

특집: 전자식 안정기

전자식 안정기 시스템과 제어IC 관련 기술동향

류 태 하, 조 규 형

(한국과학기술원 전기 및 전자공학과)

1. 서 론

에너지 관리공단에 따르면 우리나라 연간 소비전력의 18%를 조명분야가 차지하며 이의 20% 정도를 감축시키면 1백만 kW급 발전소 1기의 발전량을 절감하고 온난화 원인인 이산화탄소 2백16만t, 아황산가스 1만2천5백만t, 질소산화물 7천6백t의 방출량을 줄일 수 있다고 한다. 조명시스템에 전자식안정기를 채택할 경우 소모전력의 25% 가량을 절감할 수 있으며, 램프의 광출력 및 수명을 증가시키는 부대효과까지 얻을 수 있어 전세계적으로 전자식안정기에 관련된 기술개발이 매우 활발히 진행되고 있다.^[1]

지금까지 사용되어 오던 자기식안정기는 50-60Hz 에서 동작되어 낮은 효율과 가청잡음 및 깜박임 등 여러 가지 단점을 가지고 있으나, 전자식안정기는 20kHz 이상의 고주파 스위칭을 통하여 램프를 구동하므로 기존 안정기에서의 단점을 해결하는 동시에 에너지절감을 비롯한 여러 가지 장점을 얻을 수 있다.^[2] 전자식안정기의 개발은 70년대부터 시작되었으나 현재까지 전세계적으로 보급율이 매우 낮은 상태이며, 기존의 자기식 안정기에 비해 제조가격이 매우 높고 시스템의 안정성이 낮은 것이 원인이다. 이는 전자식 안정기 회로가 전자회로 부품을 매우 많이 소요하기 때문이며, 개별소자부품의 수를 줄이고 필요한 성능을 얻을 수 있는 회로 구조에 관한 연구가 계속되고 있다. 근래에는 소모부품 감축을 통한 원가 절감 및 시스템 부피 축소, 회로의 안정성 향상 등의 효과를 얻기 위하여 제어 IC를 사용한 전자식안정기 개발이 관련업계에서 많이 시도되고 있다.

전자식안정기용 제어IC와 관련해서는 삼성전자가 지난 92년 국내에서 처음으로 전자식안정기용 IC인 KA7521을 개발한 후 KA7522, KA7531로 업그레이드해 왔으며, 98년에는 8핀으로 된 KA7540을 발표해 국내외 전자식안정기 업체들

을 대상으로 판매를 추진하고 있다. (주)한손테크놀로지는 자려(self exciting)식 구동을 하면서 타려(external exciting)식 구동에서와 같은 기능을 수행하는 혼합형 제어방식의 전자식안정기 전용IC를 개발해 관련업계의 주목을 받고 있으며, (주)다중채널도 디지털 제어방식으로 밝기조절 및 원격제어가 가능하도록 설계해 중앙통제시스템에 적용할 수 있는 IC를 개발하는 등 국내 벤처기업에서의 전자식안정기 전용 IC 개발도 활발히 진행되고 있다.

국외에서는 Micro Linear사에서 ML4830 시리즈를 발표했으며 역률개선회로와 공진형 인버터의 제어가 모두 가능하도록 설계하여 단일IC에서 전자식안정기 시스템 전체를 제어할 수 있다는 것이 특징이다.

그러나 아직까지 전자식 안정기용 제어 IC를 사용한 시스템이 고기능을 구가할 수 있다는 장점에 비해 제조원가의 저감효과는 상대적으로 낮아 IC화에 따른 충분한 이득을 얻지 못하고 있다. 이것은 IC를 사용함에도 IC 주변회로를 구성하기 위한 부품이 추가로 요구되며, 제어 IC가격이 고가여서 전체 제조원가의 상당부분을 차지하기 때문이다.

본고에서는 전자식안정기 중 가장 일반적이고 보급율이 높은 형광등용 전자식 안정기와 관련된 제어 IC를 중심으로 기술 동향을 분석하고 전용 제어 IC를 통한 전자식 안정기의 저변확대를 위해 필요한 기술개발 방향을 살펴본다. 먼저 형광등용 전자식 안정기 시스템을 이해하고 램프 구동에 필요한 제어 회로의 기능 및 설계 시 고려해야할 사양에 대하여 알아본다.

