

무전극 형광등 전원의 외로기술 동향

한수빈 · 박석인 <한국에너지기술연구원>
장우진 <서울산업대학교 전기공학과 교수>

1 서론

최근에 우리나라에서도 많이 보급되기 시작한 무전극 램프는 형광등이나 기타 HID등과 달리 필라멘트나 전극이 없이 발광되어 일반적으로 6만 시간 이상의 긴 수명을 보장하게 된다.

통상 무전극램프 시스템의 구성 부분은 크게는 무전극 램프와 무전극 램프를 구동하기 위한 외부 고주파 전원부, 외부전원을 통해서 무전극 등이 유도 방전할 수 있도록 하는 에너지 유도코일부, 유도코일이 효과적으로 동작하기 위한 임피던스 정합부 그리고 램프에서의 광이 원하는 공간에 적절한 조도분포를 제공할 수 있도록 하는 등기구로 구성된다. 여기에서 RF유도코일은 제품에 따라 램프의 내부에 설치되는 경우와 외부에 설치되는 경우가 있는데 Endura의 경우는 램프의 외부에 설치되어 있고[1] QL의 경우

는 내부에 설치되어 있다[2]. 임피던스 정합부분의 경우는 대부분 고주파전원장치 안에 같이 설치되게 되므로 무전극 램프의 전원장치는 시스템 효율에 대한 결정적인 영향을 주게 된다.

무전극 광원용 전원에 있어서 당면문제로는 250[kHz]~수 [MHz]의 주파수로 광원을 구동하여야 하며 이 영역에서의 국내 관련 기술이 전반적으로 매우 취약하다는 것이다. 반면에 최근 선진국의 경우 전체 시스템의 효율을 80(lm/W)이상으로 높이고 조광기능도 가능하기 위한 지속적인 연구를 수행하는 등의 보다 성능이 향상되는 추세이다. 이에 따라 전원장치가 매우 콤팩트하고 장수명을 유지하여야 하고 고주파수로 구동됨에도 고효율로 제작되어야 하는 것이 기술적으로 쉽지 않은 문제이다. 무전극 광원용 전원의 경우 회로의 주요 블록은 그림 1과 같이 일반적인 안정기와 같이 노이즈필터, 정류기, 역률개선회로(Power

