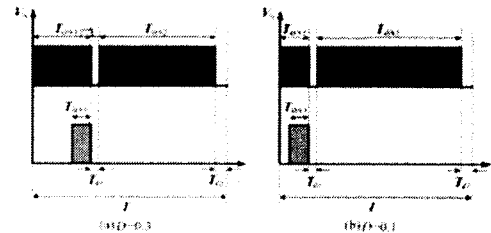


그림 7 일정 주파수 비대칭 PWM 게이트 펄스 순서

표 3. 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로 정수

직류 입력전압(VDC)	282.8[V]	
스위칭 주파수(fsw)	20[kHz]	
ZCS 인덕터(L _{S1})	5.6[μH]	
보조 공진 인덕터(L _r)	2.3[μH]	
보조공진 커패시터(C _r)	90[μF]	
역률보상커패시터(C _S)	1.0[μF]	
유도가열 (Induction Heating)	부하저항 (R ₀)	1.8[Ω]
	부하인덕터 (L ₀)	48[μH]
Model Type	Q1, Q2	CM75DU-24F (MITSUBISHI)
	Q3	CM75DU-12F (MITSUBISHI)

표 3은 시도한 회로의 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로 정수를 나타낸 것이다. 그림 8은 그림 7의 게이트 펄스 패턴으로 동작되어지는 시도한 고주파 인버터 회로의 동작 모드 천이와 각 동작 모드의 등가회로를 나타낸 것이며, 각 동작 모드에 대한 해석은 다음과 같다.

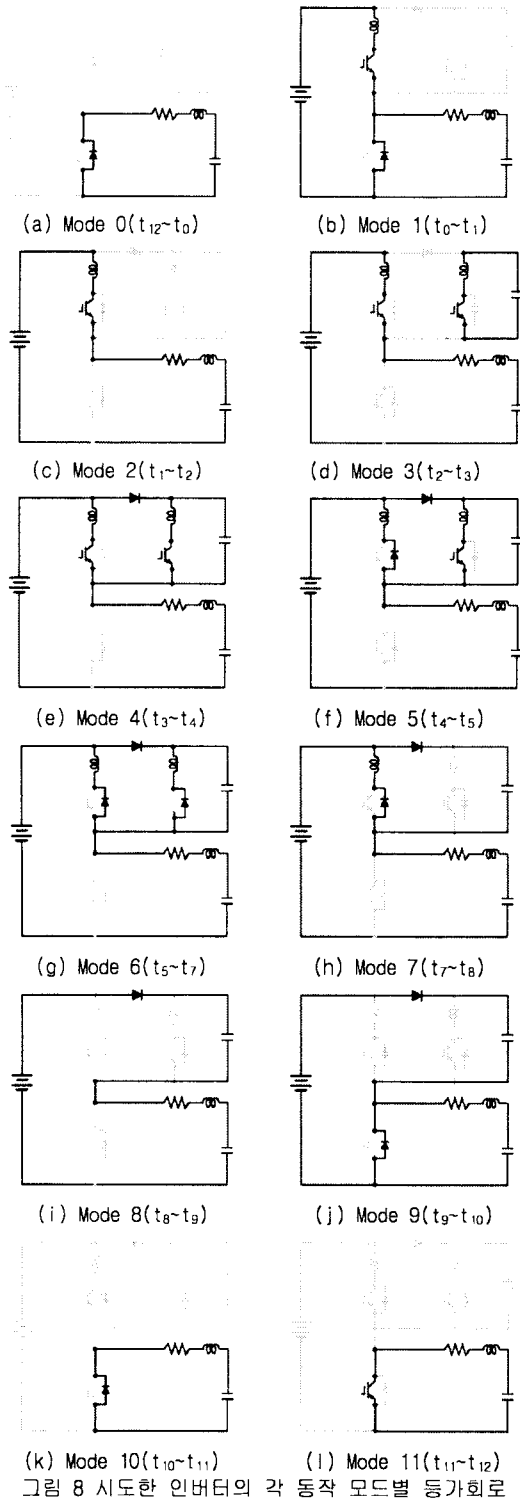


그림 8 시도한 인버터의 각 동작 모드별 등가회로

그림 9는 듀티율(D)이 0.3일 때의 각 부 전압과 전류의 파형을 나타낸 것이며, 그림 10은 스위치S1의 턴-오프 동작 기간($t_2 \sim t_{11}$)의 각 부 파형 나타 낸 것이다.

