

## 저 파고율 특성을 갖는 Class-E 전자식 안정기의 새로운 제어 기법

천현선<sup>\*</sup>, 이동윤, 현동석  
한양대학교 전기공학과

### A new control scheme of Class-E electronic Ballast with low crest factor

Hyun-Son Chon, Dong-Yun Lee, Dong-Seok Hyun  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

**Abstract** – In this paper, a new control scheme of Class-E inverter for reducing the crest factor of electronic ballasts for fluorescent lamps using Pulse-Frequency-Modulation (PFM) is introduced. The lifetime of the lamps is guaranteed by decreasing the lamp crest factor and voltage stress of the switch is significantly decreased by a new scheme although conventional Class-E inverter is used in this paper. The proposed PFM control scheme doesn't use any auxiliary circuit. The proposed control strategy is executed by feeding back the input current, and the Zero-Voltage-Switching (ZVS) is ensured by operating beyond resonant frequency. Therefore, the control principles of proposed method are explained in detail and its validity is verified through several simulated results.

### 1. 서 론

최근 전력용 파워 반도체 소자와 제어의 비약적인 진보로 인하여 새로운 제어 기법들이 다양한 전자식 안정기의 높은 주파수의 동작에 적용되고 있다[1]~[7]. 형광램프는 높은 효율(lm/w)을 가지므로 오늘날 가정이나 건물 등에 널리 사용되고 있으며, 형광램프를 위한 전자식 안정기에 여러 가지 제안들이 적용되고 있다[1]~[7].

일반적으로 형광램프는 방전램프로써 음의 저항 특성을 가지고 있다. 따라서, 점등이 되기까지 높은 전압이 요구되고 점등 후에는 형광등에 흐르는 전류를 제한해야 한다. 그러므로, 전자식 안정기의 필요가 요구된다. 그러나, 형광램프를 위한 전자식 안정기는 스타팅 시나리오의 수행과 높은 파고율로 인해 램프수명에 치명적인 영향을 주게 된다[5].

최근, 전자식 안정기에 Single-stage Class-E 인버터 회로가 많이 적용되고 있다.

Class-E 인버터 회로는 높은 주파수에서의 동작이 가능하며 높은 효율을 가지고 있는 스위칭 회로이다. 또한, 가벼운 무게, 작은 부피, 간단한 회로동작과 높은 스위칭 동작을 합으로써, 플리커 현상이 없고, 가청 노이즈가 없는 등의 이점이 있다[1], [2].

그러나, 기존의 Class-E 전자식 안정기의 회로는 램프 전류의 파고율이 높으며 스위치 턴-오프시 공진 회로에 의한 전압 스트레스로 인하여 스위치 이용률이 감소하며 도통 손실이 증가하게 되는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 저자의 회로구현이 어렵게 된다.

최근, 이러한 문제를 해결하기 위해 보조회로를 이용하거나 또는 변형된 회로를 이용하는 Class-E 전자식 안정기가 제안되고 있다. 이러한 기법은 스위치에 인가되는 전압스트레스를 현저히 감소하는 장점을 가지고 있

다. 하지만, 여전히 높은 램프전류의 파고율을 가지고 있으며, 또한 부가적인 회로로 인한 비용 상승의 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 간단한 회로 동작을 하는 Class-E 전자식 안정기에 새로운 기법(PFM)을 제안하였다. 제안된 기법은 매우 간단한 제어동작을 수행하게 되며, 램프의 파크전류를 주파수 가변의 원리에 의해 감소함으로써, 형광등 수명에 주된 영향을 주는 파고율을 개선하게 되었다. 따라서 램프수명을 보장 할 수 있게 되었다. 또한, 새로운 제어기법은 기존의 Class-E 인버터의 단점인 스위치의 전압 스트레스가 추가적으로 감소됨으로써 스위치의 전압 정격을 줄이게 되었으며, 스위치의 도통 손실이 감소되어 스위치 이용률을 증가시키게 되었다.

새롭게 제안된 Class-E 전자식 안정기는 안정적인 회로 동작을 하게 되고 추가적인 보조회로가 사용되지 않음으로써 저자의 전자식 안정기가 구현되는 장점을 가지게 되었다. 또한, ZVS 스위칭으로 인하여 턴-온 오프 시스위치 손실을 최대로 줄일 수 있게 된다.

