

특집

전력변환 시스템의 역률개선 기술동향

정영석, 윤명중
(한국과학기술원 전기및전자공학과)

1. 서론

최근 전력 자원의 효율적인 이용에 대한 관심증가와 함께 입력 전류와 전압의 왜곡에 대한 규격들이 생겨나면서 역률개선 문제는 전력변환 시스템의 중요 관심사가 되었다. 초기의 역률개선 회로를 사용하지 않은 전력변환 시스템은 이런 점들에서 많은 문제점을 내포하고 있었다. 그림 1에는 역률개선 회로를 사용하지 않은 전력변환 시스템을 보여주고 있으며 이 회로는 다이오드 정류기, 정류용의 대용량 커패시터, 그리고 원하는 전압을 얻기 위한 DC/DC 전력변환기로 이루어진다. 대용량의 평활용 커패시터를 사용하기 때문에 입력 측에는 펄스 형태의 전류가 흐르므로 많은 문제점을 유발하게 된다.

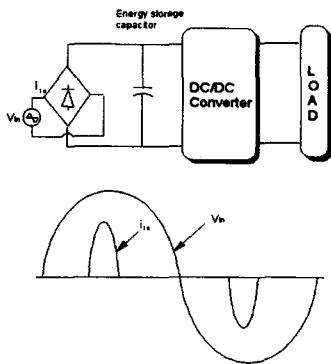


그림 1. 역률개선회로를 사용하지 않은 전력변환 시스템

입력 전류의 최댓값은 역률을 개선했을 때의 경우보다 4-5배 정도로 크므로 같은 부하 전력에 대해서도 내압이 큰 소자를 사용해야 하고 펄스 형태의 전류는 많은 고조파 성분을 포함하므로 입력 전압 파형을 왜곡시키기도 한다. 표 1은 두 전력 변환 시스템, 즉 역률 개선 회로를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우를 정해진 입력 전력 조건하에서 부하에 전달되는 전력을 비교한 것이다. 두 시스템 모두 15A 전류 차단기를 사용하는 경우라 할 때 연속적으로 흐르는 입력 전류의 RMS값은 12A 이하가 되게 하는 것이 일반적이다. 따라서 사용 가능한 최대 입력 전력은 1440W이다. 표 1에서 보듯이, 역률 개선 회로를 사용한 경우의 부하 측에 공급 가능한 전력은 1015W로써 역률개선 회로가 없는 시스템의 702W보다 부하전력 공급능력이 우수함을 알 수 있다. 최근 들어 사용량이 급증하고 있는 컴퓨터 장비 등과 같은 높은 전력을 요구하는 시스템을 위해서는 부하전력 공급능력이 우수한 전력변환 시스템이 더욱 많이 요구된다. 이에 따라 역률개선회로는 전력변환 시스템의 중요부분이 되었다.

역률개선회로는 부하조건이나 효율특성 그리고 제어기 구조의 단순도등에 따라 그 구조적 모습을 달리하며 적용되고 있다. 이 중 역률개선회로의 일반적인 형태로 사용되는 것이 승압형 컨버터이다. 승압형 컨버터는 특성상 출력전압이 입력전압보다 낮은 상태인 초기응답시나 과도한 부하변동시 전류 제어 특성을 잃어버리는 문제점이 있으나 입력 측에 인덕터가 위치하여 전력변환시스템에 따른 입력 라인측에 대한 영향을 최소화 할 수 있는 이점이

표 1. 전원공급장치의 부하 전력공급능력 비교

	기존 방식	역률 개선단이 있는 시스템
최대 라인 전력	1440VA	1440VA
역률	0.65	0.99
라인 입력단의 효율	100%	95%
DC/DC 컨버터의 효율	75%	75%
부하에 공급 가능한 전력	702W	1015W

표 2. IEC 555-2 Class A 규격

Harmonic Order n	Maximum Permissible Harmonic Current A
Odd Harmonics	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
15 - 39	0.15*(15/n)
Even Harmonics	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
8 - 40	0.23*(8/n)