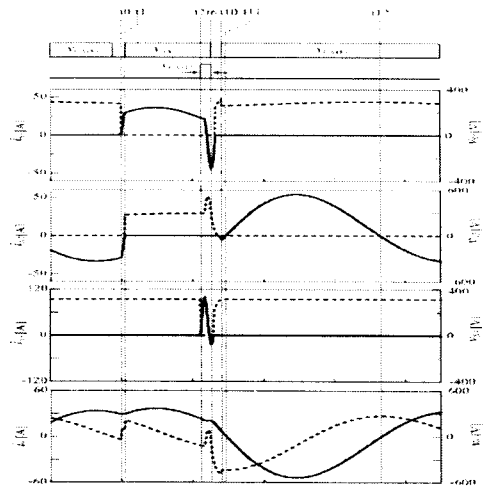


그림 9 시도한 인버터의 각 부 전압과 전류의 시뮬레이션 파형(D=0.3)

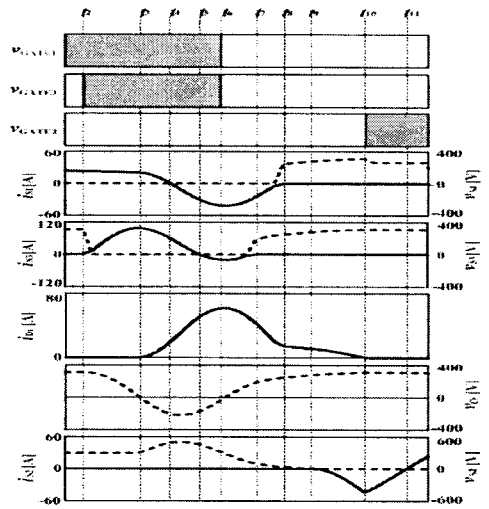
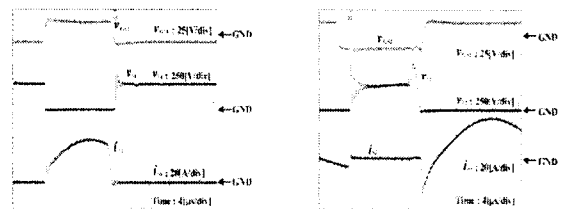


그림 10 $t_2 \sim t_{11}$ 구간의 각 부 전압과 전류 파형

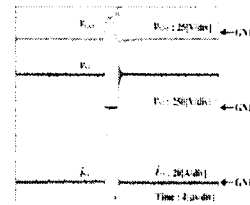
2.2 실험 결과 및 고찰

그림 11과 그림 12는 듀티율의 변화에 따른 시도한 인버터 회로의 각 부 전압과 전류의 파형을 나타낸 것이다.