제안된 주파수 변조기법(PFM) 및 이를 통한 Class-E 전자식 안정기 시스템의 특성을 해석하며 파고율 감소의 가변 원리를 몇 가지 시뮬레이션을 통하여 각각의 타당성을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 회로 구성

본 논문에서 사용된 시스템의 주 회로 구성은 그림 1과 같이 기존 전자식 안정기용 Class-E 인버터와 동일하다. 시스템의 구성은 입력 측의 정류 다이오드 브리지와 소형  $L_f$ ,  $C_f$ , 필터, 전류 모양 인덕터,  $L_1$ , 스위치,  $S$ , 스위치 병렬 커페시터,  $C_p$ , 블럭킹 커페시터,  $C_b$ , 공진인덕터,  $L_r$ , 공진 커페시터,  $C_r$ , 스트트-업 커페시터  $C_s$ , 램프 등이 저항,  $R$ ,로 구성되어 있다.

제안된 제어기법을 가지는 Class-E 인버터의 제어 원리를 분석하기 위하여 다음의 가정을 한다.

- 회로의 모든 구성요소는 이상적이다.
- DC link의 입력전압은 스위칭 한 주기 동안 일정하다.
- 제안된 시스템은 정상상태에서 동작한다.

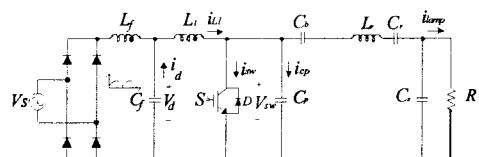


그림. 1 제안된 Class-E 전자식 안정기 회로 시스템

## 2.2. 개선된 파고율을 갖는 제안한 제어기법의 원리

### 2.2.1 파고율의 정의

파고율은 램프전류의 최대 값에 램프전류의 실효 값을 나눈 값으로 표현된다. 따라서 파고율의 수식적 정의는 식. 1과 같다.

$$CF = \frac{I_{lamp, peak}}{I_{lamp, rms}} \quad (1)$$

파고율은 램프의 수명과 직접적인 영향을 주게 되는 요소이며, 파고율이 1.7 보다 작게 되면 램프의 수명을 최대로 보장 할 수 있게 된다. 따라서 형광램프의 파고율은 1.7이하로 보장되어야 한다[4]. 만약, 램프의 피크전류가 작아지게 되면 식. 1에 의하여 파고율은 감소되고, 램프의 수명은 연장될 것이다.

### 2.2.2 제안한 제어기법의 원리

본 논문에서 제안된 제어기법을 사용한 Class-E 전자식 안정기는 부가적인 회로를 사용하지 않고 단지 스위칭 주파수를 가변 함으로써 램프 전류를 거의 일정하게 클램핑 하고, 추가적으로 스위치 전압을 감소시킨다. 따라서 램프 피크 전류를 줄임으로써 발광시 파고율을 감소시키고, 추가적으로 스위치의 정격전압을 감소시킬 수 있게 된다. 또한 본 논문에서 제안된 주파수 변조기법을 이용한 Class-E 전자식 안정기의 출력전력은 기존의 Class-E 전자식 안정기의 출력전력과 동일하다. 그 이유는 클램핑 전압레벨 아래에서는 제안한 제어기법을 사용한 Class-E 인버터가 어떤 제어기법도 사용하지 않은 기존의 Class-E 인버터처럼 동작하기 때문이다. 그럼 2는 제안된 제어기법의 전체 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 한 가지의 간단한 제어 루프로 구성된 제안된 제어기법은 스위칭 주파수를 변조하는 제어부이다.

제어루프는 Class-E 인버터 시스템의 입력전류를 피드백을 받아 제어기에서 스위칭 주파수의 가변유무를 판단하여 스위칭 주파수를 가변하게 된다. 제안된 주파수변조기법을 사용하여 입력전류의 변동에 따른 램프 전류의 파고율 저감의 원리 및 스위치 전압의 클램핑 원리는 다음과 같다.