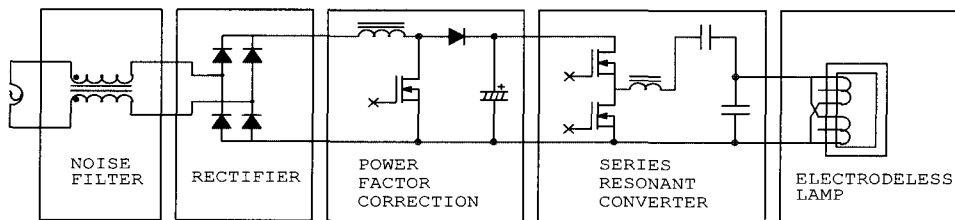


그림 1. 무전극 램프 전원장치의 구조

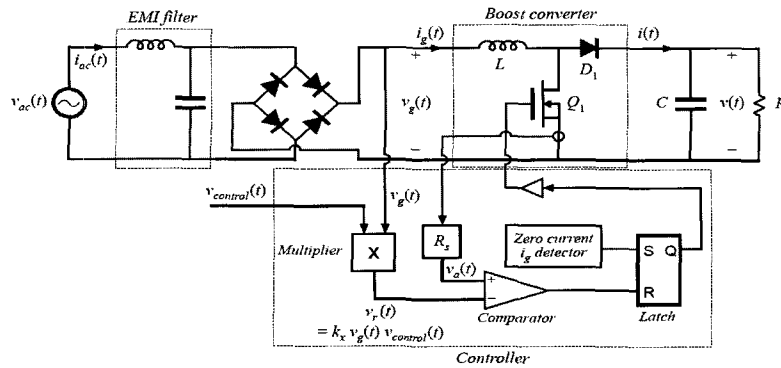


그림 2. Critical conduction mode 방식의 PFC 회로

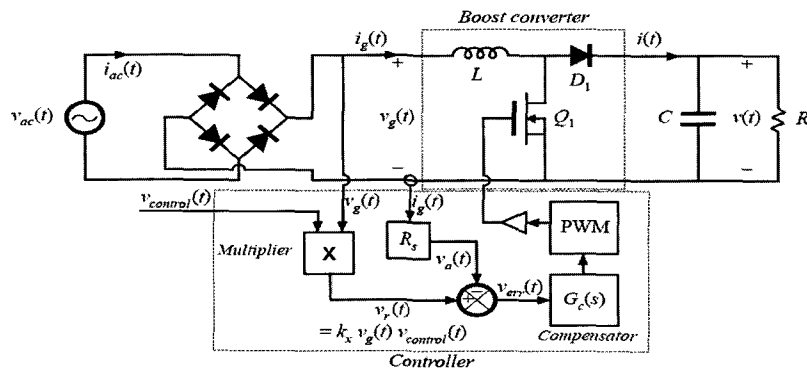


그림 3. Average current mode 방식의 PFC 회로

Factor Correction), 공진회로(Resonant Converter) 및 램프로 구성된다. 본 논문에서는 각 부분에서 무전극 전원용으로 제안되고 있는 방식에 대해 회로 측면에서 상세히 고찰해보기로 한다.

2. 무전극 형광등 전원의 역률 제어회로

최근의 전자식 안정기들은 역률을 고역률로 유지하고 전류의 고조파 함유율을 줄이기 위해서 능동회로에 의한 역률 제어회로를 사용한다. 통상 무전극 형광등의 경우 현재 150(W)급이 최대 출력이므로 역률개선회로는 그림 2와 같이 Boost Convert를 Boundary Mode에서 동작시키는 Critical conduction mode방법을 채택하고 있다. 원리는 직류

링크 단의 전압이 되는 커패시터 C의 전압을 제어하는 신호가 $V_{control}(t)$ 라고 할 때 이 값을 다이오드 정류 전압 $V_g(t)$ 로 곱한 값과 직류 링크에서 흐르는 전류 $i_g(t)$ 를 저항 R_s 값으로 측정된 전압값인 $V_a(t)$ 를 서로 비교하게 된다. 비교한 결과 $V_a(t)$ 이 더 크게 되면 SR Latch를 reset하게 된다. 단 별도로 전류가 0이 되는 순간을 측정하여 이 때 이 SR Latch는 set이 되게 동작된다. 이 동작에 따라 SR Latch의 출력인 Q가 부스트 컨버터의 반도체 스위치인 Q1을 on-off 시키게 된다. 복잡한 방식으로 동작되지만 원리적으로는 인덕터 L에 흐르는 전류가 0가 되면 반도체 스위치인 Q1을 on시키게 되고 반도체 스위치 Q1의 전류가 계속 증가하다가 정류전압의 궤적을 갖는 피크 전류값에 도달하게 되면 반도체 스위치 Q1은

off가 되어 0이 될 때까지 감소하게 되고 0이 되면 다시 Q1이 도통하게 된다. 이 Critical conduction mode방식의 역률제어는 결과적으로 인덕터의 전류가 연속인 연속모드와 불연속인 불연속모드의 경계영역에서 동작하는 것으로 그 전류 파형은 그림 4와 같이 전류의 피크치를 따라 움직이게 된다.