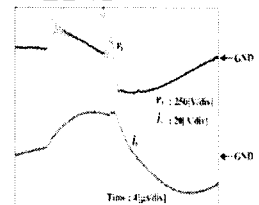


(a)스위치Q₁의 전압과 전류 실험파형

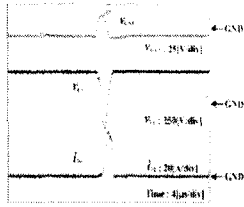
(b)스위치Q₂의 전압과 전류 실험파형



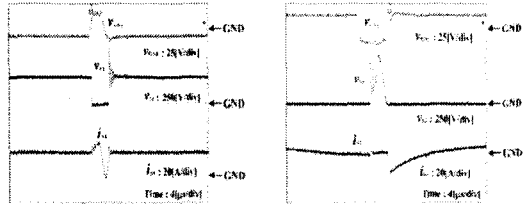
(c)스위치Q₃의 전압과 전류 실험파형



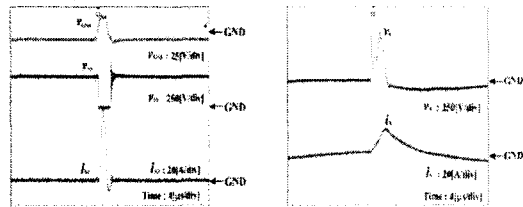
(d)부하의 전압과 전류 실험파형



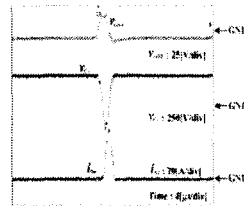
(e) C₁과 D₁의 전압과 전류 실험파형
 그림 11 각부의 전압과 전류 실험파형(듀티율(D)=0.3인 경우)



(a) 스위치 Q₁의 전압과 전류 실험파형 (b) 스위치 Q₂의 전압과 전류 실험파형



(c) 스위치 Q₃의 전압과 전류 실험파형 (d) IH부하의 전압과 전류 실험파형



(e) C₁과 D₁의 전압과 전류 실험파형
 그림 12 각부의 전압과 전류 실험파형(듀티율(D)=0.08인 경우)

그림 13은 시도한 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터의 듀티율에 따른 실측 입·출력 전력 특성을 나타낸 것이다. 그림 31에서 알 수 있듯이 시도한 고주파 인버터는 비대칭 PWM 제어에 의해 ZCS 동작하에서 듀티율 D를 0.08에서 0.3으로 변화시킬 경우에 전력은 0.25[kW]에서 2.84[kW]까지 연속적으로 조절이 가능하다. 즉, 시도한 인버터 회로는 IH 조리기 응용에 있어 약한 불로부터 화력이 센 불까지 폭넓게 연속적으로 전력 제어할 수 있다는 것을 확인하였다.

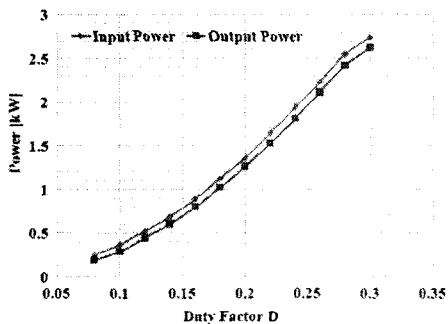


그림 13 듀티율에 따른 실측 압출력 전력 특성

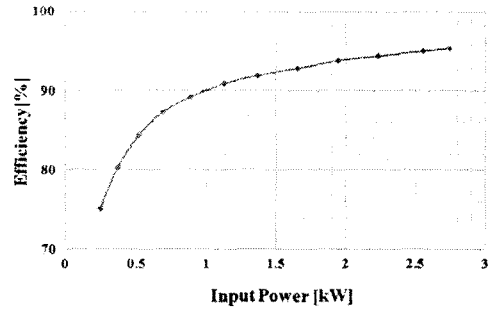


그림 14 입력 특성에 따른 효율

그림 14는 시도한 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터의 전력변환 효율특성을 나타낸 것이다. 그림 14의 전력변환 효율특성을 보면, 최대 전력 2.84 [kW]에서는 95[%]의 고효율이 실현되지만 저전력인 경우에는 효율이 다소 저하되는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 저전력에서는 듀티율과 무관하게 보조 스위치가 일정 동작하기 때문에 액티브 보조 공진 스너버 회로의 고정 손실이 시스템 전체의 전력에 비해 커지기 때문이다.

