

전자레인지용 LLC 공진형 인버터의 기동 제어

강계룡¹, 김흥근[†], 차헌녕²

Start-up Control of LLC Resonant Inverter for Microwave Oven Application

Kyelyong Kang¹, Heung-Geun Kim[†], and Honnyong Cha²

Abstract

One of the most critical part for magnetron driving in microwave oven is start-up control. For this, switching frequency of resonant inverter should be carefully controlled in order to supply sufficient power to the filament of the magnetron and to prevent rectifier diode from destruction caused by the excessive voltage across them. This paper proposes a novel start-up control strategy for LLC resonant inverter for microwave oven considering the non-oscillation mode time and the magnetron voltage during the start-up process. The validity of the proposed method is verified through the experiment with 1,200W microwave oven using LLC resonant inverter.

Key words: High frequency transformer, LLC resonant inverter, Magnetron, Start-up control

1. 서 론

최근 인버터를 이용한 전자레인지용 마그네트론 제어 기술은 높은 효율, 빠른 가열 속도, 넓은 출력 제어 범위 등의 장점으로 기존의 성층 철심형 고전압 변압기(HVT:High Voltage Transformer)를 사용한 전력 변환 장치에서 빠르게 대체되어 가고 있다^{[1]-[8]}. 특히 LLC 공진형 인버터를 이용한 방식은 고주파 변압기(HFT:High Frequency Transformer)의 누설 인덕턴스를 이용하여 승강압이 가능하므로 고전압 변압기의 권선 수를 줄이고, 전 영역에서 영전압 스위칭(ZVS:Zero Voltage Switching) 동작이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 마그네트론 발진 모드에서는 부하에 따라 전압 이득이 변하고, 비발진 모드에서는 고주파수 변압기의 기생 커패시턴스의 영향으로 다 공진 특성이 있어 제어가 어렵다는 단점이 있다.

마그네트론은 캐소드의 필라멘트에 흐르는 전류에 의해 가열된 전자가 열전자 방사 현상에 의해 방출되므로,

열전자가 충분히 방출되는 필라멘트 동작 온도 1900~2100K까지 온도 상승을 위한 비발진 모드 구간이 존재한다. 이 구간은 애노드측의 전류가 흐르지 않는 무부하 상태이고, 캐소드의 필라멘트측은 10A 이상의 전류가 흐르는 상태가 되므로 마그네트론 양단 전압(v_{AK})이 상승하게 되고, 기동 제어가 되지 않는 경우 고압 다이오드의 정격 전압을 넘어 과전압에 의한 부품 소손이 발생할 수 있다. 또, 비발진 모드에서 발진 모드로 전환 시 마그네트론은 전자 방출이 불안정한 상태이므로 PFM(Pulse Frequency Modulation) 전류 제어를 하는 경우 전자 방출 상태에 따라 궤환되는 출력 정보가 변동되어 과전류가 흐를 수 있다.

기존의 전자레인지용 LLC 공진형 인버터의 기동 제어는 고주파수 변압기의 기생 커패시턴스의 영향으로 발생하는 다 공진을 고려하여 마그네트론 양단 전압이 최저/최고인 주파수를 실험적으로 찾고, 최저 주파수 영역에서 기동시간을 고려하여 구동하는 방식을 사용하였다^[9]. 그러나 이 방식은 인도와 같은 입력전압의 변동 범위(150~300V_{rms})가 넓은 환경에서는 기동 시간 단축과 고압 다이오드의 과전압 방지를 동시에 만족시키기 어렵다.

본 논문에서는 마그네트론 제어를 위한 LLC 공진형 하프 브리지 인버터의 새로운 기동 제어 방법을 제안한다. 제안한 기동 제어 방식은 입력 전압과 제어 주파수에 따른 마그네트론의 다 공진 특성을 실험적으로 찾고, 기동 시간과 마그네트론 양단 전압 제한을 위해 순시

Paper number: TKPE-2017-22-5-12

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: kimhg@knu.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Kyungpook National University
Tel: +82-53-950-5605

¹ H&A Control R&D Lab., LG Electronics Inc.