2. 형광등용 전자식 안정기 시스템

현재 국내외 반도체 업체를 비롯한 전자식안정기 관련업체에서 출시하거나 개발 중인 전자식안정기는 적용램프의

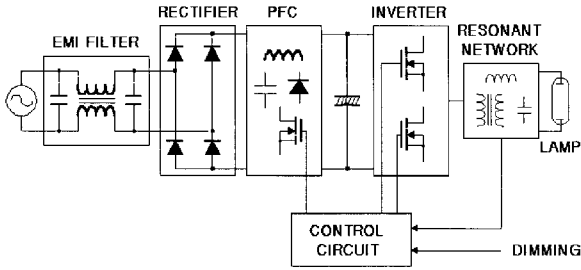


그림1 전자식 안정기 시스템 구성도

종류, 용도 및 출력크기, 필요기능 등에 따라 다양하고 이에 따른 회로 구성 또한 차이가 있으나, 전자식안정기를 설계 하는데 필요한 기본 구성은 대체로 유사하여 상용의 AC전원으로부터 DC전원을 만들기 위한 정류기, 고조파 성분을 제거하기 위한 필터, 역률개선(PFC : Power Factor Correction)회로, DC전원으로부터 램프에 전력을 공급하는 공진형인버터, 역률개선회로와 주전력회로를 제어하는 제어회로 등으로 구성된다. 공진형인버터는 영전압 스위칭(ZVS)이 가능하여 안정기의 효율이 증가하고 수동형 역률개선 방식에서도 비교적 높은 역률을 얻을 수 있어 현재 거의 대부분의 전자식 안정기에서 사용되는 구조이며, 공진현상을 이용하여 전력스위치를 자체적으로 구동하는 자력(self-exciting)방식의 전자식 안정기가 현재까지 많이 사용되고 있다.

그림 1은 별도의 제어회로를 통한 타력(external-exciting)방식의 형광등용 전자식안정기 시스템의 구성을 나타내며, 스위칭 주파수 제어로 램프에 공급되는 전력을 조절하는 조광(dimming)기능을 가질 수 있고, IC화를 통한 각종 보호회로와 다양한 제어기능을 추가할 수 있어 기존의 자력식에 비해 장점을 가진다. 또한 제어 IC를 이용한 타력방식의 전자식안정기는 외부로부터 아날로그 및 디지털 신호를 받아 주파수제어가 가능하도록 설계할 수 있으므로 지능형 중앙통제시스템을 갖춘 건물의 조명시스템으로 적합하다.

따라서 고성능 전자식안정기를 개발하기 위해서는 시스템에 적합한 전용 제어 IC설계가 요구되며, IC에서의 개별부품을 이용한 회로의 대체정도가 제조원가와 직결되므로 전자식 안정기용 제어 IC의 중요성이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 표 1에서는 전자식안정기용 제어IC에서 요구되는 기능을 정리하였으며, 대표적인 전자식안정기 전용 IC인 KA7540(8핀:삼성전자) 및 ML4831(18핀:Micro Linear)을 대상으로 적용 여부를 나타낸 것이다.

필라멘트 예열(soft start)과 조광(dimming)기능 및 원격 제어(remote control)기능, 일정전력제어기능 등을 제외한

표 1 전자식 안정기용 IC설계시 고려사항

기 능	비 고	
	KA7540	ML4831
Soft start	0	0
Power regulation	×	×
Dimming	0	0
Digital remote control	×	×
Power factor correction	×	0
Under voltage lockout	0	0
Over current protection	×	×
Over temperature protection	×	0
Over voltage protection	×	0
No lamp protection	0	×
Cross connection protection	×	×
Short circuit protection	×	×
Temperature compensation	×	×

나머지 사항은 제어 IC를 채택한 시스템의 안정성을 높이기 위한 보호회로와 관련된 것이다. 이와 같이 IC에 필요한 기능이 다양하므로 기능을 추가할수록 IC의 출력 핀 수가 증가하고 이에 따른 주변부품의 수도 증가하여 제조원가를 높이는 원인이 된다. 따라서 IC 내부적으로 필요 기능을 처리하도록 하여 출력 핀 수를 줄이는 것이 고기능 전자식 안정기용 IC설계기술의 핵심이라고 할 수 있다.

