다기능 조명 에너지 절약 시스템

이 성룡, 고 성훈, 조 성필
군산대학교 공과대학 전자정보공학부

Multi-functional Lighting Energy Saving System

Seong-Ryong Lee, Sung-Hun, Ko, Sung-Pil Cho
School of Electronic & Information Eng. Kunsan National University

Abstract - 본 연구에서는 조명기기의 에너지 절약 및 전력품질 개선 기능을 갖는 다기능 에너지 절약 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 부하의 적정전압을 유지하기 위한 전압제어형 인버터와 계통의 고조파 저감 및 단위역률 제어를 위한 전류제어형 인버터가 병렬로 연결된 형태로 기존의 단권 변압기를 이용하는 절전 장치의 탭 절환시의 스파이크 및 변압기 소음 문제 및 반도체 소자에 의한 절전장치의 에너지 회생문제를 해결할 뿐 아니라 전압제어형 인버터의 용량은 정격부하의 약 10%이내이며, 전류제어형 인버터의 용량은 정격부하의 약 30%이내로 시스템의 소형 경량화 및 가격 하락의 장점을 가진다. 본 연구에서는 기존의 절전장치들의 문제점을 이론적 해석 및 실험을 통하여 설명하고 제안된 시스템의 동작원리 및 제어 알고리즘을 설명하고 시뮬레이션을 통하여 시스템의 유용성을 확인하였다.

1. 서 론

조명기기에 사용되는 에너지는 공공서비스 및 주거용 소비전력의 40%이며 그 중의 형광등(FL : Fluorescent Lighting) 부하는 약 20%로 많은 비중을 차지한다. 이런 조명기기에 사용되는 에너지를 절약하기 위해서 고효율 조명기기 개발 및 적용)과 조명시스템 제어에 관한 연구가 진행되고 있지만 전력절감 효과가 뚜렷한 장점이 있는 반면에 높은 시스템 구축비 및 인건비와 설치 시간 등의 제약으로 보급·확산에 어려움을 겪고 있다[1]-[2]. 여기서, 형광등은 입력전압이 1% 상승하면 온도는 0.6%로 상승하며, 정격전압의 110%의 전압에서는 수명이 50~74%까지 단축된다. 하지만 형광등의 입력전압을 정격전압보다 낮게 공급하게 되면 수명은 큰 폭으로 연장되는 것에 비해 광속은 10% 범위내에서 거의 변하지 않는다. 또한, 건물의 조도 설계시 형광등의 보수 주기 말기에도 규정된 최소광속을 유지하기 위하여 일반적으로 규정보다 높게 선정하게 된다. 이는 형광등의 입력전압을 정격전압보다 낮게 공급하더라도 규정된 광속을 유지할 수 있어 실제 사용자는 불편함이 없이 에너지를 절약할 수 있음을 의미한다. 또한, 형광등과 같은 전통적인 비선형 부하의 사용 증가는 계통의 역률 저하 및 고조파 발생 등의 전력의 품질을 악화시킨다. 따라서 조명전력의 에너지 생산, 절약 그리고 이용의 합리화의 통합적 관점에서 최소의 비용으로 절감효과를 극대화하기 위한 에너지 절약시스템의 개발이 필요하다.

그러므로, 본 논문에서는 조명기기의 에너지 절약 및 계통의 전력품질을 개선할 수 있는 다기능 조명 에너지 절약 시스템을 제안한다. 또한, 제안된 시스템의 동작원리 및 제어 알고리즘을 설명하고 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 통해 유용성을 확인하였다.

