

가변 전류루프이득을 가지는 Power Conditioner

정창용, 이영운, 백주원, 유동욱, 안창모, 조기연
한국전기연구원

Power Conditioner with Variable Current Loop Gain

C.Y. Jeong, Y.W. Lee, J.W. Baek, D.W. Yoo, C.M. Ann, G.Y. Joo
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper describes a newly developed power conditioner with variable current loop gain. The power conditioner consists of a dc-link capacitor and three phase inverter with coupled inductor. This system is very well operated to compensate current harmonics and asymmetries caused by nonlinear load and unbalance loads. The power conditioner shapes the source current sinusoidal in phase with source voltage. A 100kVA power conditioner was built and the controller is realized with DSP. Experimental results for many load conditions are presented to verify the performance of the controller.

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 전원의 질이 점차적으로 중요시 되고 있고 그에 대한 문제점이 산업의 IT화 및 고도화가 진행됨에 따라 전원의 질에 대한 요구와 인식이 변화되고 있다. 첨단 제어장치, 전력변환기기의 광범위한 이용으로 비선형 및 불평형 특성을 갖는 부하가 급증하여 전원 파형을 왜곡시키므로 고조파 문제, 역률저하는 물론 전력기기의 상호교란, 상불평형으로 인한 변압기의 온도상승과 소음발생등의 많은 문제들이 야기되고 있다. 이와 같은 고조파 및 상불평형으로 인한 장애를 줄이기 위한 대책으로 종래에 사용되는 기술이 L, C로 구성된 수동필터를 설치하여 고조파 발생원으로부터 발생하는 특정 고조파를 제거하고 역률을 개선하는 방법이지만 근본적으로 상불평형을 개선하지는 못하고 또 다음과 같은 문제점을 나타내고 있다. 첫째 수동필터의 고조파 제거 능력은 전원 임피던스의 크기에 많은 영향을 받는다. 따라서 필터의 적절한 설계를 위해서는 전원임피던스의 크기를 알 수 있어야 하는데 전원 임피던스의 정확한 추정 이 어려운 경우가 많고 또한 각종 다른 부하량에 따라 전원측의 임피던스가 변화하는 형태를 나타내어 원하는 만큼의 성능을 구현하는 데 애로가 있다. 둘째로는 전원 임피던스는 계통의 접속상태에 따라 그 크기가 변화하기 때문에 계통의 어느 부분을 차단, 또는 투입한다든지 설계가 변경되든지 하여 계통의 구성이 달라지면 필터의 성능이 영향을 받게 되므로 일정한 성능을 기대하기 어렵다. 수동필터는 전원의 입장에서 볼 때 전원의 내부 임피던스와의 여러 가지 원인에 의하여 전원 전압 자체에 고조파 성분이 포함되어 있는 경우가 있는데 이 때문에 수동필터와 전원임피던스가 직렬공진을 일으킬 수 있다. 넷째 수동필터는 고조파 전류원이 되는 부하의 입장에서 볼 때 전원 임피던스와 병렬 접속된 회로로 간주된다. 따라서 이들 간의 병렬공진이 야기될 수 있다. 이때에는 전원측 고조파전류가 제거되는 것이 아니라 공진으로 인하여 증폭이 될 뿐만 아니라 예기치 못한 발전으로 인한 부하측에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다. 특히 직렬 및 병렬공진에 의해서 필터 자체나 인근에 설치된 진