² Dept. of Energy Eng., Kyungpook National University
Manuscript received Aug. 5, 2017; revised Aug. 15, 2017;
accepted Sep. 17, 2017

— 본 논문은 편집위원회에서 기술논문으로 추천됨

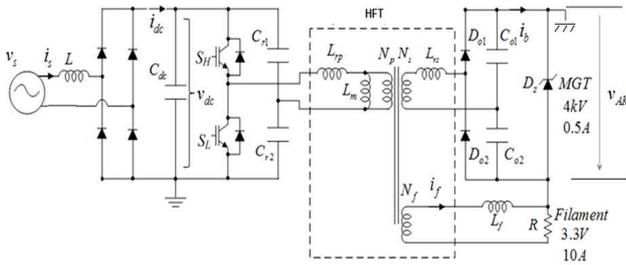


Fig. 1. Structure of LLC resonant inverter for magnetron.

전압에 따라 PFM 제어와 전압별 다 공진 회피 주파수를 적용하여 제어한다. 또, 비발진 모드에서 발진 모드로 전환 시 불안정 구간을 고려한 기동 프로세스를 제안한다. 제안된 기동 제어의 검증은 위해 1200W 출력을 갖는 전자레인지에 적용하여 그 타당성을 검증하고, 전압에 따른 기동 성능을 확인하고자 한다.

2. 비발진 모드에서의 다 공진

일반적인 마그네트론용 LLC 공진형 인버터의 구성은 그림 1과 같다. 전체 구성은 전압 이득을 결정하는 공진형 인버터부와 마그네트론이 요구하는 전압으로 승압하기 위한 고주파수 변압기, 그리고 2차측 배전압 회로로 구성된다.

PLS(Plasma Lighting System)나 산업용 마그네트론 구동 회로에서는 마그네트론을 안정적으로 구동하기 위해 필라멘트용 전원을 독립적으로 사용하여 충분히 열전자가 방출된 후 인버터를 동작시켜 발진시키는 방법을 사용하는 반면 전자레인지와 같은 가전의 경우 가격 측면에서 고주파수 변압기의 2차측 권선을 두 개 사용하여 한 권선은 마그네트론의 캐소드와 애노드 사이에 전압을 공급하고 나머지 한 권선은 필라멘트를 가열하기 위한 전압을 공급한다.

LLC 공진형 인버터는 스위치를 영전압 스위칭 영역에서 동작시키기 위해 스위칭 주파수를 전압이득이 최대가 되는 주파수 보다 높은 주파수로 동작시킨다. 기동시 필라멘트가 가열되어 열전자를 방출하는 순간까지는 마그네트론은 개방 상태로 동작하므로 스위칭 주파수에 따른 전압 이득이 매우 급격하게 변한다. 따라서 필라멘트가 가급적 빨리 가열될 수 있도록 충분히 높은 전압(낮은 스위칭 주파수)을 공급하면서 동시에 마그네트론 전압이 과도하게 되어 다이오드가 소손되지 않도록(높은 스위칭 주파수) LLC 공진형 인버터의 스위칭 주파수를 적절히 제어해 주어야 한다. 또한, 고주파 변압기의 기생 커패시터의 영향에 의해 발생하는 다 공진으로 인해 주파수의 증가에 따라 마그네트론 전압이 증가 또는 감소하는 현상이 발생하므로 다 공진을 고려한 기동 주파수의 설계가 필요하다.

기생 커패시터는 고주파수 변압기 1차측 양단의 기생

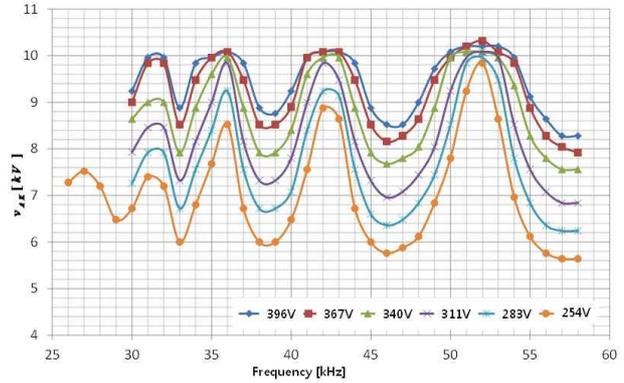


Fig. 2. Experimental results for v_{AK} according to the switching frequency.