있다. 기존의 역률개선을 위한 승압형 컨버터단과 전력변환기의 고주파 동작을 가능하게 하는 소프트 스위칭 기술과의 접목을 통한 고효율의 역률개선회로에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 전기전자기기의 소형화, 경량화에 따라 전력변환 시스템 또한 소형화, 경량화가 이루어지고 있으며 이를 위해 고주파 동작 하에서도 스위칭 손실을 줄여줄 수 있는 소프트 스위칭 기술은 필수 요소라 하겠다. 그 외에도 역률개선회로들의 구조적 결합으로 보다 우수한 성능을 보이는 회로에 대한 연구도 현재 활발히 진행되고 있다. 그 중의 하나가 이단-직렬 구조 전력변환시스템의 문제점인 복잡한 제어기 구조와 낮은 효율을 해결한 단일단-병렬 구조 역률개선회로이다. 단일단-병렬 구조 회로는 입력과 출력의 순시 전력 불균형을 병렬구조로 해결한 것으로 제어기 구조가

간단하고 높은 효율을 얻을 수 있는 이점이 있다. 그리고 저 용량의 전력을 요하면서 그 구조가 간단한 형태인 단일단 단일 스위치 역률개선회로 또한 많은 연구가 진행 중인 회로방식이다. 이 구조는 역률개선과 출력전압조정을 하나의 스위치를 사용하여 구현하는 간단한 구조의 역률개선회로이다.

따라서 본고에서는 전력변환 시스템에서 역률개선회로의 중요도를 높인 요소 중의 하나인 고조파 규제에 대한 규격인 IEC 555-2에 대해 고찰한 후, 역률개선과 고조파 저감을 위해 연구되어온 회로들을 소개하고, 기술 개발의 동향과 전망을 개설하고자 한다.

2. IEC 555-2 규격

IEC 555-2규격은 일반 전기전자기기에 관한 일반적인 고조파 규격을 언급한다. 유럽의 전기기술협회(CENELEC)와 국제전기기술협회(IEC)에 의하여 1961년 가전전자기기의 고조파 발생 및 연구에 관한 조사를 시작으로, 1975년 최초의 고조파 규격인 EN50006을 제정하였고, 1982년에 이를 수정 개정한 IEC 555를 공표하였다. 1991년에는 12월에 IEC 555-2의 유럽 고조파 규격이 확정되었다. IEC 555-2는 50Hz-60Hz 주파수의 전원에 16A 이하의 입력전류를 갖는 모든 전기전자 장비에 적용된다. 이 규정은 입력전류의 특성에 따라 4가지로 분류되며, 각각은 고조파 성분의 제한 값이 다르게 설정되어 있다.

Class A: 이 규격은 평형 삼상 부하 조건과 다른 규격에 포함되지 않은 것들을 포함한다. 규제 값은 표 2에 나타나 있다.

Class B: 이 규격은 운반가능한 기구들에 적용된다.

Class C: 이 규격은 조명기구들(dimmer 포함)에 적용된다.

Class D: 이 규격은 그림 2에 보인 입력전류 파형

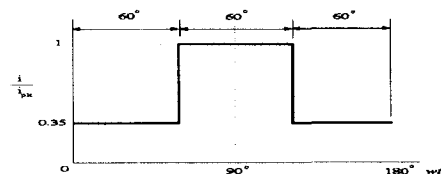


그림 2. Class D 입력 전류 파형

표 3. 승압형과 벡-부스트 역률개선회로의 비교

	연속전류 승압형 역률개선회로	벡-부스트 역률개선회로
출력 전압	출력전압 > 입력전압	입력전압에 무관
입력 전류	연속	불연속
출력 전류	불연속	불연속
제어기	간단	간단
최대 입력 전류(150W)	2A	9A
변압기 절연	가능	가능
정류용 다이오드	빠른 특성	느린 특성 무관
입력 필터	간단	복잡
가능한 전력 용량	75W - 2000W	150W 이하

을 가진 제품들 및 제품 입력 전력이 600(W) 미만인 기구들에 적용된다.