3. 역률개선(PFC)회로

역률개선회로는 AC전원에서 안정기로 유입되는 전류를 입력전압과 같은 모양과 위상으로 맞추는 역할을 하며, 전원선에 흐르는 전류의 고조파를 제한하고 무효전력을 감소시켜 손실을 줄이는 기능을 한다. 따라서 역률개선은 국가적인 에너지 절감차원에서 매우 중요하여 관련연구도 활발하게 이루어지고 있다. 전자식 안정기용의 역률개선회로는 크게 수동소자만으로 이루어진 수동형 역률개선(passive PFC)과 제어회로와 스위치를 포함하는 능동형 역률개선(active PFC)의 두 가지로 나눌 수 있다.^[3]

그림 2는 대표적인 수동형 역률개선회로인 Valley fill(VF) PFC 방식과 Charge pump(CP) PFC 방식을 혼합하여 역률개선 특성을 향상시킨 Improved valley fill(IVF) PFC 회로와 동작 특성을 보여주는 것으로 0.97이상의 역률을 얻을 수 있다.^[4~5]

IVF PFC회로는 공진형 인버터의 자체적 공진특성을 이용하여 단순한 몇 개의 수동소자 만으로 높은 역률을 얻을 수

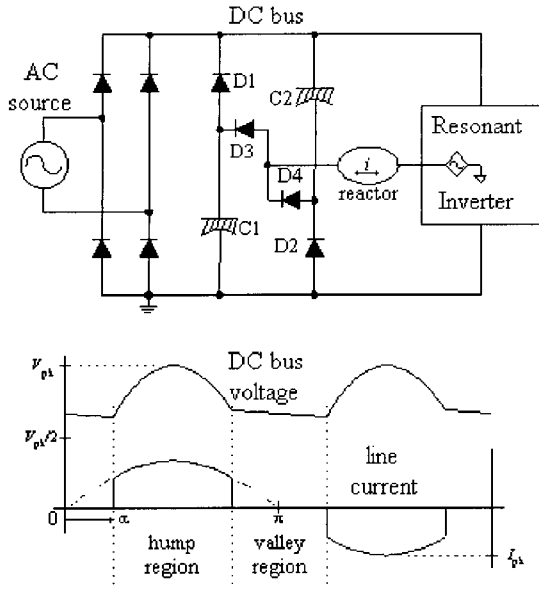


그림 2 Improved valley fill PFC회로 및 동작 특성

있으며, DC bus 전압의 최대값이 입력전압의 최대값과 같으므로 내압이 낮은 전력용 스위치로 인버터를 구성할 수 있어 전자식 안정기의 제조 단가를 낮출 수 있는 장점을 가진다. 반면 DC bus 전압이 변하므로 출력 전류에 리플(ripple)이 생길 수 있으며 부하 변동에 따른 능동제어가 안되는 단점도 있다.^[6]

단상(single-phase) AC전원에 대한 능동형 PFC 회로 및 제어방식에 관한 다양한 연구결과가 발표되었으나, 현재까지 전자식안정기용으로는 대부분이 Boost PFC 회로를 사용하는데 이는 높은 역률(>0.99)과 동시에 높은 효율을 얻을 수 있는 Boost PFC의 장점 때문이다. 제어방식에 따른 인덕터 전류의 모양이 달라질 수 있으며 DCM(Discontinuous Conduction Mode) Boost와 CCM(Continuous Conduction Mode) Boost로 분류할 수 있다. DCM Boost는 고정주파수(constant frequency) 및 가변주파수(variable frequency) 방식으로 제어가 가능하며, 인덕터 전류는 불연속적이고 최대치가 커서 EMI 및 소자의 전류 스트레스가 커진다.^[7] CCM Boost는 최대전류제어(peak current control), 평균전류제어(average current control) 및 이력제어(hysteric control) 등의 방식으로 제어가 가능하며 연속적인 인덕터 전류 모양을 만들 수 있어 DCM에 비해 작은 EMI가 발생하므로 필터의 크기가 작아지고 전류 스트레스도 작다는 장점이 있으나 복잡한 제어회로를 구성해야하는 단점이 있다.^[8] 그러나 IC화를 통한 능동형 PFC를 구현하고자 할 때는 CCM Boost PFC방식으로 접근하는 것이 바람직하며, 이는 IC 내부 제어회로를