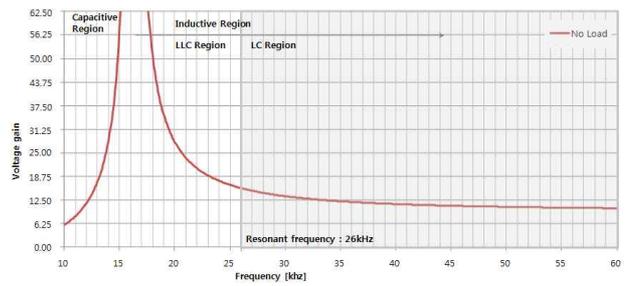


Fig. 3. Voltage gain $\frac{v_{AK}}{v_{dc}}$ at non oscillation mode.

커패시턴스, 2차측 고압 다이오드의 기생 커패시턴스, 또한 1차측과 2차측 간, 2차측 변압기와 마그네트론 구동용 권선 사이의 커패시턴스가 복합적으로 나타나며 v_{dc} 전압을 고정시키고, 고정 주파수 (25~60kHz)를 IGBT에 인가하는 경우 비발진 모드에서의 마그네트론 양단 전압 v_{AK} 는 그림 2와 같이 기생 커패시터의 영향으로 다 공진의 형태로 나타난다^{[9][10]}.

3. 제안한 기동 프로세스

전자레인지용 기동 프로세스를 위한 요구 설계 기준은 다음과 같이 정의하였다.

- 1) 비발진 모드에서의 ZVS 영역의 확보.
- 2) 발진 시간 < 6sec. (생산 검사 공정 최소 시간)
- 3) 마그네트론 전압 $v_{AK} < 8.5kV$ (고압 부품 보호)

비발진 모드에서의 ZVS 영역은 그림 3과 같이 변압기 턴비를 고려한 무부하에서의 전압 이득 곡선을 통해 확인할 수 있다. ZVS가 되기 위해서는 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 높은 영역(유도성 영역)에서 동작시켜야 한다. LLC 공진형 인버터는 누설 인덕턴스의 영향으로 유도성 영역을 LLC 영역과 LC영역으로 나눌 수 있는데, 무부하의 경우 LLC 영역에서는 전압 이득이 급격히 변하므로 부품 산포에 따라 용량성 영역에서 오동작

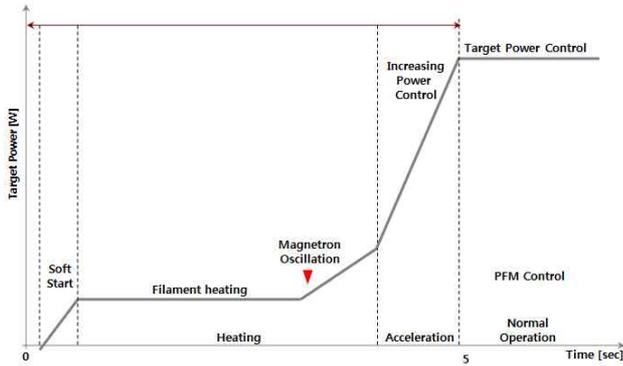


Fig. 4. Proposed start-up process of the microwave oven.

할 수 있기 때문에 본 연구에서는 LC 영역의 최소 주파수인 26kHz를 스위칭 주파수의 최소값으로 선정하였다. 발진 시간은 낮은 주파수를 적용할수록 짧아지나 마그네트론 전압이 상승하게 되므로 다 공진 범위 중 마그네트론 전압이 낮은 영역에서의 최저 주파수를 선정하고, 생산 검사 공정 시간을 고려하여 최대 6초 이내로 하였다. 전체적인 기동 프로세서는 입력 전압 범위(180~280V_{rms})에 대해 6초 이내에 정상 구간에 동작하도록 제어하기 위하여 그림 4와 같이 구성된다.