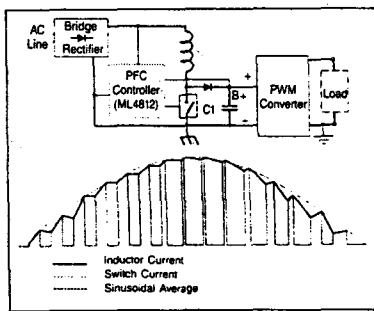


그림 3. 승압형 역률 개선 회로

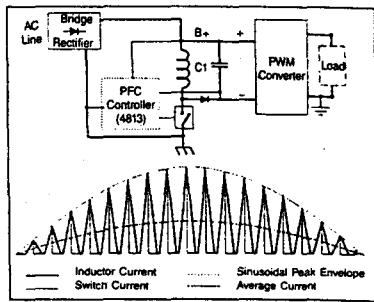


그림 4. 벡-부스트 컨버터의 회로도 및 전류파형

3. 역률 개선 회로

역률 개선 회로는 입력 측으로 흐르는 전류를 입력 전압과 같은 사인파형태로 하고 동위상으로 제어

함으로써 이루어진다. 역률개선을 통하여 부하전력 고급 능력을 향상시키고, 국제적인 입력 전류의 고 조파에 대한 규제 조치를 만족시킬 수 있다. 역률개 선을 위한 회로들로 지금까지 접근되어온 방식을 몇 가지 형태로 나누면 다음과 같다.

- 승압형 역률개선 회로
- 소프트 스위칭 방식을 적용한 승압형 역률개선 회로
- 단일단-병렬 구조 역률개선 회로
- 저 용량 단일단 역률개선 회로

다음에서는 이들 방식을 적용한 역률개선 회로를 소개한다.

3.1 승압형 역률개선 회로

그림 3에 나타난 역률개선회로는 1kW급의 연속 전류 제어 특성을 갖는 승압형 구조이다. 기준 전류 는 입력 전압 파형으로부터 얻어지며, 출력전압 조 정은 출력 전압 제어기의 출력에 따른 기준 전류의 최댓값 제어에 의해 이루어진다. 전류제어로 사용되 는 제어방식은 최대전류제어방식 이외에도 평균전 류를 제어하는 평균전류모드제어방식 그리고 기준 전류 밴드 내에서 제어하는 히스테리시스 제어방식 등이 있다. 이들 모두 제어대상인 전류를 연속적으 로 흐르게 하므로 불연속적으로 흐르게 하는 방식 에 비해 대용량의 전력변환 시스템에 유리하다. 그림 4는 입력전류를 불연속적으로 제어하는 벡-부스 트 컨버터의 회로도 및 전류 파형이다. 벡-부스트 컨 버터는 승압형 컨버터에 존재하는 출력전압과 입력 전압의 제한 조건이 없으므로 일반적으로 소용 량 의 넓은 범위의 입력전압 조건이 있는 전력변환 시 스템에 많이 사용된다. 표 3에는 연속적인 전류특성

을 갖는 승압형 컨버터와 불연속적인 전류특성을 갖는 벡-부스트 컨버터의 비교가 나타나 있다. 입력 전류의 최대값이 벡-부스트 컨버터가 승압형 컨버터보다 4.5배 높음을 알 수 있다.

3.2 소프트 스위칭 방식을 적용한 승압형 역률개선 회로

그림 5에는 소프트 스위칭 방식을 적용한 승압형 역률개선회로가 있다. 이 회로는 기존의 승압형 구조에 보조회로를 사용하여 소프트 스위칭 조건을 만족시킨다. 보조회로는 보조 스위치, 보조 다이오드, 그리고 보조 인덕터로 구성된다. 주 스위치를 도통시키기 전 보조 스위치를 먼저 도통시켜 주 스위치에 흐르는 전류와 주 스위치 드레인과 소스사이의 커패시터에 저장된 에너지 성분을 보조 회로를 통하여 흘려보냄으로써 주 스위치의 영전압 스위칭 조건을 만족시킬 수 있다. 주 스위치가 도통된 후 보조 스위치를 차단시킴으로써 보조 인덕터에 저장된 에너지는 출력 측으로 흘러들어 간다. 그림은 100kHz, 600W급의 회로이다. 입력 전원을 90-260V_{ac}로 하고 출력전압은 380V로 설정되었다. 그림 6는 효율곡선으로 소프트 스위칭 방식을 사용한 경우가 기존의 방식에 비해 더욱 높은 효율을 얻을 수 있음을 보여 준다. 동작 특징을 각 모드별로 나타내면 다음과 같다.