그림 3은 제안한 제어기법의 기본원리를 램프전류,  $i_{lamp}$ , 와 스위칭 주파수,  $f_s$ ,를 이용하여 설명한 것이다. 그림 3(a)는 램프 출력 전류,  $i_{lamp}$ ,가 클램핑 되는 원리를 램프 전류,  $i_{lamp}$ , 대 스위칭 주파수,  $f_s$ ,로 나타낸 그래프이다. 최초 일정 스위칭 주파수,  $f_{s1}$ ,으로 Class-E 인버터를 동작시키면 램프전류,  $i_{lamp}$ ,가 입력전류에 비례하여 증가하게 되고 입력전류가  $I_1$ 이 되는 시점에서 램프전류는 클램핑 레벨에 도달한다. 입력전류가  $I_1$ 이 되는 시점 이후 계속  $f_{s1}$ 으로 동작한다면 램프전류는 클램핑 레벨을 넘어야하기 때문에 램프전류를 클램핑 레벨로 유지하기 위해서 스위칭 주파수를  $f_{s1}$ 에서  $f_{s2}$ 로 변환시켜야 한다. 즉, 입력전류가  $I_1$ 에서  $I_2$ 로 증가하고, 다시  $I_2$ 에서  $I_3$ 으로 증가할 때 스위칭 주파수 또한  $f_{s1}$ 에서  $f_{s2}$ 로,  $f_{s2}$ 에서  $f_{s3}$ 로 각각 가변 시켜야 한다는 의미가 된다. 결국 입력전류가 최대치인  $I_4$ 에 도달할 때까지 스위칭 주파수,  $f_s$ , 또한  $f_{s4}$ 까지 가변 되어 램프전류는 일정한 클램핑 전류로 유지되게 된다. 입력 1/2 사이클 이후 입력전류는  $I_4 \rightarrow I'_3 \rightarrow I'_2 \rightarrow I'_1$ 으로 감소하게 되고 스위칭 주파수 또한  $f_{s4} \rightarrow f_{s3} \rightarrow f_{s2} \rightarrow f_{s1}$ 으로 점차 감소하게 된다. 따라서 입력전류가  $I_1$ 보다 낮은 구간에서는 일정 스위칭 주파수  $f_{s1}$ 으로써 기존의 Class-E 인버터와 동일하게 동작하게 된다. 그럼 3(b)는 한 주기에서 스위칭 주파수의 가변에 따라 램프전류의 피크 치가 변하게 되는 원리를 보여준다. 그럼에서 알 수 있듯이 주파수가 높아질수록 램프의 피크전류는 감소하게 되며, 결국 주파수 가변에 의해 클램핑 레벨에 도달하게 됨을 볼 수 있다. 제안된 주파수변조기법은 입력전류가 변하더라도

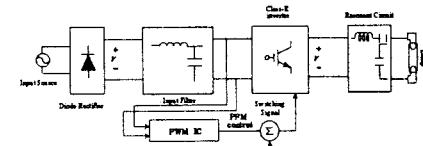
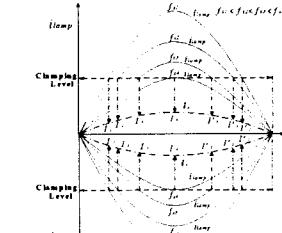
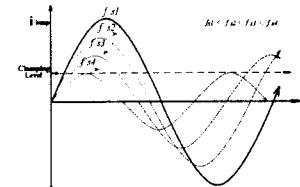


그림. 2 새로운 제어기법을 추가한 Class-E 인버터 시스템의 제어 블록도



(a) 입력전류 한 주기 내에서의 clamping 레벨에 따른 이상적인 스위칭 주파수의 변화와 입력전류,  $i_{lamp}$ .



(b) 주파수 가변에 의한 램프 피크전류의 변화

그림. 3 주파수 변조기법(PFM)의 기본 원리

표 1. PFM 제어기법을 가지는 Class-E 전자식 안정기의 시뮬레이션 및 실험 조건

COMPONENTS	PARAMETERS
$V_{in}$	110Vac
$f_s$	333Hz ~ 46.6Hz
$f_r$	4kHz
$L_i$	1mH
$C_i$	0.68μF
$L_r$	3mH
$R_{eq}$	21Ω
$C_r$	100nF
$C_p$	3nF
$C_b$	100nF
$C_s$	4.7nF
$L_u$	0.4nH