- 1) 소프트 기동 구간 : 인버터 초기 동작 시 공진 커패시터의 방전 돌입 전류를 낮추기 위해 초기 주파수를 최대 주파수 70kHz로 동작시키고, 필라멘트 가열 주파수 범위로 서서히 변경하는 구간.
- 2) 필라멘트 가열 구간 : 마그네트론의 전자 방사를 용이하게 하고, 마그네트론 전압을 낮추기 위해 순시 전압에 따라 주파수를 가변하는 구간.
- 3) 가속 구간 : 충분히 전자 방사를 하는지 발진 여부를 판단하고, 지령 출력까지 가속하는 구간.
- 4) 정상 구간 : 순시전압에 따른 PFM 전류 제어를 통해 정상적으로 출력 제어하는 구간.

3.1 소프트 기동 구간

마그네트론의 필라멘트 가열 중 보호 동작에 의해 재동작시 마그네트론의 양단 전압이 충분히 방전되지 않은 상태에서 인버터를 재동작하면 방전되지 않은 양단 전압을 기준으로 순간적으로 고압 다이오드 허용 전압을 넘게 되어 소자 파괴가 될 수 있다. 그러므로 인버터를 기동하기 위해서는 약 400ms의 초기 방전을 위한 인버터 동작 지연시간이 필요하다. 또 인버터 초기 기동시 공진 커패시터는 v_{dc} 로 충전되어 있으므로 스위칭 첫 펄스 동작에 순간적으로 방전하며 돌입전류와 소음을 발생시킨다. 이 방전 전류를 낮추기 위해 그림 5와 같이 초기 주파수를 IGBT 최대 주파수 70kHz로 동작시키고, 필라멘트 가열 주파수 범위 45kHz로 주파수를 서서히 변경시켜 기동 소음을 방지한다.

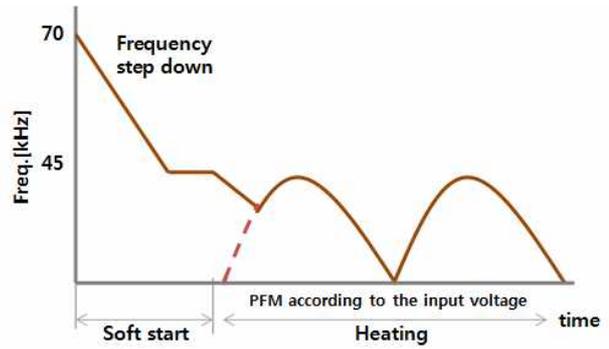
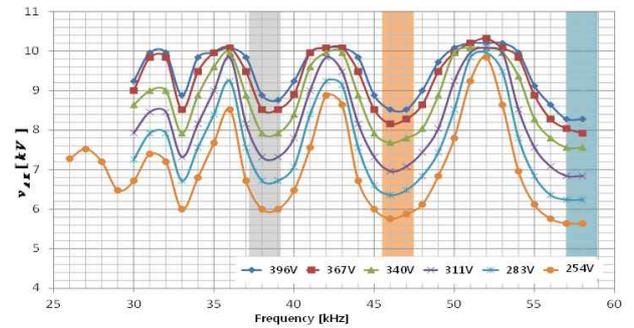
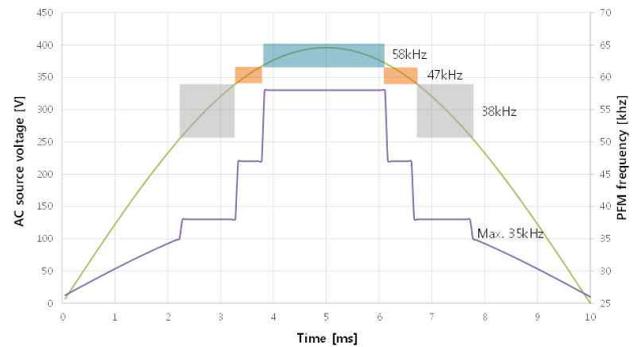


Fig. 5. Switching frequency control for soft start-up.



(a)



(b)

Fig. 6. (a) Magnetron voltage according to the switching frequency.(b) PFM frequency according to the input voltage.