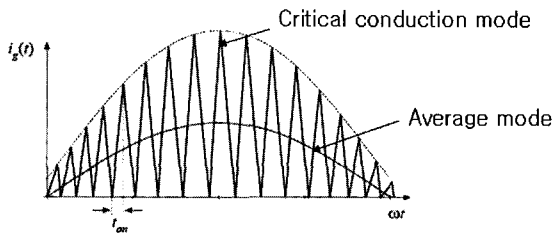


그림 4. PFC 회로의 제어 모드 방식에 따른 전류 파형

만약 무전극 광원의 전력이 150(W)를 넘게 상품화가 된다면 이 Critical conduction mode의 경우 전류의 피크값이 매우 커지게 되어 인덕터 L의 설계와 반도체스위치인 Q1에 대한 부담을 주게 된다. 따라서 이 경우는 그림 3과 같이 Average mode로 전류를 제어하는 역률제어 방식을 고려해야 한다. 원리는 직류 링크 단의 전압이 되는 커패시터 C의 전압을 제어하는 신호가 $V_{control}(t)$ 라고 할 때 이 값을 다이오드 정류 전압 $V_g(t)$ 로 곱한 값과 직류 링크에서 흐르는 전류 $i_g(t)$ 를 저항 R_s 값으로 측정한 전압값인 $V_a(t)$ 를 서로 비교하여 제어의 오차값으로 만들게 된다. 이후 이 제어의 오차값은 PI제어기를 통해서 PI 제어기의 출력값은 PWM 발생기에 의해 PWM파형으로 변환된다. 이때 PI제어기의 출력에 따라 PWM 파형의 펄스 폭이 바뀌게 된다. 이 PWM파형이 결국은 부스트 컨버터의 반도체 스위치인 Q1을 on-off 시키게 된다. 이 Average mode방식의 역률제어는 결과적으로 그림 4와 같이 인덕터의 전류가 피크값이 아닌 평균값의 전류로 제어되게 되어 고효율용에서는 유리하게 된다.

이러한 동작이 Average mode이거나 Critical conduction mode 방식이거나 모두 주변회로의 파라미터를 결정하는 것이 매우 어렵기 때문에 실제로는 개별적으로 구성하지 않고 상용 IC를 사용하게 된다. 이 상용 IC는 TI사, On Semiconductor사, 그리고 Fairchild사 등 대부분의 주요 반도체 회사에서 출시되고 있으며 광원용 안정기의 경우는 출력전압은 350~400(V)로 제어되도록 조정하는 것이 일반적이다. 역률제어 부분은 관련 반도체 회사의 경우 기본적인 설계 지침이 주어지므로 이를 참고하여 설계되지만 실제 제작시 정교한 제작이 요구된다.

3. 무전극 형광등 전원의 인버터 회로 및 필터

무전극 광원의 경우는 주파수가 수백(kHz)~수 (MHz)정도로 동작하므로 기존의 하드스위칭의 PWM 인버터 방식이 아닌 출력에 공진필터가 연결된 공진형 (Resonant type) 인버터를 사용하는 것은 일반적인 선택이다. 아직까지 150(W)급 이하의 공진형 인버터의 경우는 기본적으로 그림 5와 같이 반도체 스위치를 2개 사용하는 하프브리지(Half bridge)형의 회로구조를 기본으로 하고 있다. 광원의 용량이 200(W)대에 진입하게 되면 하프브리지 구조로 갈 것인지 반도체 스위치를 4개 사용하는 풀브리지(Full bridge)구조로 갈 것인지 결정해야 하는 문제가 따른다. 현재 용량으로는 하프브리지형이 사용되고 있기 때문에 이후는 인버터구조가 하프브리지형으로 가정하기로 한다.

이 하프브리지에 공진필터가 어떻게 연결되는가에 따라서 직렬 공진, 병렬공진, 직병렬 공진회로의 인버터가 결정된다. 공진회로의 종류는 무수히 많으며 그 중 일부가 그림 6에서 정리가 되었다. 상세히 살펴보면 (a)의 경우가 직렬 공진 회로 (b)의 경우가 병렬 공진 회로 (c)의 경우가 직병렬 공진회로(또는 LCC 공진회로)이며 (e)의 경우는 LCL 공진회로로 많이

사용되는 방식이다. 이 중에서도 일반적으로 LCC 공진회로가 가장 선호되고 있는 구조이지만 2(MHz)가 넘는 고주파에서는 병렬공진회로를 기초로 한 변형 방식이 사용되고 있다.