- 모드 1 (T₀-T₁) : T₀이전 상태는 주 스위치와 보조 스위치가 차단된 상태이며 주 인덕터 전류는 정류용 다이오드를 통해 흐르고 있다. T₀ 시간에 보조 스위치가 도통되어 보조 인덕터에는 전류가 증가하여 주 인덕터에 흐르는 전류량과 같게 되면 정류용 다이오드는 소프트 스위칭에 의해 꺼진다.
- 모드 2 (T₁-T₂) : 이 구간에서는 보조 인덕터와 주 스위치의 드레인과 소스에 기생하는 커패시터가 공진을 하며 주 스위치 양단 전압이 영이 될 때까지가 이 구간이다.
- 모드 3 (T₂-T₃) : 주 스위치의 전압이 영이 된 후 보조 인덕터에 흐르는 전류는 주 스위치의 내부 다이오드를 통해 흐른다. 이 때 주 스위치에 도통 신호를 인가하여 영전압 조건하에서 스위칭 하게 한다.
- 모드 4 (T₃-T₄) : 보조 스위치가 꺼지면 보조 인덕터에 흐르는 전류가 출력 단으로 흘러들어 간다. 이 때 보조 스위치 양단 전압은 출력측

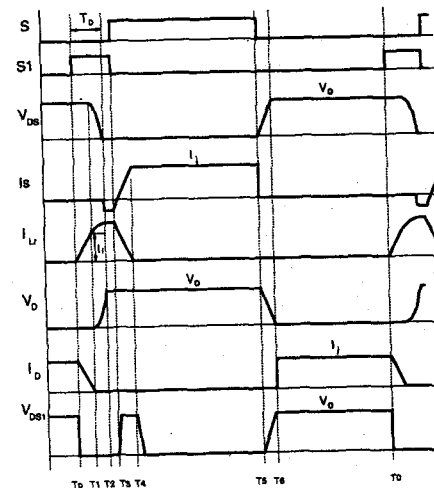
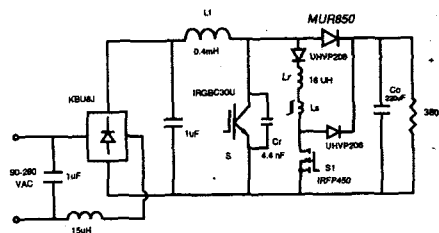


그림 5. 소프트 스위칭 방식을 적용한 승압형 역률개선회로

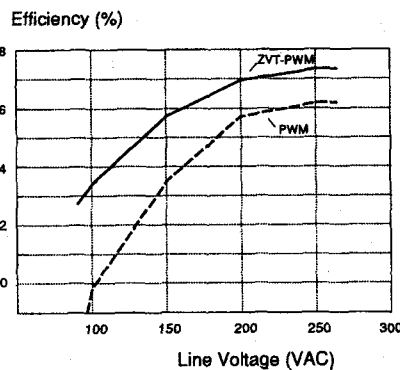


그림 6. 효율 곡선

전압으로 제한된다.

- 모드 5 (T₄-T₅) : 보조 인덕터에 흐르던 전류가 출력단으로 모두 흘러간 후 기존의 승압형과 같은 동작 특성을 보인다.

-모드 6 (T_5 - T_6) : 주 스위치가 차단되면서 주 스위치 양단의 커패시터가 충전을 시작한다. 이 구간은 충전이 완료되어 주 스위치의 전압이 출력측 전압과 같이 되는 때까지이다.

-모드 7 (T_6 - T_7) : 이 구간은 기존의 승압형 구조의 주 스위치가 차단된 상태와 동일하다.