3.2 필라멘트 가열 구간

마그네트론은 필라멘트에 흐르는 전류에 의해 가열된 전자가 열전자 방사 현상에 의해 전자를 방출하므로 마그네트론의 동작 시간은 필라멘트 온도가 동작 온도 1900~2100°K에 이르는 시간이다. 따라서 전 전압에 대해 마그네트론 동작 시간을 일정하게 유지하기 위해서는 전원 전압을 감지하고, 마그네트론 수명을 고려하여 50W 수준으로 출력 제어를 할 수 있다. 그러나 다공진의 영향으로 제어가 반전되는 구간이 발생하고, 고전압으로 갈수록 고압 다이오드의 전압이 올라가기 때문에 선형 주파수 제어를 적용하는 경우 산포에 의해 제어

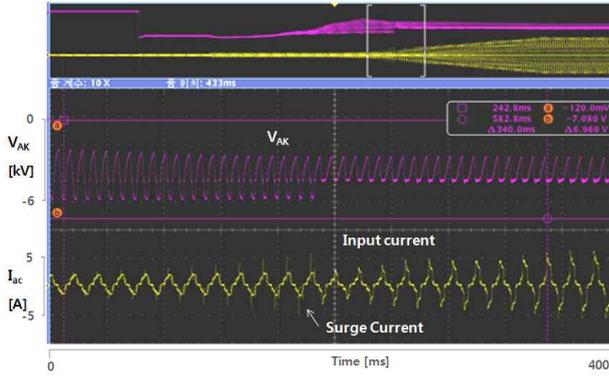


Fig. 7. Waveforms of the magnetron voltage and the input current during the transient of magnetron mode change.

반전 영역 진입 시 고압 다이오드가 소손될 수 있어 적용이 어렵다.

본 논문에서는 발진 시간과 마그네트론 허용 전압을 만족하기 위하여 전원 전압에 따른 PFM 제어를 적용하고, 다 공진의 영향을 보상하였다.

그림 6(a)에서 입력전압 최대치가 396V의 경우 다 공진에 의해 58kHz로 구동을 해야 마그네트론 전압 8.5kV 이하를 만족하게 되는데 고정 주파수 58kHz로 스위칭을 하는 경우 높은 스위칭 주파수로 인해 필라멘트에 전달되는 전력이 작기 때문에 기동시간이 10초 수준으로 늘어나게 되어 발진 시간을 만족하기 어렵다.

그림 6(b)는 제안한 전원 전압에 따른 PFM 제어 주파수를 보여준다. 순시 전압 254V까지는 35kHz 이하의 주파수에 대해 마그네트론 허용 전압 8.5kV를 만족하므로, 각 순시 전압(0~254V)에 대해 35kHz이하의 최대 출력이 발생하는 주파수를 시험을 통해 설계하고, 그 이상의 전압에 대해서는 전압과 주파수에 따른 마그네트론 전압이 8.5kV 이하가 되는 고정 주파수(254~340V에서는 38kHz, 340~367V에서는 47kHz, 367~396V에서는 58kHz)로 동작을 시켜 발진 시간을 단축하고, 마그네트론 전압을 제한한다. 다 공진 회피 주파수는 마그네트론의 발열 상태에 따른 저항 변화에 대해서는 동일하나 고주파 변압기의 특성 파라미터 (자화 인덕턴스, 누설 인덕턴스, 공진 커패시터)의 산포의 영향을 받으므로 인덕턴스의 경우 2%, 커패시터의 경우 5%이내의 부품 편차가 필요하다.

3.3 가속 구간/ 정상 구간

마그네트론 전자 방출이 활발해지면 애노드 전류가 과도하게 흐르게 되고, 그림 7과 같이 비발진 모드에서 발진 모드로 전이되는 과도 구간에서 써지 전류와 변압기 소음이 발생한다. 마그네트론이 발진 모드에 진입한 이후에도 계속 비발진 모드의 제어로 동작시키면 높은 피크 전류에 의한 IGBT 소손이 발생한다. 본 연구에서는 3[A]를 넘는 전류가 500us 유지되는 경우 충분히 열



Fig. 8. Photographs of experimental set-up.