2. 다기능 조명 에너지 절약 시스템

2.1 기존의 강압형 절전장치

일반적으로 전기에너지 절감을 위해 조명기기에 사용되는 절전장치들은 부하에 인가되는 전압을 강하하여 이의 비율만큼 소비에너지를 저감하는 방식이다. 이는 전기공급규정에 전력회사로부터의 공급전압이 변동하더라도 (우리나라의 경우 ±6%), 전기전자기기가 정상적으로 작동·운전되도록 하기 위하여 모든 기기는 정격전압의 ±10이내까지 정상 운전 되도록 설계·제작하도록 규정하고 있기 때문에 가능하다. 이의 결과로 기기제작 시 제조법규를 만족하기 위해서 이용전압 범위 내에서 출력특성을 보장하도록 과잉 설계(Over Design)해야 되며, 실제 정격전압 인가 시에는 공급과잉으로 불필요한 전력을 낭비하게 되기 때문에, 에너지 절감 효과를 얻기 위한 적정전압을 유지하기 위하여 공급전압을 강압 또는 승·강압하여 운전함으로서 절전 효과를 얻게 된다. 기존의 절전장치들은 크게 단권변압기(또는 상호유도 리액터)에 의한 방법과 반도체 스위치에 의한 부하전압을 제어하는 방법으로 구분할 수 있다[3]-[5].

1) 단권변압기 이용 절전장치

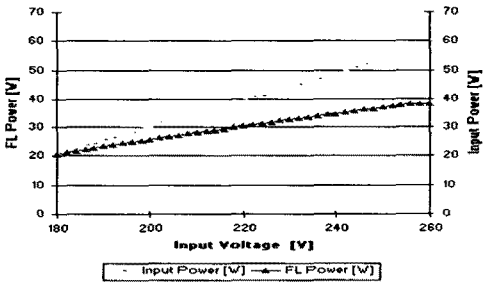
- 강압형 절전장치 : 단권변압기 특성을 이용하여 부하전압을 항상 계통전압보다 낮게 제어하는 방식으로 단권변압기의 탭 변환에 의하여 부하의 전압을 입력 계통 전압에 관계없이 에너지 절감 효과를 극대화하기 위한 최적의 전압으로 제어하게 된다. 이를 위해서는 서보모터를 이용하거나 탭 절환 스위치의 사용이 필수이고, 이 때문에 탭 절환 시 접점에서 스파이크 또는 리액터 에너지에 의한 서지가 발생하고, 변압기 운전시의 소음 등의 단점이 있다. 하지만, 에너지 절감을 위해 강하하는 전압을 제어하면서 생기는 에너지를 전원 측에 그대로 회생시킬 수 있기 때문에 에너지 절감 효과가 크고, 비교적 쉬운 방법으로 구현이 가능하기 때문에 가장 많이 사용되고 있는 장치이다.

- 승강압형 절전장치 : 부하전압을 승압 또는 강압이 가능하도록 제어하는 승·강압형 절전장치로서, 기본 원리는 강압형 절전장치와 같지만 계통의 전압이 부하 에너지 절감을 위한 적정 부하전압 보다 작게 인가될 때, 승압제어가 불가능한 강압형 절전장치의 단점을 개선하기 위한 방법으로 승압 또는 강압 제어가 가능하도록 1 차측에 센터 탭이 있는 방식이다. 따라서 승·강압형 절전장치는 강압형 절전장치의 장점과 단점은 같으며 다만, 승·강압이 가능하기 때문에 강압형 절전장치에 비하여 입력전압의 범위가 더 넓다는 장점이 있다.

2) 반도체 소자에 의한 강압형 절전장치 : 반도체 스위치를 이용하여 부하전압을 제어하는 방식으로 단권변압기 이용 절전장치의 단점인 탭 절환 시의 스파이크 문제와 변압기 소음 등의 문제를 해결할 수 있지만, 에너지 절감을 위해 강하하는 전압을 제어하면서 생기는 에너지를 전원 측에 회생(regeneration)시키지 못하고, 저항에서 소모하기 때문에 에너지 절감 효과가 단권변압기 이용 절전장치 보다 작은 단점이 있다.

이상과 같은 기존의 절전장치들은 가정용의 소 용량부터 산업응용의 대용량에 이르기까지 교류전원을 사용하는 곳에서 부하의 소비에너지를 절감하기 위하여 다양하게 적용되고 있다. 그러나 단권변압기 이용 절전장치의 탭 절환 시의 스파이크 및 변압기 소음문제, 반도체 소자에 의한 절전장치의 에너지 회생문제 뿐만 아니라 이러한 방식은 단순히 전압만을 제어함으로써 형광등과 같은 전통적인 비선형 부하에 적용할 시 고조파 및 역률 같은 전력품질은 개선할 수 없다.