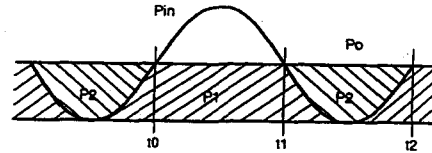


그림 7. 단상 시스템의 입력과 출력의 순시 전력 관계

3.3 단일단-병렬 구조 역률개선 회로

그림 7은 단상 시스템의 입력과 출력의 순시 전력관계를 나타낸다. 입력과 출력의 전력 평형을 위해서 역률개선회로의 출력측 커패시터는 충분히 커야한다. 이런 큰 출력측 커패시터에 의해 출력측 응답특성이 제한되므로 역률개선회로 설계시 출력측 리플 크기와 응답특성에 대한 고려가 있어야 한다. 이런 문제를 해결하는 방법으로 이단-직렬 구조를 사용할 수 있다. 그림 8에는 이단-직렬 구조의 구조도가 있다. 이단-직렬 구조는 역률개선단과 출력전압 조정단을 서로 직렬로 연결하는 것이다. 이 경우 제어기 구조가 복잡해지고 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이런 문제점을 개선한 것이 단일단-병렬구조 역률개선회로이다. 그림 9에는 단일단-병렬구조 역률개선회로가 나타나 있다. 입력과 출력의 전력균형을 위해 병렬로 전력변환기를 사용하여 기존의 이단-직렬구조보다 간단하면서 고효율의 역률개선회로를 구성할 수 있다. 다음은 동작특성에 따른 설명이다.



그림 8. 이단-직렬 구조의 전력변환시스템

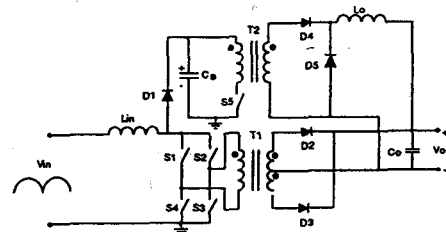


그림 9. 단일단-병렬구조 역률 개선 회로

경우 1: 입력 전력이 출력 전력보다 큰 경우

-모드 1 (T_0 - T_1) : 스위치 S_1 - S_4 가 도통 상태에 있다. 이 구간 동안 입력 측 인덕터의 전류는 증가하며, 변압기 T_1 에는 전류가 흐르지 않는다.

-모드 2 (T_1 - T_2) : 스위치 S_1 , S_2 , 그리고 S_3 를 차단하여 입력 측 인덕터에 흐르는 전류를 커패시터 C_B 로 흘려 보낸다. 이 구간은 입력 측의 과잉 전력을 커패시터에 저장하기 위한 것이다.

-모드 3 (T_2 - T_3) : 스위치 S_2 를 도통시킴에 따라 입력 측 전력이 변압기 T_1 을 통해서 출력 측으로 전달된다. 이 때 변압기의 일차 측에 나타나는 출력전압은 커패시터 C_B 의 전압보다 낮게 설계되므로 다이오드 D_1 은 차단된다.

경우 2: 입력 전력이 출력 전력보다 작은 경우

-모드 1 (T_0 - T_1) : 스위치 S_1 - S_4 가 도통 상태에 있으며 파워드 컨버터에 있는 스위치 S_5 는 차단된 상태이다.

-모드 2 (T_1 - T_2) : 이 구간 동안의 모든 스위치는 도통되어 있다. 이에 따라 입력 측 인덕터와 파워드 컨버터의 인덕터 모두에서 전류가 증가한다. 입력 전력이 출력 전력보다 낮으므로 이 구간에서는 파워드 컨버터에서 전력을 공급하게 된다.

-모드 3 (T_2 - T_3) : 이 구간은 입력 전력이 출력 전력보다 큰 경우의 모드 3과 동일하다.

3.4 저용량 단일단 역률개선 회로

소용량의 전력변환시스템을 구성하기 위해서는 간단한 구조이면서 제어기의 구조가 복잡하지 않도록 설계할 필요가 있다. 이런 경우 단일 스위치를 이용해 역률개선회로와 출력전압 제어단을 하나로 묶어 전력변환시스템의 구조를 간단히 할 수 있다.