TABLE I
PARAMETERS OF SIMULATION AND EXPERIMENT

Parameter	Symbol	Unit	Value
Maximum power	P	[W]	Max. 1840
Input voltage	v	[V _{rms}]	180 ~ 280
Input frequency	f	[Hz]	30 ~ 80
Magnetron voltage	v_z	[kV]	3.4 ~ 4.4
Load (Oscillation Mode)	R_{OM}	[kΩ]	1.3
Load (Non Oscillation Mode)	R_{NOM}	[kΩ]	380
Filament resistor	R_f	[Ω]	0.075
$N_p:N_s:N_1$ turn		[turn]	24:300:1
Primary leakage inductance	L_{rp}	[μH]	16.5
Secondary leakage inductance	L_{rz}	[μH]	30
Magnetizing inductance	L_m	[μH]	125
Filament coil inductance	L_f	[μH]	1.9
Resonant capacitor	C_{r1}, C_{r2}	[μF]	0.27
High voltage capacitor	C_{o1}, C_{o2}	[nF]	8.2
DC capacitor	C_{dc}	[μF]	3.3

전자가 방출되고 있다고 판단하여 발진 모드 제어로 변환한다. 변환 시점에서는 마그네트론의 열전자 방사가 불안정하므로 적은 열전자 방사 시에도 출력 제어가 가능한 낮은 출력 지령(200W)으로 PFM 전류 제어를 동작시킨 후 목표 출력 지령(1200W)까지 0.5초 동안 가속하여 정상 구간에 도달하게 한다.

4. 실험

실험에 사용된 마그네트론은 LG전자의 인버터용 마그네트론 2M286이며, 출력 주파수는 2.45[GHz], 최대출력은 1200W, 발진 개시시의 애노드 전압은 4.15[kV]이다. 표 1은 실험에 적용된 설계 변수들이다.

Fig. 8은 전자레인지 구동용 실험 장치이다. 실험 장치는 LG전자의 1200W 인버터용 전자레인지를 대상으로 하였고, 마그네트론 전압을 측정하기 위해서 Tektronix사의 P6015(20kVdc) 고전압 프로브를 사용하였으며, 애노드 전류 및 필라멘트 전류, 입력 전류의 측정을 위해 Tektronix사의 TCP0030(30A)전류 프로브를 사용하였다. 출력 및 역률 측정은 Yokogawa사의 WT310HC 전력분석계를 사용하였다.

제안된 디지털 제어를 갖는 LLC 공진형 인버터의 마이크로프로세서는 Reneass사의 16bit 마이컴 RL78을

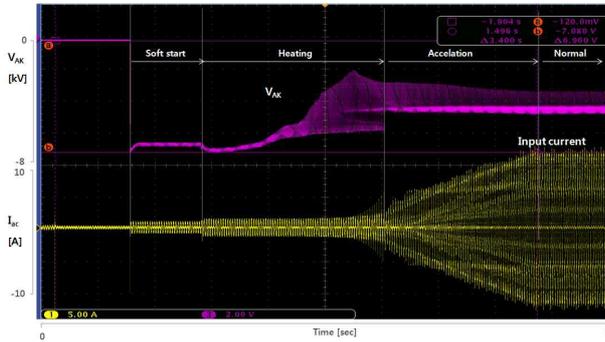


Fig. 9. Waveforms of the magnetron voltage and the input current during the start-up process.

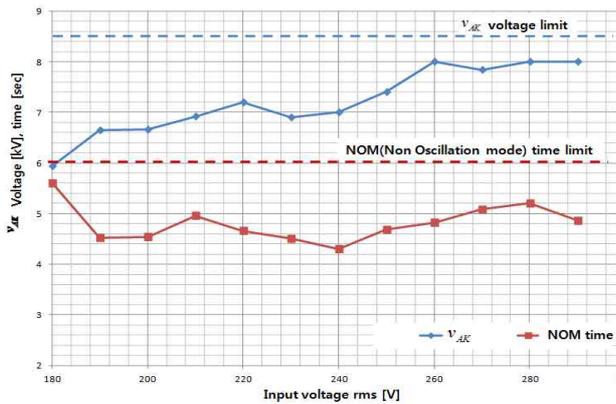


Fig. 10. Magnetron voltage and non oscillation mode time according to the input voltage.

사용하였고, 제어 샘플링 타임은 50 μ s로 하였다.

그림 9는 최대 출력 1200W시 제안한 기동 제어에 의한 마그네트론 전압과 입력 전류를 보여준다. 마그네트론의 과도상태에서 발진모드로 전환 시 자연스럽게 PFM 전류 제어가 동작하여 정상 출력까지 가속하는 것을 알 수 있다.