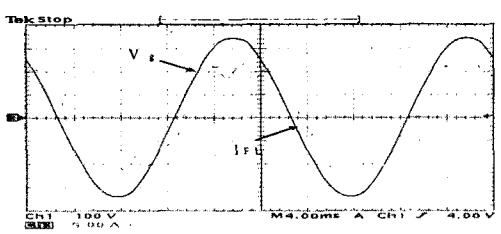
그림 1~3은 에너지 절감효과를 위한 절전장치의 실험 파형으로 180V~260V의 부하전압을 2V단위로 변경하여 측정하였다. 그림 1은 부하전압의 변동에 따른 입력 전력(input power)과 부하전력(FL power)의 측정결과 그래프이다.



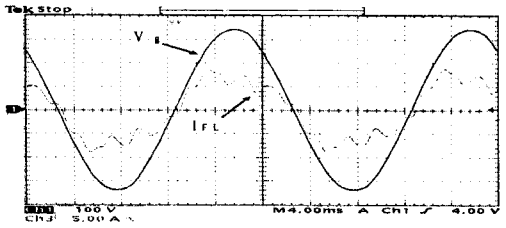
<그림 1> 부하전압에 따른 입력전력 및 FL 전력 측정 결과

그림 1에서처럼 부하전압이 240V에서 180V(25%)로 변동할 시 입력전력은 49%로 감소하는 반면 FL 전력은 40%만 감소됨을 확인할 수 있으며 부하전압이 증가할수록 입력전력과 FL 소비 전력의 차이가 커지며 효율이 저하됨을 알 수 있다. 따라서, 부하전압을 작게 제어하면 에너지 절약 효과 뿐 아니라 효율향상도 기대할 수 있다.

그림 2는 계통의 전압(V_g) 및 전류(I_{FL})의 실험파형으로 (a)는 FL에 계통을 직접 연결했을 때의 파형이며 (c)는 절전장치를 이용하여 부하 전압을 200V로 강압했을 때의 파형이고 그림 3은 부하전압의 변화에 따른 역률 측정 그래프이다.

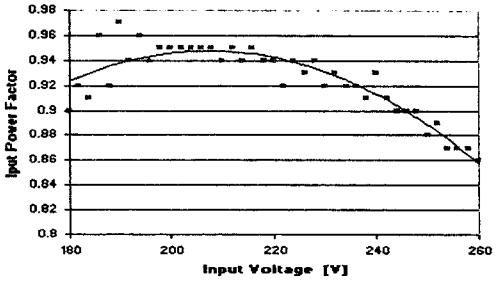


(a) 계통에 직접 연결시



(b)

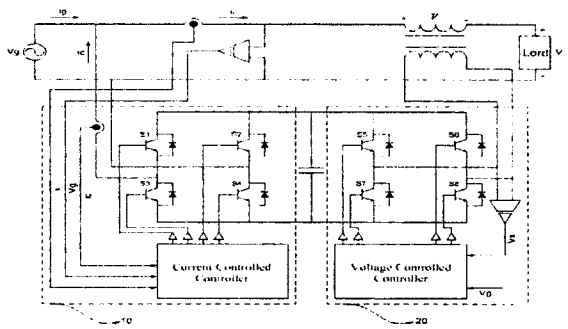
〈그림 2〉 계통 전압 및 전류 실험 파형



〈그림 3〉 부하전압에 따른 역률 측정 결과

그림 2는 36W용 FL 부하 40개(total 1.4KW)를 사용했을 때의 계통 전압 및 전류 파형으로 계통 전압을 직접 FL에서 연결했을 때의 입력전력은 1.88KW이며 절전장치를 통해 부하전압을 200V로 강압했을 때의 입력전력은 1.33KW로 측정되었다. 이는 시간당 0.55KWh의 입력전력이 감소함으로 약 30%의 에너지 절감효과를 기대할 수 있다. 그러나 계통 전압은 이상적인 정현파지만 계통 전류(FL전류)는 고조파가 포함된 찌그러진 파형임을 알 수 있다. 또한, 전압과 전류 위상차가 발생함으로써 그림 3과 같이 역률이 발생함을 알 수 있다. 이는 단순히 부하전압을 강압함으로써 에너지 절감효과는 기대할 수 있지만 고조파 저감 및 역률향상과 같은 전력품질개선을 할 수 없음을 확인할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 그림 4와 같은 에너지 절약 및 전력품질 개선을 모두 할 수 있는 다기능 조명에너지 절약 시스템을 제안한다.