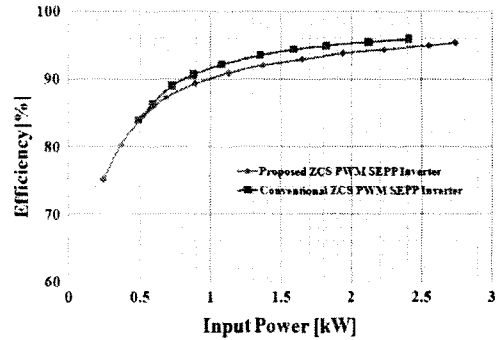


그림 15 입력전력에 대한 효율 특성

그림 15은 시도한 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터와 기존의 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터의 입력전력에 대한 효율 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 15에서 알 수 있듯이 기존 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터는 전력 공급 모드 시간을 보조 부분 공진 주기 이하로 설정할 수 없기 때문에 최저 전력 공급 모드 시간이 커지며, 전력을 0.5[kW]이하로 할 경우에는 소프트 스위칭 동작이 불가능하게 되는 단점이 있다. 이에 반해 시도한 고주파 인버터는 액티브 보조 공진스너버 회로만으로 보조 부분 공진 주기를 결정할 수 있기 때문에 최저 전력 공급 모드 시간을 작게 할 수 있다. 그리고 비대칭 PWM 방식을 이용하여 일정한 주파수로 연속적으로 제어가 가능하기 때문에 IH 조리기 응용에 있어 전체 전력영역인 0.25[kW]까지 소프트 스위칭 동작이 가능하며, IH 부하에 고효율 고주파 전력을 공급할 수 있어 가장 최적의 IH 조리기 응용 전력변환장치라 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 현재 가장 널리 IH 조리기응용에 사용되는 ZCS SEPP 고주파 인버터의 회로에서 발생되

는 문제점인 최저 전력공급에서 소프트 스위칭 동작과 전력 제어가 불가능한 문제점을 해결하기 위해서 새로운 ZCS PWM SEPP고주파 인버터를 제시하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 스위치의 온-오프동작에 의해서 시도한 인버터 회로는 전 동작 영역에 있어서 소프트 스위칭화와 고주파 스위칭에 의한 전력 손실의 저감 효과를 가지는 것을 확인하였다.
- (2) 시도한 고주파 인버터는 비대칭 PWM 제어에 의해 ZCS 동작하에서 듀티율D 0.08 에서 0.3으로 변화시킬 경우에 전력은 0.25[kW]에서 2.84[kW]까지 연속적으로 조정이 가능하다.
- (3) 시도한 ZCS PWM SEPP 고주파 인버터의 전력변환 효율특성은 최대 전력 2.84[kW]에서는 95[%]의 고효율이 실현되지만 저전력인 경우에는 효율이 다소 저하되는 것을 확인하였다.
- (4) 시도한 고주파 인버터는 액티브 보조 공진 스너버 회로만으로 보조 부분 공진 주기를 결정할 수 있기 때문에 최저 전력 공급 모드 시간을 작게 할 수 있다.
- (5) 비대칭 PWM 방식을 이용하여 일정한 주파수로 연속적으로 제어가 가능하기 때문에 IH 조리기 응용에 있어 전체 전력영역인 0.25[kW]까지 소프트 스위칭 동작이 가능한 것을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 麻生 眞司, 古越 隆一, '電流共振型(SMZ方式)電源', サンケン技報, Vol.26, No.1, pp.11-22, 1993
- [2] 横山 伸明, '通信機用共振型スイッチング電源', サンケン技報, Vol.27, No.1, pp.64-69, 1994
- [3] H. S. Choi, B. H. Cho, 'Novel Zero Current Switching (ZCS) PWM Switch Cell Minimizing Additional Conduction Loss', KIEE International Transactions in EMECS, Vol.12B, pp.37-43, 2002
- [4] 通商産業省資源エネルギー廳公益事業部, '家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン', 1999
- [5] O. H. Hayakawa, Nakaoka. N, 'New multi-resonant induction heating high-frequency inverter with voltage-clamped zero current switching using newly developed bipolar mode static induction, IEE CONFERENCE PUBLICATION, Vol.377, No.3, 1993
- [6] H. Oka, H. Fujita, K. Seki, 'Composition and Heating Efficiency of Magnetic Wood by Induction Heating', IEEE transactions on magnetics, Vol.36 No.5/1, 2000
- [7] 신대철, 김용주, 권혁민, "DPH(Dual Packs Heating : 전자유도가열)시스템의 기술 및 응용," 전기산업, 제14권, 제7호, pp.25-45, 2003.