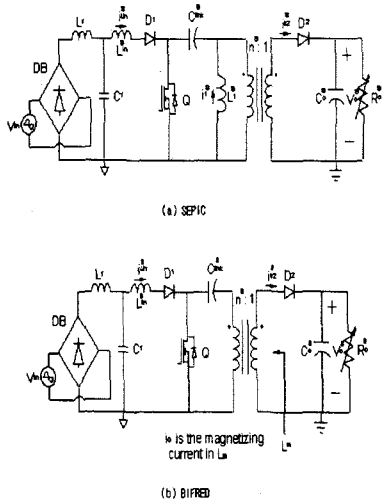


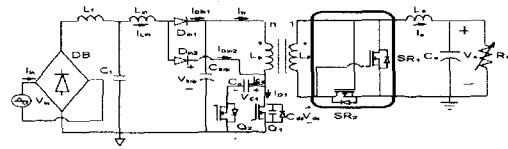
그림 10. SEPIC과 BIFRED 구조의 역률개선회로

이들 전력변환시스템은 출력전압 제어를 위한 제어기를 사용하고 있으며 입력 역률 개선은 불연속 전류제어 방식에 의해 이루어지도록 되어있다. 그림 10에는 SEPIC과 BIFRED 구조의 단일단 단일 스위치 역률개선회로가 있다. 이들 구조는 입력 전압의 큰 맥동 성분이 출력측에 영향을 주어 부하측 전압에도 큰 맥동 전압을 야기하는 문제가 있다. 따라서 이를 해결할 수 있는 구조로 승압형 구조와 포워드 컨버터를 단일 스위치로 묶는 방법이 제시되었다. 그림 11에는 이 구조의 회로가 나타나 있다. 입력과 출력측 사이에 커패시터를 두어 입력측의 큰 맥동 성분을 어느 정도 줄여줄 수 있게 됨에 따라 출력측에는 기존의 방식에 비해 작은 맥동을 가질 수 있다. 다음은 각 모드별 동작내용이다.

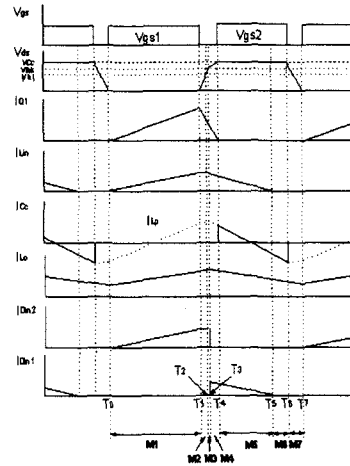
- 모드 1 (T_0-T_1) : 주 스위치가 도통하면서 인덕터의 전류가 증가한다. 변압기의 일차측에는 DC 링크 전압이 인가되어 출력측으로 에너지를 전달한다.
- 모드 2 (T_1-T_2) : 주 스위치가 차단되고 스위치 양단전압이 입력전압보다 작은 구간이다. 여전히 변압기 일차측에는 양의 전압이 인가되어 출력측으로 에너지가 전달된다.
- 모드 3 (T_2-T_3) : 주 스위치 양단전압이 입력전압보다 커서 인덕터에 흐르는 전류는 감소한다.
- 모드 4 (T_3-T_4) : 주 스위치 양단전압이 DC 링크 전압과 같아지면 다이오드 D_{in2} 는 차단되고

D_{in1} 은 도통한다. 이에 따라 인덕터의 에너지가 DC 링크로 전달된다.

- 모드 5 (T_4-T_5) : 이 구간에서는 변압기의 자화 에너지가 보조 커패시터인 C_c 로 흡수된다. 이때 보조 스위치의 내부 다이오드가 도통이 되며 보조 스위치의 영전압 조건을 만족한다.
- 모드 6 (T_5-T_6) : 인덕터에 흐르던 전류가 영이 되면서 다이오드 D_{in1} 은 차단된다.
- 모드 7 (T_6-T_7) : 이 구간에 보조 스위치가 차단되고 보조 커패시터 C_c 의 방전을 중단 된다. 주 스위치의 전압이 떨어져 영이되면 주 스위치의 영전압 스위칭 조건을 만족하게 된다.