램프전류를 일정하게 클램핑 할 수 있게 한다. 음의 파형도 이와 같이 동작한다. 이와 같이 본 논문에서 제안한 Class-E 전자식 안정기 시스템은 입력전류를 피드백 하여 클램핑 레벨 아래에서는 기존의 Class-E 인버터로써 동작하게 하고 클램핑 레벨 이상에서는 주파수를 가변 하는 제어기법을 수행한다. 따라서 클램핑 레벨 아래에서는 기존 Class-E 인버터와 동일하게 동작하기 때문에 출력전력은 기존의 Class-E 인버터와 동일하게 얻을 수 있다. 따라서 그림. 2 의 Class-E 전자식 안정기는 본 논문에서 간단히 제안된 한 가지의 제어루프를 통해 램프전류의 파고율을 감소시킬 수 있으며, 추가적인 스위치의 정격 전압을 감소시킬 수 있다. 또한, 안정된 영전압 스위칭을 이를 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 주파수 변조기법이 사용된 Class-E 전자식 안정기의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 안정적인 회로의 동작과 제어를 수행하기 위해 표 1의 조건들을 사용하였다. 제안한 제어기법이 사용된 Class-E 전자식 안정기와 기존의 Class-E 전자식 안정기의 실험 결과를 비교하기 위해 출력을 동일하게 하여 램프전류의 파고율과 스위치전압의 크기를 비교하였다. 앞서 설명하였듯이 스위

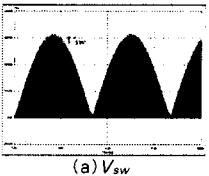
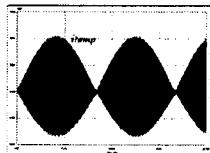
(a)  $V_{sw}$ (b)  $i_{swmp}$ 

그림. 4 제안된 PFM 기법이 사용되지 않은 Class-E 전자식 안정기 시스템의 시뮬레이션 결과

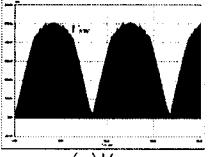
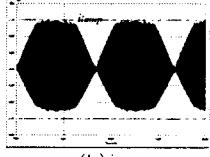
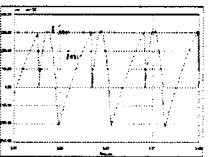
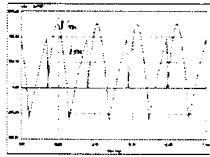
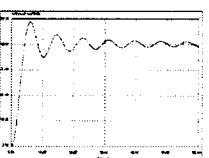
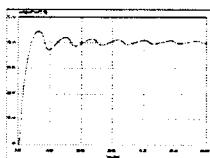
(a)  $V_{sw}$ (b)  $i_{swmp}$ 

그림. 5 제안된 PFM 기법이 사용된 Class-E 전자식 안정기 시스템의 시뮬레이션 결과

(a)  $V_{sw}, i_{sw}$ (b)  $V_{sw}, i_{sw}$ (c) 기존의 전자식 안정기 출력,  $P_{out}$ 

(d) 제안된 기법이 적용된 전자식 안정기 출력

그림. 6 제안된 PFM 기법이 사용된 Class-E 전자식 안정기 시스템의 시뮬레이션 결과

청 주파수는 대략 가정 주파수 대역 이상에서부터 스위치 전압이 약 500V가 걸리는 48kHz까지 변환하였다. 그림 4는 기존의 Class-E 전자식 안정기의 전압전류 파형의 시뮬레이션 결과를 보여준다 그림 4(a)은 기존의 Class-E 전자식 안정기의 스위치 전압,  $V_{sw}$ , 이고 그림. 4(b) 램프 전류,  $i_{swmp}$ , 를 나타내고 있다. 스위치 전압은 전압 증폭 비인 Q배만큼 증가되어 스위치의 최대전압이 약 620V까지 인가되었음을 확인 할 수 있다. 램프전류의 피크는 1.1A로 측정되었으며, 램프전류의 파고율은 약 1.9정도이다.

그림 5는 32kHz에서 48kHz의 주파수 가변 기법을 사용한 Class-E 전자식 안정기의 시뮬레이션 결과 파형이다. 그림. 5(a)는 스위치의 전압이고, 5(b)는 램프전류를 보여준다. 이 경우 램프의 피크 전류는 0.75A로 측정되었다. 따라서 제안된 기법을 갖는 Class-E 전자식 안정기의 파고율은 쇠. 1에 의해 1.58로 계산된다. 이 경우 스위치의 최대전압은 약 500V로 나타난다. 만약 Class-E 전자식 안정기 회로에 제안한 제어기법을 사용하지 않았다면, 높은 파고율로 인해 램프수명을 보장 할 수 없고, 스위치 전압은 620V 이상의 전압 스트레스를 가지게 되었을 것이다. 따라서 본 논문에서 제안한 제어기법을 사용한 Class-E 전자식 안정기는 램프전류의 파고율을 감소시키고 추가적으로, 스위치의 전압 스트레스를 감소시키게 됨을 시뮬레이션으로부터 확인 할 수 있다.