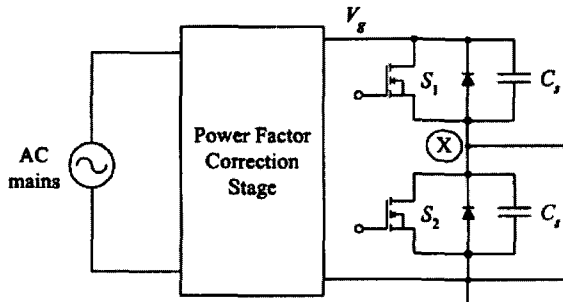


그림 5. 하프브리지 형의 인버터 구조

같은 구조의 공진 인버터에서도 반도체 스위치의

동작방식에 따라 자려식과 타려식으로 구분이 된다. 자려식은 반도체스위치의 구동에너지를 별도로 외부의 게이트 구동회로에서 주어지지만 타려식은 외부의 신호 없이 인버터 출력에서 신호를 피이드백 받아서 바로 이를 반도체스위치의 구동에 사용한다.

그림 7의 경우는 LC 병렬공진회로에 다시 직렬 C를 연결한 구조의 공진형 인버터로 출력 커패시터에 흐르는 전류를 전류 트랜스포머를 사용하여 센싱하여 그 신호를 3 way transformer로 구성하여 하프브리지 구조의 반도체 스위치를 자려식으로 구동한 방식으로 미국의 GE사에서 개발한 방식이다. 그림 8은 LCC 공진회로구조에서 인덕터 L에 흐르는 전류를 전류 트랜스포머를 사용하여 센싱하여 그 신호를 3 way transformer로 구성하여 타려식으로 구동한 방식으로 최근의 상용화 제품에서 자주 사용하는 방