상용 커패시터가 공진으로 인하여 전압이 높게 되어 손상되는 등의 사고가 빈번히 일어나고 있다. 공진을 억제하기 위해서는 필터의 감쇄율을 증가시키는 방법을 생각할 수 있으나 전원의 손실을 초래하는 이차적인 문제를 발생시키게 된다. 이러한 수동 필터도 다양한 연구가 진행되어 가변 커패시터를 가지는 무효전력 보상장치 및 고조파 보상장치등이 개발되어 왔지만 근본적으로 부하의 변동이나 전원측의 변화에 능동적으로 동작하기에는 한계를 가지고 있다. 위와 같은 수동필터의 단점을 극복하고 부하측에 나타나는 다양한 문제점이 나타나는 것을 보상하기 위한 방법으로 1970년 중반에 제시된 능동필터를 이용하여 고조파를 제거하는 방식이 있다. 이 방식은 고조파 발생원에서 유출되는 고조파 전류에 상반되는 전류를 전력변환장치를 이용해 주입하여 전원측으로 유출되는 고조파 전류를 제거하고 전원측의 전압과 동상의 전류를 흐르도록 하여 역률을 개선하고 상불평형을 개선하기 위하여 능동필터의 각 레그를 이용하여 전류의 패스를 바꾸어서 상전류간의 밸런스가 되도록 하는 적극적인 방법이다. 이 방법은 위에 제시된 수동 필터의 단점을 극복하였으나 수동필터에 비해 가격이 고가이고 손실이 크다는 단점은 있으나 능동필터는 고조파 억제기능 외에 제어 개념 및 제어장치의 설계에 따라 무효전력보상에 따른 역률 개선, 전압 변동의 억제에 의한 순시전압 보상기능, 전력펄스에 의한 flicker 방지, 3상 불평형 보상, 비상발전기의 역률보상 및 상불평형억제등의 다기능화를 시킬 수 있다. 능동필터의 제어 기법은 다양하게 연구되어 왔는데 최근에는 디지털제어의 일반화로 많은 연구가 디지털 제어기로 진행되어 왔다. 최근에 능동필터의 제어기법중에서 가장 일반적인 형태는 삼상일 경우에 DQ변환을 통하여 좌표축 변환하여 그에 상응하는 값을 구하고 제어를 하는 방법이 일반적으로 제어기에 많이 응용되고 있다. 그러나 이런 방법은 삼상 전압, 전류가 평형이라는 가정하에서 각종 파라미터를 제어하게 되지만 DQ변환한 값들이 DC값을 나타내므로 제어기의 구성이 간단해지고 또 튜닝이 용이한 장점을 가지지만 과도 상태는 일반적으로 삼상평형이 아니기 때문에 제어기의 성능을 극대화하기 어렵다.

본 연구에서는 이러한 기존의 제어기의 단점들을 보완하고 이에 상응하는 제어기의 성능을 확보할 수 있는 새로운 제어기를 제안하고 보상 용량이 100kVA급인 Power Conditioner를 시작품을 제작하여 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

2. 제안한 가변이득 Power Conditioner

2.1 전체시스템구성도

그림 1은 본 논문에서 제안한 시스템의 구성도인데 3상 4선식의 전력 시스템으로 상전류의 불평형으로 나타나는 전류의 보상은 Power Conditioner의 중성선으로 흐르게 되고 각 dc-link의 전압은 반주기동안에 공급하였을 때 전압의 크기가 변하지 않도록 설계되어야 한다.

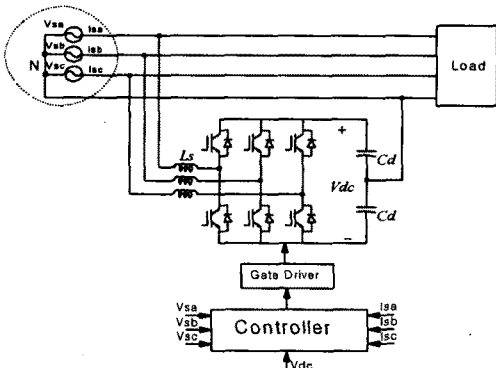


그림 1. 시스템 구성도

본 시스템에서 IGBT로 삼상 전력시스템을 구성하고 게이트를 구동을 위하여 광캐피블을 사용하여 제어의 신뢰도를 향상 시켰다. 그리고 상불평형 전류에 대한 보상을 원활히 하고 독립적인 상전류 제어를 위하여 dc-link 커패시터를 두 모듈로 분리하여 중성점을 사용하였다.