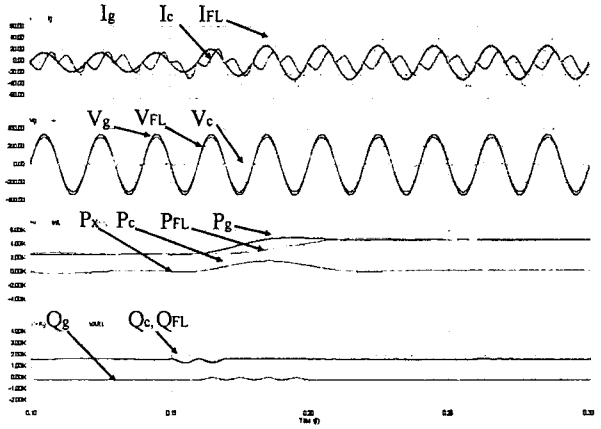


〈그림 4〉 제안된 시스템의 구성도

그림 4의 제안된 시스템은 기존의 단권변압기를 이용하는 절전장치나 반도체 스위치를 사용하여 정류 제어하는 절전장치와 달리, 양방향 제어가 가능한 두 대의 인버터로 구성되어 기존의 절전장치가 갖고 있는 탭 절환 시의 서지, 변압기 소음, 에너지 회생 문제점 등을 개선함은 물론, 에너지 절약 및 한전배전계통에서 규정(역률 0.9이상 THD 5%이내)을 만족하도록 전력품질 개선이 가능한 에너지 절약 시스템이다. 제안된 시스템은 에너지 절약을 위한 전압제어형 인버터와 계통의 품질을 향상시키기 위한 전류제어형 인버터가 병렬로 연결된 형태이다. 전기에너지 절감을 위한 부하 전압(V_L)의 제어는 계통과 부하사이에 직렬 연결된 변압기 전압(V_X)에 의하여 수행된다. 이들 관계는 $V_L = V_g - V_X$로서 계통인가 전압의 크기에 상관없이 V_X의 제어로 에너지절감에 필요한 적정부하전압을 유지할 수 있으며, 변압기 전압(V_X)는 전압제어형 인버터로 제어 할 수 있다. 이 인버터는 양방향 제어가 가능하기 때문에 V_X를 양(+)의 전압에서부터 음(-)의 전압까지 선형적으로 제어가 가능하여 부하전압의 승·강압 제어가 가능할 뿐 아니라, V_X의 제어범위가 정격의 상하 10% 범위인 이용전압의 범위에 있기 때문에 이의 제어를 위한 인버터의 용량은 부하 정격의 10%면 충분하고, 이의 에너지는 병렬로 연결된 전류제어형 인버터를 통하여 전원 측에 회생하게 된다. 따라서 보다 컴팩트하고, 저렴한 비용으로 전기에너지 절전장치의 제작이 가능하다. 또한, 계통과 병렬로 연결된 전류제어형 인버터는 부하조건(비선형 부하 및 역률부하)에 따라 무효전력을 보상함으로써 계통의 전력품질을 향상시킨다.