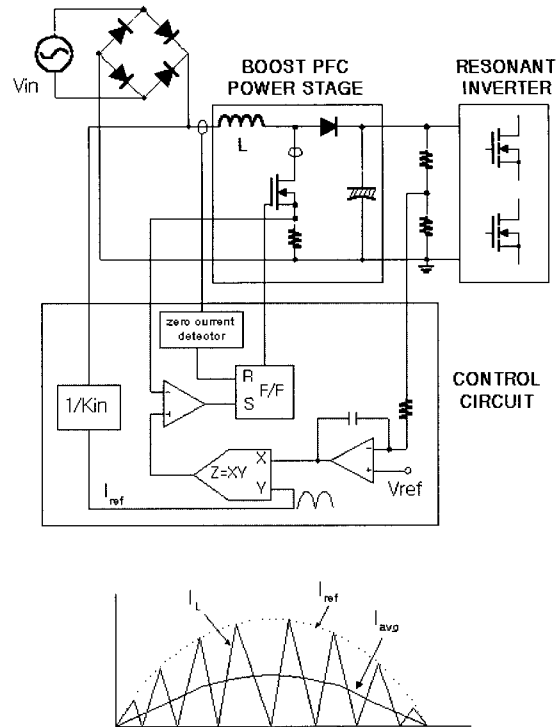


그림 3 Critical conduction control(KA7526)

복잡하게 구성하는 것에 대한 별다른 제약이 따르지 않기 때문이다. 그림 3은 삼성전자의 PFC전용 IC인 KA7526을 이용한 역률개선 회로 구조와 전류 모양을 나타내며, 인덕터 전류를 검출하여 영전류가 되는 지점에서 스위치를 ON하고 스위치를 통하여 흐르는 전류가 입력전압에 비례하는 최대값에 이를 때 OFF하는 방식으로 제어를 한다. 이것은 DCM과 CCM의 경계점에서 동작하는 것이 특징이며 CCM에 비해 EMI, 전류 스트레스 등의 면에서는 나쁘나 Oscillator가 없이 동작한다는 장점이 있다.

그림 4는 평균전류제어 방식의 CCM Boost PFC회로 구조와 전류 파형을 나타내는 것으로 ML4831의 내부 PFC회로가 이와 같은 방식으로 구성되어 있으며, DCM 방식이나 최대전류제어방식에 비해 좋은 성능을 발휘한다.

이밖에도 Buck-Boost, Flyback, BIFRED, BIBRED PFC 등과 같은 다양한 Topology가 발표되었으나 아직까지는 전자식 안정기용의 Boost PFC 방식이 일반적으로 사용되고 있으며, 일부에서는 Boost PFC와 같은 능동형 역률개선 방식과 Valley Fill과 같은 수동형 역률개선 방식을 혼합하여 소자의 스트레스를 줄이고 작은 용량의 부품을 사용할 수 있는 방안에 대한 연구도 진행 중이다.

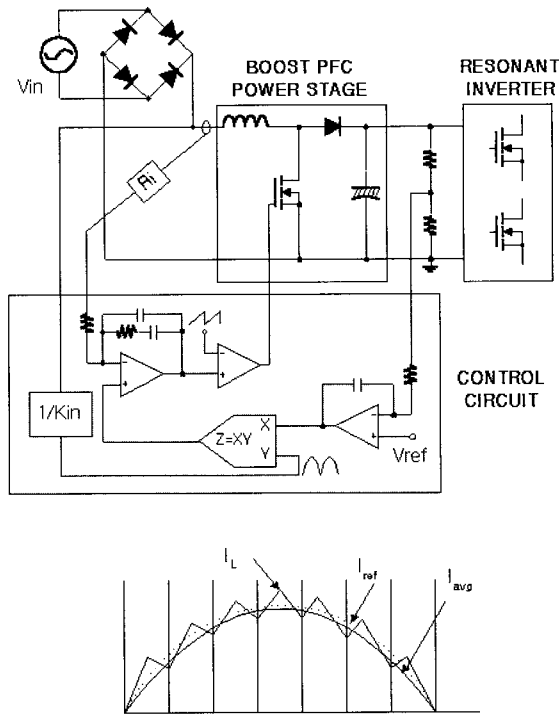


그림 4 Average current control(ML3841)