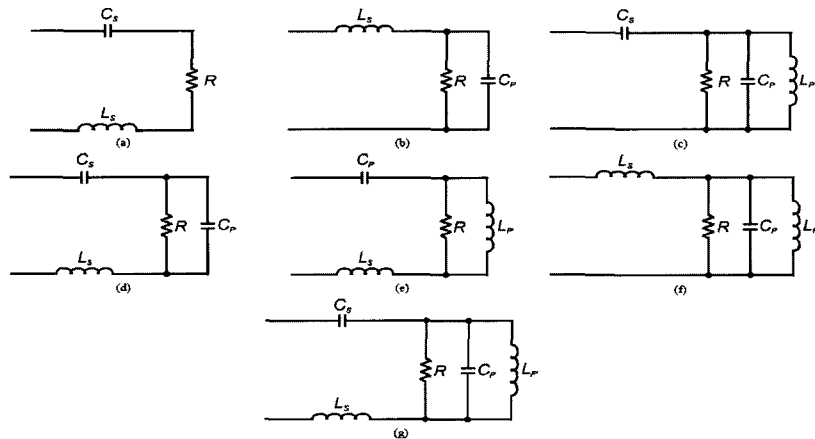


그림 6. 각종 필터 종류

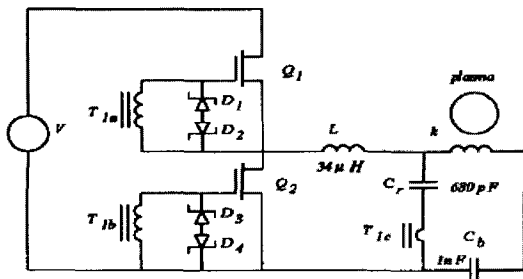


그림 7. 커패시터 전류 피이드백 자려식 인버터

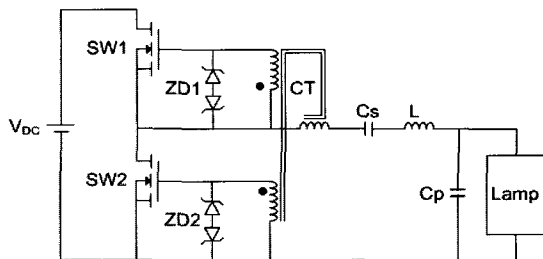


그림 8. 인덕터 전류 피이드백 타려식 인버터

식이다. 그림 9는 Complementary 구동의 자려식 방식으로 3 way transformer 대신에 1개의 전류 트랜스포머로 동작을 실현시키는 방식으로 이것도 미국의 GE사에서 개발한 방식이다.

그림 10은 필립스사에서 연구한 타려식 구동 방식으로 반도체 스위치를 구동하기 위해서 별도의 독립적인 구동신호와 게이트 구동회로부가 필요하게 된다. 타려식으로 인버터를 동작하는 구현 방식은 여러 가지 방식이 존재하며 실제적으로는 상용화된 구동 IC를 이용하는 것이 보편적이다. 그림 11은 타려식 방식이지만 조광을 할 수 있도록 구동부에 조광제어 신호가 중첩되도록 구성된 회로이며 최근에 무전극 광원을 조광하기 위해 시도되는 여러 방식 중 하나의 방식이다.

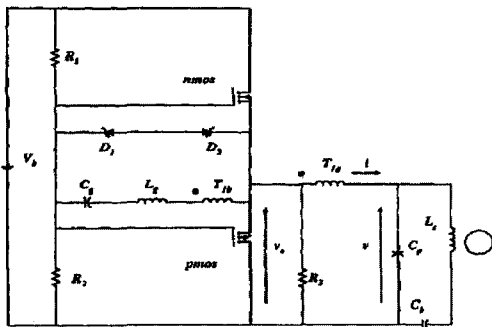
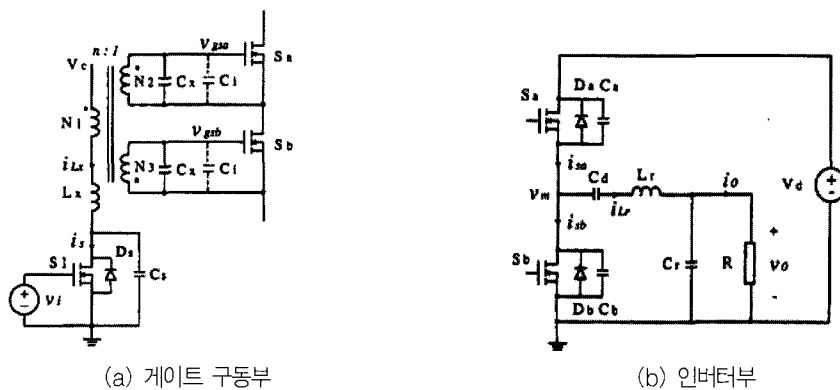


그림 9. Complementary 구동 방식의 자려식 인버터

4. 광원과 전원회로와의 결합

무전극 광원과 전원회로와의 효율적인 결합을 위해서는 실제 램프에 대한 특성이 파악되어야 한다. 기존의 형광등의 경우는 램프를 저항으로 등가시켜 안정기를 설계하는 것이 보편적이거나 무전극 광원의 경우는 유도방전에 기여하는 코어에 대한 특성 파악이 필요하며 또한 고출력이므로 광원이 정상 방전되기까지는 보다 복잡한 과정을 거치게 되어 정상상태에 도달하는 시간이 길어진다. 완벽한 특성을 모델링하는 것은 어렵지만 전원회로를 정합시키는데 필요한 모델은 유도가 가능하다.