(a) 회로도



(b) 동작 파형도

그림 11. 승압형과 포워드 컨버터 결합형 단일단 역률개선회로

4. 결론

지금까지 전력변환시스템의 역률개선과 고조파 저감을 위한 역률개선회로들을 기술하였다. 전력자

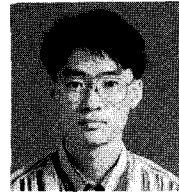
원의 효율적인 이용에 대한 관심이 증가하고 국제적으로 전기전자기기들에 대한 여러 규제 조치가 생겨나면서 역률개선회로에 대한 중요성이 부각되었다. 여러 응용 분야에 각기 적합한 구조의 역률개선회로를 선정하고 그에 따른 제어회로 설계는 이런 맥락에서 계속 연구되고 진행되어야 한다. 그리고 전력 변환 시스템의 고효율화와 연계한 회로 설계는 전력변환 시스템의 소형화와 경량화를 이루게 하는 중요한 요소가 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Klein and M. K. Nalbant, "Power Factor Correction - Incentives, Standards and Techniques", PCIM June 1990, pp. 26-31
- [2] A.R. Prasad, P.D. Ziogas, S. Manlas, "A Novel Passive Waveshaping Method for Single-Phase Diode Rectifiers", IEEE IECON 1990, pp. 1041-1050
- [3] J. A. Sabate, V. Vlatkovic, R. Ridley, and F. C. Lee, "High-voltage, high power, ZVS, full-bridge PWM converter employing an active switch," IEEE APEC 1991, pp. 158-163
- [4] G. Hua, C. S. Leu, Y. Jiang, and F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE trans. on PE, vol. 9, no. 2, march 1994, pp. 213-219
- [5] Y. Jiang, F. C. Lee, G. Hua, and W. Tang, "A Novel Single-Phase Power Factor Scheme", IEEE APEC '93, pp. 287-292
- [6] F. Harashima, "Power Electronics and Motion Control-A Future Perspective", Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, AUGUST 1994, pp. 1107-1111
- [7] Y. Jiang, G. C. Hua, E. Yang, and F. C. Lee, "Soft-Switching of IGBT's with the Help of MOSFET's", VPEC Seminar 1992.
- [8] R. Redley, L. Balogh, and N. O. Sokal, "A new family of single-stage isolated power-factor correctors wit fast regulation of the output voltage", IEEE PESC '94, pp. 1137-1144
- [9] Y. S. Lee, K. W. Siu, and B. T. Lin, "Novel Single-Stage Isolated Power Factor Corrected Power Supplies with Regenerative Clamping", IEEE APEC '97, pp. 259-265
- [10] L. Huber, and M. M. Jovanovic, "Single-Stage,

Single-Switch, Isolated Power Supply Technique with Input-Current Shaping and Fast Output-Voltage Regulation for Universal Input-Voltage-Range Applications", IEEE APEC '97, pp. 272-280

- [11] 김시경, "전력 변환 시스템의 고조파 저감에 대한 규격 및 역률개선 기법", 대한전기학회지 제44권 11호 1995. 11, pp. 21-27



정 영 석 (丁永錫)

1970년 3월 15일생. 1992년 한국과학기술대학 전기 및 전자공학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년-현재

한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정.



윤 명 중 (尹明重)

1946년 11월 26일생. 1970년 2월 서울대학교 공업교육학과(전기전공) 공학사. 1974년 8월 University of Missouri-Columbia 전기공학과 공학석사.

1978년 5월 University of Missouri-Columbia 전기공학과 공학박사. 1978년 7월 General Electric Company 책임연구원. 1983년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수. 1992년 10월 국민훈장 목련장 수상. 1996년 6월 전력전자학회 부회장.

주관심분야 : 전동기 구동 및 제어, 전동기 설계, 전력변환시스템.