4. 공진형 인버터 제어

형광등용 전자식안정기에 사용되는 인버터는 일반적인 다른 용도의 인버터에 비해 현저히 긴 시간동안 동작을 보장하고 높은 효율을 얻을 수 있어야 하므로 거의 모든 시스템에서 공진형인버터를 사용한다. 전자식안정기는 인버터의 구동 방식에 따라 자려식(self exciting), 타려식(external exciting) 및 자려식과 타려식의 혼합형(mixed mode exciting)으로 분류 할 수 있으며, 타려식과 혼합형은 별도의 제어 회로를 사용하여 스위칭 주파수를 가변할 수 있어 조광(Dimming)이 가능하나 자려식은 공진회로의 L, C 값에 따라 스위칭 주파수가 고정되므로 전력제어가 불가능하다.⁹⁻¹⁰⁾

그림 5 (a)는 자려식 공진형 인버터로 게이트 구동 트랜스포머에 의해 자동적으로 MOSFET이 구동된다. 이는 트랜스포머의 특성상 1차측에 흐르는 램프 전류보다 2차측의 게이트 구동 전류의 위상이 앞서기 때문이며, 스위칭 주파수는 자동적으로 회로의 공진 주파수보다 조금 높아져 영전압 스위칭(ZVS)이 이루어진다. 따라서 이러한 방식은 게이트 구동 트랜스포머 이외에는 별도의 제어회로가 필요 없어 싼 가격의 전자식 안정기를 구성할 수 있다. 그러나 자려식은 초기동작을 위해서 별도의 트리거(trigger)회로가 요구되며 조광과 같은 고기능의 제품에는 적용할 수가 없다.

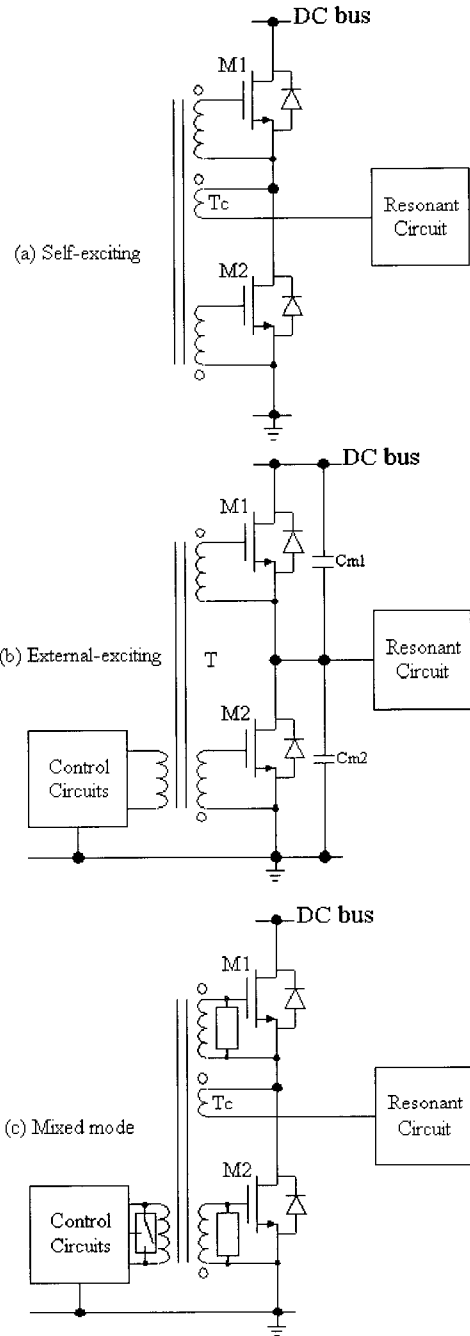


그림 5 공진형 인버터의 구동방식에 따른 분류

그림5 (b)는 타려식 구동 공진형 인버터로 제어회로에서 직접 트랜스포머의 1차측을 구동하여 MOSFET의 게이트 구동 전류를 공급하는 방식이다. KA7540과 ML4831 모두 이 방식을 사용하며 타려식의 전형적인 형태라고 할 수 있다. 이와 같은 방식으로 MOSFET을 구동하고자 할 때 제어IC의 출력