방전된 상태에서 플라즈마의 길이에 따른 인덕턴스 성분은 존재하지만 매우 작은 값이기 때문에 램프 자체는 순수한 저항 $R_{eq} = V_{lamp} / I_{lamp}$ 로 근사화가 가능하다. 그리고 무전극램프는 동작시 램프 자체는 페루프를 형성하는 방전 플라즈마가 다수 턴으로 감긴 페라이트 코어를 통해서 마치 트랜스포머의 2차측에 1 턴으로 결합된 것으로 동작하므로 안정기측에서는 트랜스포머를 통해서 임피던스 변환이 생기면서 트랜스포머의 자화(magnetizing) 인덕턴스가 나타나게 되어 그림 12와 같이 병렬 또는 직렬 연결의 R-L부하로 유도된다. 그림 (a)는 Endura 램프에 대한 모델 예로 L_m 은 코어 1개의 자화인덕턴스이며, N은 코어



(a) 게이트 구동부

(b) 인버터부

그림 10. 타려식 인버터 방식

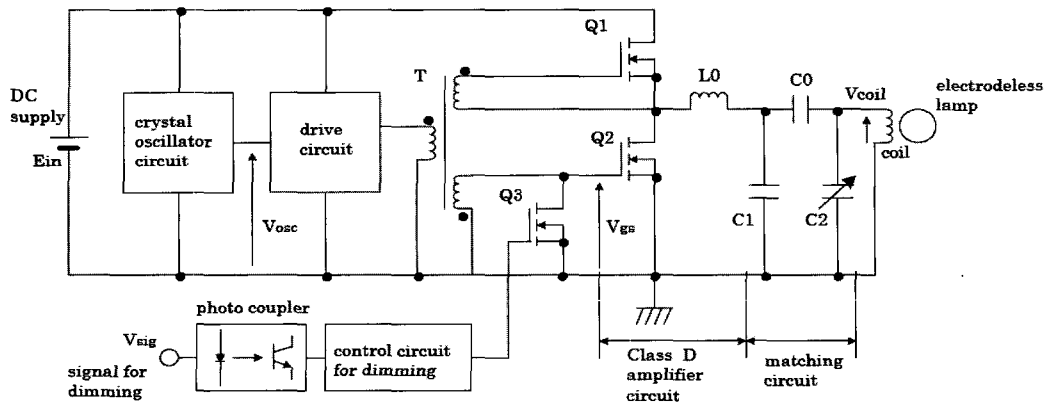
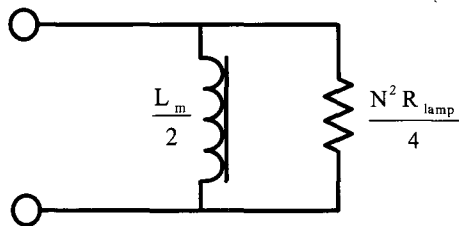
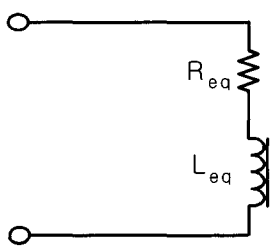


그림 11. 조광제어를 구현하는 타러식 인버터 방식

의 턴수, R_{lamp} 는 방전관이 점등되었을 때의 저항값이다. 대부분 병렬모델을 사용하지만 정합시 계산의 편의성에 따라 직렬 연결의 모델을 사용하기도 한다.



(a) 병렬 등가 회로



(b) 직렬 등가 회로

그림 12. 무전극 램프 모델

이 무전극 광원의 임피던스 값을 인버터의 공진회

로에 연결하면 회로적으로 효율적인 매칭이 되는 공진필터의 회로값을 계산할 수 있게 된다. 만약 수학적으로 적정 필터값을 유도하기가 어려우면 SPICE나 Saber, Psim, Simplorer 등의 시뮬레이션 도구를 사용하여 시행착오에 의한 반복 수행으로 유사한 값을 도출할 수 있다.