그림 6(a)는 입력전류,  $i_d$ , 가 클램핑 레벨에 해당하는 전류 아래에서 동작하는 것으로써 일정한 스위치 주파수인 32kHz로 동작하고 있을 때의 스위치의 전압,  $V_{sw}$ , 와 스위치전류,  $i_{swmp}$ , 의 파형을 나타내고 있다. 파형으로부터 알 수 있듯이 클램핑 레벨 이하에서는 저주파수로서 동작하여 출력전력을 증가시키고 있음을 확인 할 수 있으며 뿐만 아니라 턴-온 시 영전압 스위치가 안정적으

로 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 6(b)는 입력전류,  $i_d$ , 가 클램핑 레벨에 해당되는 입력값 이상인 최대치에 도달 한 경우의 동작 파형으로써 스위치 주파수,  $f_s$ , 가 최대 48kHz까지 가변 되었음을 알 수 있다. 따라서 스위치 주파수,  $f_s$ , 의 가변에도 불구하고 스위치는 영전압 스위칭이 이루어지고 있음을 확인 할 수 있다. 그림 6(a)와 (b)로부터 알 수 있듯이 제안된 제어기법을 수행함에 있어서는 스위칭 손실이 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다. 그림 6(c)는 기존의 Class-E 전자식 안정기의 출력을 보여주며, 그림6(d)는 제안된 기법을 사용한 Class-E 전자식 안정기의 출력전력을 보여준다. 그림6(c)와 그림6(d)에서 출력전력은 약 40W로 측정되었으며, 이 실험 결과로부터 알 수 있듯이 기존의 Class-E 인버터와 동일한 출력전력을 갖는 경우 제안된 주파수 변조기법을 수행하는 Class-E 인버터의 파고율이 더 작고, 스위치 전압스트레스도 기존의 Class-E 인버터 보다 감소되어 측정됨을 확인 할 수 있다.

이상과 같이 모든 실험 결과는 이론적인 결과와 거의 동일한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전자식 안정기의 램프전류 와 스위치 전압 클램핑 특성을 갖는 Class-E 인버터 시스템의 새로운 제어기법을 제안하였다. 제안한 제어 부는 입력전류를 피드백 하여 스위치 주파수를 변조하는 하나의 간단한 제어부로 구성되었다. 제안한 제어기법이 사용된 전자식 안정기를 위한 Class-E 전자식 안정기의 실현 가능성을 시뮬레이션을 통해서 그 타당성을 증명하였다. 이러한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 제안된 제어는 램프수명에 치명적인 파고율을 1.6이 하로 개선하여 램프수명 증가
- 주파수 변조기법(PFM)에 의한 추가적인 스위치 전압 스트레스의 감소
- 스위치 전압의 감소와 보조회로의 생략으로 인한 저가의 시스템 구현
- 안정적인 영-전압 스위칭

#### (참 고 문 헌)

- [1] N.O.Socal and A.D.Sokal, "Class-E A new class of high-frequency tuned single-ended switching power amplifiers," *IEEE J. Solid-State circuits*, Vol.SC-10, No.3, pp.168-176, June, 1975
- [2] M.K.Kazimierczuk and K.Puczko, "Exact analysis of Class-E tuned power amplifier at any Q and switch duty cycle," *IEEE Trans on Circuits Systems*, vol.CAS-34, pp 149-159, Feb. 1897
- [3] M. C. Cosby, Jr., R. M. Nelms, "A Resonant Inverter for Electronic Ballast Applications," *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, vol. 41 No. 4, pp.418-425, Aug. 1994
- [4] P.N Wood, "Flouulant Ballast Design Using passive PFC and Crest Factor Control," *IEEE 0-7803-4943-1*, pp 2076-2081, 1998
- [5] Th. J. Ribarich, J. J. Ribarich, "A New Model for High-Frequency Electronic Ballast Design," *IEEE IAS*, pp.2334-2339, Oct. 1997
- [6] M. K. Kazimierczuk, W. Szaraniec, "Electronic Ballastfor Flouulant Lamps", *IEEE Trans.vol.8*, No.4, pp.386-395, Oct. 1993
- [7] J. Kim, C. S. Leu, R. Farrington, and F. C. Lee, "Clamp Mode Zero-Voltage-Switched Multi-Resonant Converters", *IEEE PESC Conf. Rec.*, pp. 18-24, 1992.