그림 10은 전자레인지 허용 전압(180~280V_{rms}) 범위에서의 마그네트론 양단 전압과 비발진 모드 시간을 나타낸다. 제안한 기동 제어를 통해 전 전압 범위에서 제한 조건을 잘 만족함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 마그네트론 구동을 위한 LLC 공진형 인버터의 기동 제어 방법을 제안하였다. 제안된 기동 제어는 비발진 모드에서 고려되어야 하는 기동 시간과 마그네트론 양단 전압 제한을 위해 순시 전압에 따른 PFM 제어와 전압에 따른 다 공진 회피 주파수를 적용하여 제어한다. 또한 비발진 모드에서 발진 모드로 전환 시 불안정 구간을 고려한 기동 프로세스를 제안하였다. 제안된 기동 제어 기법의 검증에 위해 1200W 출력을

갖는 전자레인지에 적용하여 허용 전압 전 범위에서 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

References

- [1] E. Miyata, S. Hishikawa, K. Matsumoto, M. Nakaoka, D. Bessyo, K. Yasui, I. Hirota and H. Omori, "Quasi-resonant ZVS-PWM inverter-fed DC-DC converter for microwave oven and its input harmonic current evaluations," *IEEE IECON Rec.*, Vol. 2, pp 773-778, 1999.
- [2] Y. Defuchi, S. Moisseev, M. Nakaoka, I. Hirota, H. Yamashita, H. Omori, and H. Terai, "New current topology of single-ended soft-switching PWM high frequency inverter and its performance evaluations," *International Conference on Power Electronics*, pp 247-250, 2001.
- [3] T. Miyauchi, I. Hirota, H. Omori, H. Terai, M. Abdullah Al, and M. Nakaoka, "Constant frequency adjustable power active voltage clamped soft switching high frequency inverter using the 4th-generation trench-gate IGBTs," *International Conference on Power Electronics*, pp. 236-241, 2001.
- [4] Y. J. Woo, et al. "One-chip class-E inverter controller for driving a magnetron," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 2, pp. 400-407, 2009.
- [5] M. Ishitobi, et al. "A novel type soft switching PWM DC-DC converter with high voltage transformer link for magnetron drive," *Industrial Electronics Society, IECON 2000*.
- [6] H. Kako, T. Nakagawa, R. Narita, "Development of compact inverter power supply for microwave oven," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, pp. 611-616, 1991.
- [7] M. K. Lee, K. H. Koh, H. W. Lee, "A study on constant power control of half bridge inverter for microwave oven," *KIEE International Transactions of Electrical Machinery and Energy Conversation Systems*, 4-B(2), pp. 73-79, June 2004.
- [8] B. Yang, F. C. Lee, A. J. Zhang, and G. Huang, "LLC resonant converter for front-end DC to DC conversion," *APEC 2003*, pp. 605-609, 2003.
- [9] Crisafulli, Vittorio, and Filippo Chimento, "High efficiency start-up control of magnetron filament for MWO applications," *Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*, 2016.
- [10] B. H. Lee, M. Y. Kim, C. E. Kim, K. B. Park, and G. W. Moon, "Analysis of LLC resonant converter considering effects of parasitic components," *31st International Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2009*, 2009.
- [11] B. Lu., W. Liu., Y. Lian., F. C. Lee, and J. D. van Wyk. "Optimal design methodology for LLC resonant converter," *APEC 2006*, pp. 533-538, 2006.



강계룡(姜桂龍)

1973년 12월 5일생. 1999년 경남대 전기공학과 졸업. 2002년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 2017년 현재 경북대 전자공학부 제어 시스템전공 박사과정. 2003년~현재 LG전자 H&A제어연구소 책임연구원.



김흥근(金興根)

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1990년~1991년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 2006년~2007년 미국 Michigan State University 방문교수. 경북대 IT대학 전기공학과 교수. 당 학회 명예회장.



차헌녕(車憲寧)

1972년 10월 17일생. 1999년 경북대 전자공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2001년~2003년 (주)피에스텍 근무. 2004년~2005년 한국전기연구원 근무. 2009년 미국 Michigan State University 전기공학과 졸업(공학박사). 2010년~2011년 한국전기연구원 스마트그리드연구본부 선임연구원. 현재 경북대 에너지공학부 부교수.