전압은 수십 Volt 정도를 유지해야 하며 게이트 구동에 필요한 전류를 순간적으로 공급할 수 있어야 하므로 1W 이상의 소모전력을 가지며, 제어 IC의 생산 또한 Bipolar나 Bi-CMOS와 같은 높은 내압을 견디는 공정을 사용해야 하므로 범용의 CMOS공정을 이용하는 IC에 비해 제조단가가 높은 단점이 있다.

그림 5 (c)는 헨슨테크놀로지에서 개발한 공진형인버터 구조이며, 기존의 타려식에서와 같은 원리로 MOSFET이 ON되고, 제어 IC에서 트랜스포머의 보조권선을 단락시키는 펄스 신호를 발생시켜 MOSFET을 OFF시키는 타려방식을 취하는 형태이다. MOSFET이 ON된 후 OFF까지의 시간을

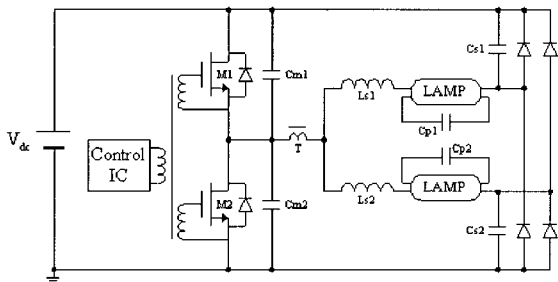
조절하면 스위칭 주파수가 조절되고 제 IC에서 발생하는 펄스 신호를 외부에서 조절 가능하도록 IC가 설계되어 있어 기존의 타려식에서와 동일한 조광기능을 수행한다.

또한 별도의 게이트 회로에 의한 고속 스위칭이 가능하여 스위칭 손실을 줄일 수 있으며 조광(Dimming)상태에서의 스위치 발열을 최소화하여 시스템의 안정성을 높일 수 있다. 특히 이러한 혼합형 구조에서의 제어 IC는 보조권선을 단락시키는 스위치의 구동신호만 발생시키면 되므로 타려식에서와 같은 높은 구동전압이 필요 없어 범용의 5V CMOS 공정을 이용한 낮은 가격의 고성능 제어 IC 생산이 가능하고 소모 전력 또한 수mW 정도라는 장점을 가진다.

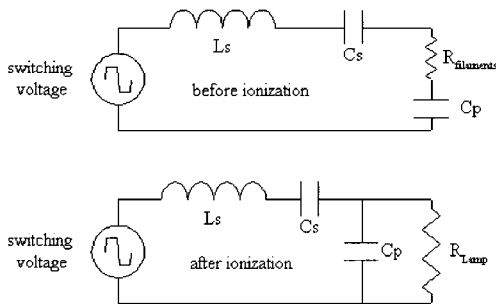
이상의 세 가지 형태 이외에도 게이트 구동 트랜스포머가 없이 IC에서 직접 게이트를 구동하는 방식도 있으나 제어 IC가 500V정도의 내압을 가져야 하므로 가격이 높아 형광등용 전자식 안정기에는 거의 사용되지 않으며, 타려식 구동방식 중 접지에 연결된 MOSFET은 IC에서 직접 구동하고 DC bus에 연결된 MOSFET은 트랜스포머를 통하여 구동하는 방식도 있으나 일반적이지는 않다.