5. 무전극 광원용 전원의 전도성 EMI 필터

무전극 광원의 전도성 EMI 필터도 일반 전기기기 와 같은 구조를 갖게 되는데 필터의 구성방법은 특성에 맞게 다양하게 시도될 수 있다. 가장 많이 사용되는 필터의 기본적인 구조는 그림 13과 같이 LC 필터, π 필터 및 T 필터이다. 보다 강력한 필터를 위해서는 그림 (d)와 같이 다단 필터구조를 갖게 되는데 상용화된 전원의 경우 1단 또는 2단의 필터구조로 EMI를 해결하고 있다. EMI 규제에 만족하기 위해서는 동상모드(common mode) 및 차동모드(differential mode)에서의 EMI를 모두 규제해야 하므로 각각 그림 14와 같은 결합을 반영하고 있다. 이때 동상모드 또는 동상모드에서의 각 필터의 구조는 그림 13의 기본 구조들로 구성된다. 실제 전원장치에서 이들이 결

합된 구조는 그림 15와 같은 형태로 필터가 장착된다. 여기에서 모든 필터 소자를 사용하는 것은 가장 강력한 필터가 되며 실제 상용화된 제품에서는 발생하는 EMI의 특성에 따라 필터의 소자를 생략할 수 있기 때문에 보다 간단한 형태가 된다. 그러나 간략화된 필터로 EMI 규제를 만족하기 위해서는 PCB상의 패턴 및 부품의 실장측면에서 많은 노력이 필요하게 된다.

무전극 광원 시스템은 높은 신뢰성을 요구하므로 사용되는 필터의 부품들은 모두 규격에 맞는 제품을 사용해야 되고 커패시터에 대해서는 EMI 필터에서 사용되는 커패시터는 X, Y의 두 그룹으로 정의되어진다. X 커패시터는 차동모드를 제거하기 위해 상용 전원단에 붙이며 EN 132400 규격에 따라 표 1과 같이 분류된다. Y 커패시터는 동상모드 제거에 사용되며 상용전원 단이나 브리지 정류기 출력에서 새시, 실