3. 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 모든 소자는 이상적인 것으로 가정하였으나 스위칭 소자의 턴-온 저항은 36mΩ의 조건으로 설정하였고 부하 적정 전압은 200Vrms로 선정하여 시뮬레이션 하였다. FL 부하로 비선형(RLC 다이오드 정류기 부하) 부하를 선정하였으며, 그림 5는 3697VA (3349W, 2126Var, 역률 0.84)용량의 부하를 인가하다가 0.15초 후에 6234 VA(5860W, 2126Var, PF 0.94)용량의 비선형 (RLC 다이오드 정류기 부하) 부하로 증가했을 때의 시뮬레이션 결과 파형으로 위로부터 전류 (계통 Ig, 전류제어형 인버터 Ic, 부하 I_{FL}), 전압(계통 Vg, 전압제어형 인버터 Vc, 부하 V_{FL}), 유효전력(계통 Pg, 전류제어형 인버터 Pc, 전압제어형 인버터 Px, 부하 P_{FL}) 그리고 무효전력(계통 Qg, 인버터 Qc, 부하 Q_{FL})이다.



〈그림 5〉 제안된 시스템의 시뮬레이션 결과

그림 5에서처럼 제안된 시스템은 부하변동에 상관없이 부하전압을 200Vrms로 유지함을 알 수 있으며 이에 따라 부하 소비에너지 (P_{FL})는 2608W에서 4676W로 에너지 절감효과가 있을뿐 아니라 부하에서 소비되는 무효전력(Q_{FL}) 1675Var, 1725Var 모두를 인버터에서 부담함으로써 계통의 역률은 항상 1로 유지할 수 있음을 확인하였다. 또한, 고조파가 포함된 부하 전류(I_{FL})를 인버터가 보상함으로써 계통 전류는 완전한 정현파임을 알 수 있다. 이는 제안된 시스템이 에너지 절감을 위한 전압제어형 인버터의 제어 에너지가 전류제어형 인버터와 연계하여 계통쪽으로 회생하고 있음을 보여줄 뿐 아니라 고조파 저감 및 단위역률 제어를 통해 전력품질 향상에도 도움을 주고 약 26%의 에너지 절감 효과가 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 조명 에너지 절약에 사용되는 단권 변압기를 이용하는 절전 장치의 탭 절환 시의 스파이크 및 변압기 소음문제 및 반도체 소자에 의한 절전장치의 에너지 회생문제를 해결할 뿐 아니라 단위역률 제어 및 고조파 저감 등의 전력품질 향상기능도 있는 다기능 에너지 절약 조명 시스템을 제안하였다. 또한, 기존의 절전장치를 실험하여 앞서 언급한 기본적인 단점 이외에 역률저하 및 고조파 증가 등의 문제점을 확인하였으며 PSIM을 이용하여 제안된 시스템이 에너지 절감 효과 뿐 아니라 전력품질 개선도 가능함을 확인하였다. 제안된 시스템은 전압제어형 전압원 인버터를 이용하여 부하 전압을 적정전압으로 제어함으로써 약 20% 이상의 에너지 절감효과를 기대할 수 있으며 전류제어형 인버터로 부하 조건에 상관없이 항상 한전배전계통의 전력품질 기준(역률 0.9이상 THD 5%이내)을 유지할 수 있다. 제안된 시스템은 전압제어를 위해 필요한 전압제어형 인버터의 용량은 정격부하의 약 10%이내 이고 무효전력 보상 및 고조파 저감을 위해 필요한 전류제어형 인버터는 정격부하의 약 30%이내 보다 컴팩트 하고 저렴한 비용으로 고품질 전력 보상기능을 갖는 전기에너지 절전장치로 구현할 수 있는 장점을 가진다.

[참 고 문 헌]

[1] A. Q. Haideri and J. A. Paraskiewicz, "Saving energy and protecting the environment through a retrofit lighting program," presented at Petroleum and Chemical Industry Conference, 1993.

[2] E. Gluskin, "Fluorescent lamp circuit," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 46, pp. 529-544, 1999.

[3] A. Trostl, "Self configuring dimming interface for fluorescent lamp ballasts," presented at IEEE Thirty-Sixth IAS Annual Meeting on Industry Applications Conference. 2001

[4] F. Rubinstein, M. Siminovitch, and R. Verderber, "Fifty percent energy savings with automatic lighting controls," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 29, pp. 768-773, 1993.

[5] S. AustraliaTM, "AS 1680.1 1990 "Interior lighting: Part 1: General principles and recommendation"," in Standards AustraliaTM, 1990.