그림 6에서는 타려식이나 혼합형으로 구동하는 경우에 대한 직렬공진형 하프브리지 전자식안정기(half-bridge series resonant electronic ballast)회로와 램프의 방전 여부에 따른 공진 특성과 동작 주파수를 보여준다. 그림 6 (a)는 그림 5의 (b), (c)에서 직렬 공진회로를 추가한 전체 공진형인버터 구조를 나타낸 것이다. 그림 6 (b), (c)에서와 같이 인버터의 처음 구동 시에는 램프의 방전이 이루어지지 않은 상태이므로 램프는 매우 큰 저항값을 가지며 이 상태에서는 공진회로의 Q factor가 매우 크고 공진 주파수도 높다. 이 때 램프의 수명 보호를 위해 통상 공진주파수 보다 상당히 높은 주파수로 안정기를 동작시켜 작은 전류가 수백msec 동안 필라멘트를 통해서 흐르도록 하는 과정이 필요하며 이러한 과정을 soft start 또는 preheating이라고 한다. 형광등의 경우 방전이 이루어지면 등가 저항이 수백Ω 정도가 되어 Q가 작아지는 동시에 공진 주파수가 낮아진다. 방전된 이후의 공진 주파수는 최대 출력을 얻고자 하는 주파수 보다 조금 낮은 위치에 오도록 L, C 값을 정하며, 스위칭 주파수를 높이면 출력이 낮아지는 조광(Dimming)상태가 되며 항상 영전압 스위칭(ZVS)이 보장된다.

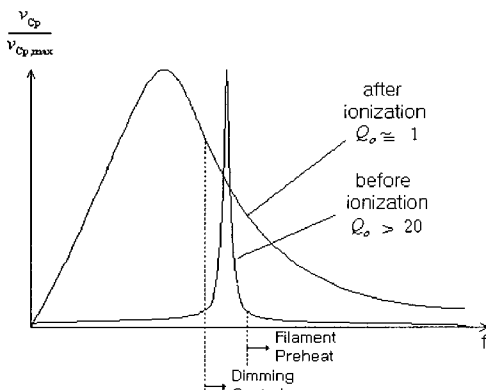
전자식 안정기의 기동에서부터 램프의 방전과 Dimming상태까지의 일련의 과정이 IC에서 조절이 되어야 하며 이는 곧 동작 상태에 따른 적절한 주파수 제어가 이루어져야함을 의미한다. 그림 7은 그림 6과 같은 하프브리지 직렬공진형 안정기의 방전 전후의 동작 주파수 변화의 예를 보여주는 것으로 램프의 종류나 특성에 따른 필라멘트 예열 시간과 방전에 필요한 시간 등을 적절히 조절되도록 IC를 설계하는 것이 중요하다.



(a) Half-bridge series resonant electronic ballast



(b) Equivalent resonant circuit



(c) Resonance curve

그림 6 하프브리지 직렬공진형 전자식 안정기

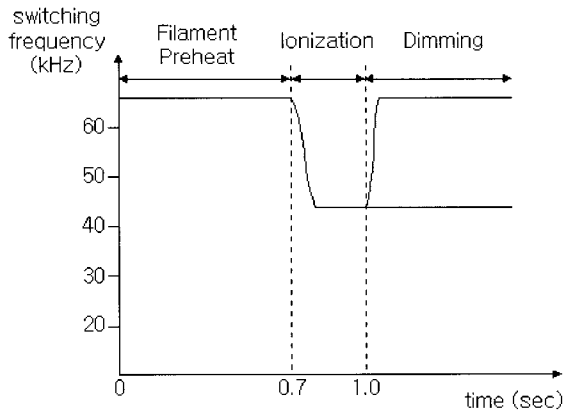


그림 7 방전 전후의 스위칭 주파수 변화

형광등용 전자식안정기의 회로는 하프 브리지(half-bridge)형 인버터, 풀브리지(full-bridge)형 인버터, 직렬 공진형, 직병렬 공진형 등을 비롯하여 근래에는 PFC 회로와 인버터를 단일 스위치로 구동하는 방법에 이르기까지 다양한 연구가 이루어지고 있다. 이와는 다르게 전자식안정기 전용 제어IC에 있어서는 하프브리지형 인버터와 Boost PFC회로에 대한 제어IC가 생산되는 정도이며, 대부분 실제 전자식 안정기 제조업체에서 필요로 하는 기능 중 일부만을 갖춘 수준이어서 전자식 안정기 전용 제어IC 설계와 관련한 많은 연구가 필요하다.