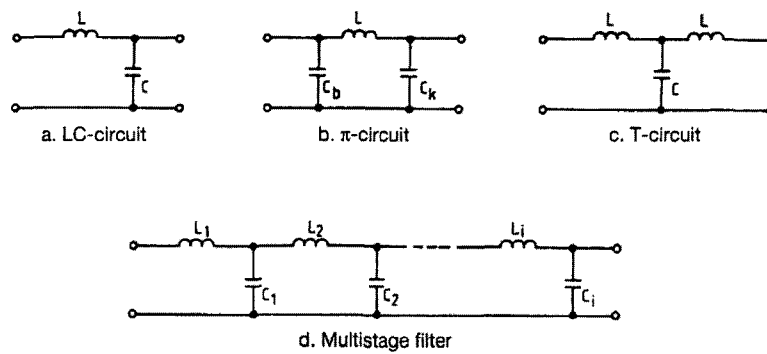


그림 13. 필터의 기본 구조

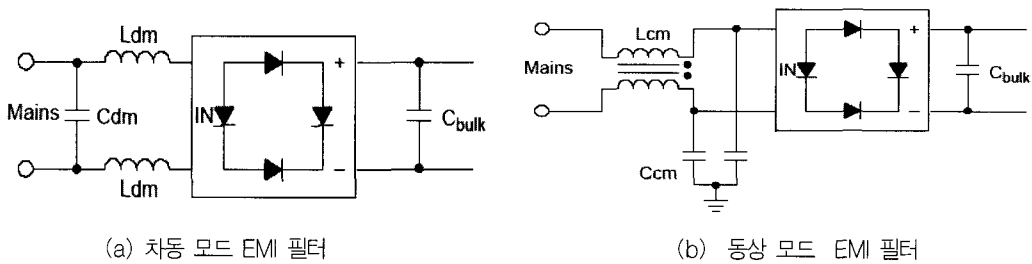


그림 14. EMI 필터

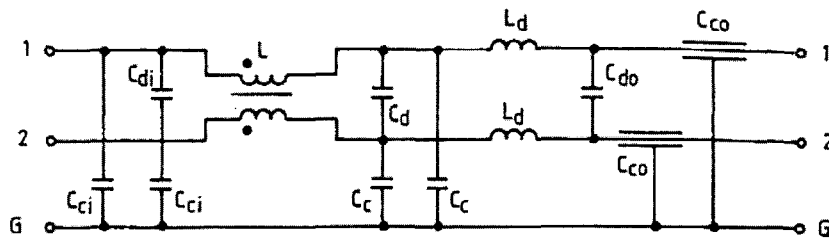


그림 15. 차동모드 및 동상모드가 결합된 EMI 필터

드 또는 접지와 연결된다. Y 커패시터의 최대값은 각 어플리케이션이 가지고 있는 최대 누설 전류량 (0.25~3.5(mA))에 규제를 받으므로 실제 구현시 무조건 키울 수가 없게 된다.

표 1. X 커패시터의 분류

Subclass	Peak Pulse Voltage In Service	IEC-664 Installation Category	Application	Peak Impulse Voltage V_p applied before Endurance Test
X1	> 2.5 kV ≤ 4.0 kV	III	High Pulse Application	$C \leq 1.0 \mu F$ $U_p = 4 \text{ kV}$
X2	≤ 2.5 kV	II	General Purpose	$C \leq 1.0 \mu F$ $U_p = 2.5 \text{ kV}$
X3	≤ 1.2 kV	-	General Purpose	None

표 2. Y 커패시터의 분류

Subclass	Type of Insulation Bridged	Rated Voltage (VAC)	Test Voltages for Quality Approval, Periodic and Lot-by-Lot Testing	Peak Impulse Voltage V_p applied before endurance
Y1	Double Insulation or Reinforced Insulation	≤ 250 V	4000 VAC	8.0 kV
Y2	Basic Insulation or Supplementary Insulation	≥ 150 V ≤ 250 V	1500 VAC	5.0kV
Y3	Basic Insulation or Supplementary Insulation	≥ 150 V ≤ 250 V	1500 VAC	none
Y4	Basic Insulation or Supplementary Insulation	< 150 V	900 VAC	2.5 kV

6. 결 론

본 논문에서는 무전극 광원용 전원이 하나의 제품으로서 완성되기 위해 필요한 내부의 회로 구현 문제에 대해서 정리하여 보았다. 역률 제어부의 회로, 인버터부의 회로, 광원과의 정합 문제 그리고 EMI 필터의 회로구조에 대해서 현재 사용되거나 연구되고 있는 방법들에 대해서 소개하여 최근의 회로 기술 경

향을 살펴보았다. 장수명을 보장해야 하는 무전극 광원시스템의 특성상 전원의 고신뢰성은 매우 중요하며 최근까지도 선진국의 제품이 보다 높은 신뢰성을 확보하기 위해서 계속 보완되고 있는 것이 현실이다. 우리나라에서도 지속적으로 기술이 개발되고 있기 때문에 가까운 시기에 선진국 수준에 진입할 것으로 보이나 이를 위해서는 보호회로 및 부품 관련 기술들이 보다 체계적으로 정립될 필요가 있다.

◇ 저 자 소 개 ◇



한수빈 (韓秀彬)

1958년 6월 9일생. 1977년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1997년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 현재 한국에너지기술연구원 전기·조명연구센터장.



박석인 (朴奭寅)

1974년 3월 19일생. 1997년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 1999년 포항공대 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 한국에너지기술연구원 연구원. 2005년 ~현재. 한국과학기술원 전산학과 전자전기공학전공 박사과정.



장우진 (張禹鎭)

1956년 5월 13일생. 1979년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 서울산업대학교 전기공학과 교수. 본 학회 부회장.