2.2 Power Conditioner 제어부

그림 2는 Power Conditioner의 전력회로이다. 본 제어기는 고조파와 역률을 보상할 뿐만 아니라 상불평형까지도 보상하는데 특히 삼상의 전원에 상불평이 심해졌을 때의 전압크기 변화를 조래하고 각종 전력변환장치에 악영향을 미치게 되는데 본 제어기를 통하여 이러한 각종 부하에 나타나는 나쁜 영향들을 제거하고 부하측의 다양한 효과가 전원측에 파급되지 않도록 한다. 아래 그림에서의 상불평형에 대한 전류의 보상은 동작을 보여주고 있는데 상불평형측면에서 살펴보면 단상의 부하가 전원측에 연결되었을 때 최악의 부하조건인데 Power Conditioner의 동작은 각상의 전류를 흐르게 하고 부하가 결선 되어 있는 상에 그 전류를 삽입하도록 하여 보상을 하게 된다.

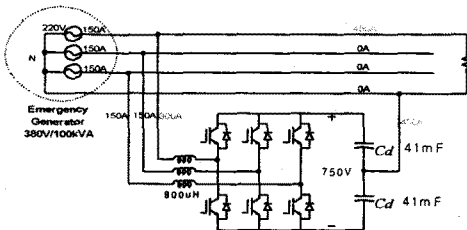


그림 2. Power Conditioner

아래 그림 3은 기존의 전류 제어기법으로 삼상의 전류를 독립적으로 제어하고 최종단에서는 SPWM를 사용하여 전력회로의 게이트신호로 인가하여 동작시키는 제어기로 DQ변환하여 제어하는 시스템보다는 구조가 간단하고 각상을 독립적으로 제어 가능하여 각상의 값들이 서로 결합없이 제어 가능하여 순시제어 특성을 향상시킬 수 있지만 전류제어기의 기준값은 각상별로 전원측의 전압을 센싱하고 dc-link 전압의 오차와 곱으로 계산한 값이 되므로 전류제어기에서 계산하고 제어하는 모든 값들이 DC가 되고 이로 디지털제어기로 구성하였을 때 발생하는 시지연값으로 인한 제어기의 튜닝이 어렵게 되고 성능이 뛰어난 제어기의 구현이 어려워진다. 또한 이와 같은 제어기는 입력 전압의 조건에 따라 전체 개루프의 이득이 다르게 나타나게 되어 주파수 별로 일정한 이득을 가지는 기존의 제어기로는 튜닝과 원하는 제어기성능

을 얻기가 매우 어렵다. 이와 같은 이유를 살펴보면 입력전압이 낮은 경우에는 전류제어를 하는 개루프이득이 낮게 되어 이득이 충분히 커야 제어기에서 원하는 성능을 얻을 수가 있고 입력전압이 높은 부분에서는 상대적으로 개루프이득이 높아 제어기의 이득이 낮아도 원하는 제어기의 특성을 얻을 수가 있어 낮은 전압에 맞추어진 제어기의 이득은 이와 같은 높은 전압에는 전류제어기를 안정도를 떨어뜨리게 하여 발진이 나타나게 되고 높은 전압에 맞추어진 전류제어기의 이득은 낮은 전압에서의 원하는 제어기의 특성을 얻기 어렵게 되어 전류파형을 왜곡되게 한다. 이런 이유로 일반적으로 AC-DC 컨버터에서나 본 논문에서 제안한 Power Conditioner에서 제어기 구성과 구현이 간단한 제어기인 SPWM를 이용한 디지털제어기를 구성할 때는 제어기의 튜닝이 아주 어려울 뿐만 아니라 부하특성도 나빠진다.