5. 결 론

앞서 언급했듯이 조명 분야에서 전자식안정기가 가져오는 국가 경제적 이익은 상당한 수준임에도 불구하고 아직까지 전자식안정기의 보급은 초기단계에 머물고 있다. 이는 현재까지 개발된 전자 안정기가 기존의 자기 안정기에 비해 제조 단가가 월등히 높고 안정성 보장 정도가 크지 않다는 것이 중요한 이유이다. 지금까지 산업계와 학계에서 이러한 문제를 해결하고자 하는 많은 연구 결과가 발표되었으나 전자식안정기의 보급에 크게 기여하지는 못하였다.

기존 전자식안정기의 구조를 변경하거나 새로운 회로를 제안하더라도 개별 부품을 이용하는 수준에서는 소자 수와 기능 면에서 한계가 있을 수밖에 없다. 그러므로 전자식 안정기가 널리 보급되기 위해서는 전용 제어IC의 설계를 통한 기존의 문제점을 해결하는 것이 바람직한 방향이나 현재 국내 대부분의 전자식 안정기 업체가 중소기업이고 IC설계와 관련된 기술을 보유한 업체는 거의 없는 실정이다. 따라서 전자식 안정기와 관련된 제어IC 설계는 기존의 반도체 회사뿐만 아니라 이와 관련된 산학연이 공동 연구를 통하여 보유 기술과 정보의 교환이 필요하며 이러한 과정에서 전자식안정기 제조와 관련

한 업계의 기술적 요구사항이 조속한 시일 내에 해결되어 전자식안정기 사용이 일반화될 수 있는 기초가 다져지길 기대한다.

참 고 문 헌

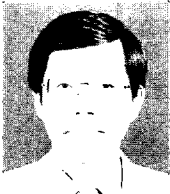
- [1] E. E. Hammer, "High frequency characteristics of fluorescent lamp up to 500kHz", J. Illuminating Engineering Society, pp.52~61, Winter 1987.
- [2] R. R. Verderber, O. C. Morse and F. M. Rubinstein, "Performance of electronic ballast and controls with 34- and 40watt F40 fluorescent lamps", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 25, no. 6, pp.1049~1059, Nov/Dec. 1989.
- [3] C. Zhou, "Design and analysis of an active power factor correction circuit", M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, Sept. 1989.
- [4] M. H. Kheraluwala and S. A. El-Hamamsy, "Modified Valley Fill High Power Factor Electronic Ballast for Compact Fluorescent Lamps", IEEE PESC, pp.10~14, 1995.
- [5] W. Chen and F. C. Lee, "An Improved Charge Pump Electronic Ballast with Low THD and Low Crest Factor", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 12, no. 5, pp.867~875, Sept. 1997.
- [6] G. Chae, Y. S. Youn and G. H. Cho, "High power factor correction circuit using valley charge-pumping circuit for low cost electronic ballasts", IEEE PESC, pp.2003~2008, 1998.
- [7] K.H. Liu, Y. L. Lin, "Current waveform distortion in power factor correction circuits employing discontinuous-mode boost converters", IEEE PESC Record, pp.825~829, 1989.
- [8] Chen Zhou, Milan M. Jovanovic, "Design trade-offs in continuous current-mode controlled boost power-factor correction circuits", High-Frequency Power Conversion Conference Proceedings, pp.209~220, 1992.
- [9] R. L. Steigerwald, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 3, no. 2, pp.174~182, Apr. 1988.
- [10] M. C. Cosby and R. M. Nelms, "A Resonant inverter for electronic ballast applications", IEEE Trans. Industry Electronics, vol. 41, no. 4, pp.418~425, Aug. 1994.

〈 저 자 소 개 〉



류태하(柳泰夏)

1969년 2월 2일생. 1994년 경북대 공대 전자공학과 졸업. 1997년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 전기 및 전자공학과 박사과정.



조규형(曹圭亨)

1953년 4월 19일생. 1975년 한양대 공대 전자공학과 졸업. 1977년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1981년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(공학). 1982년~1983년 Westinghouse R&D C researcher. 1984년~1991년 KAIST 전기 및 전자공학과 부교수. 1991년~현재 동 대학원 전기 및 전자공학과 교수.