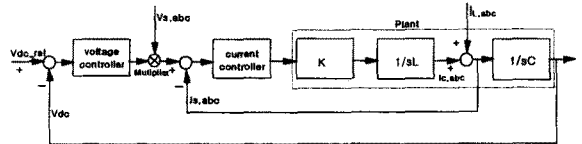


그림 3. Power Conditioner 제어기

아래 그림 4는 본 논문에서 제안한 제어기와 Power Conditioner의 제어기를 나타내는데 기존의 제어기와 비교하면 dc-link를 제어하는 방법과 전류제어기의 기준치를 만드는 계산하는 하는 방법은 기존의 제어기와 동일하지만 전류제어기의 이득은 입력측의 삼상전압값에 따라 이득이 가변되는 값을 가져 제어기의 성능을 극대화 할 수 있다.

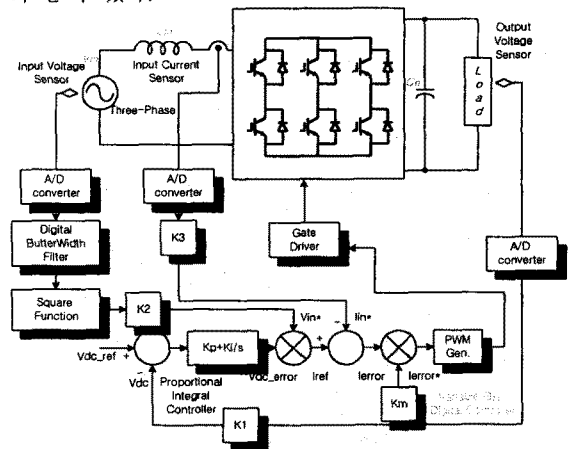
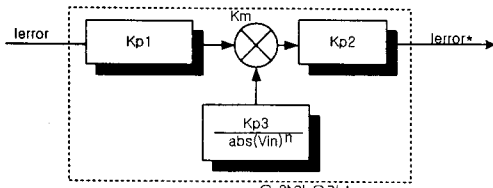


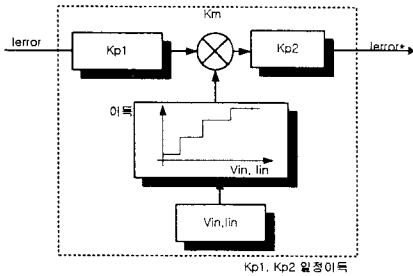
그림 4. 제안한 Power Conditioner 제어기

위의 그림에서의 가변이득 전류제어기의 구조는 다양하게 가질 수 있는 데 응용될 수 있는 형태의 제어기를 상세히 살펴보면 아래 그림과 같다. 그림 4(a)는 입력 전압에 따라 이득이 연속적으로 변하는 값이 되어 개루프 이득이 입력 전압에 따라 일정하게 되어 전류보상 특성을 극대화할 수 있다. 또한 그림 4(b)와 경우에서의 전류제어기의 이득은 입력전압에 따라 계단으로 변하는 형태를 가져 전류 제어특성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서 제안한 제어기는 기존의 제어기와는 접근방법을 다르게 하고 있는데 기존의 제어기의 설계는 주파수영역에서 설계가 보편화된 방법이고 또한 PID제어 기법은 주파수영역에서 안정도를 계산하여 각 파라미터를 정하여 제어하게 되지만 본 논문에서 시간영역에서의 제어기 설계로 입력 전압의 시간 영역에서 변화하는 값을 계산하여 그 값을 기준으로 제어기의 이득을 계산하는 형태를 가짐

로써 기존의 제어기와 차별화가 되면서 양호한 제어특성을 얻을 수가 있고 또한 입력전압조건에 따라 개루프의 이득이 일정하여 주파수 영역에서의 제어기와 병행하여 설계가 용이하고 제어기 튜닝이 아주 쉬워진다.



n 은 양의 유리수
Kp1, Kp2, Kp3 일괄이득
(a)

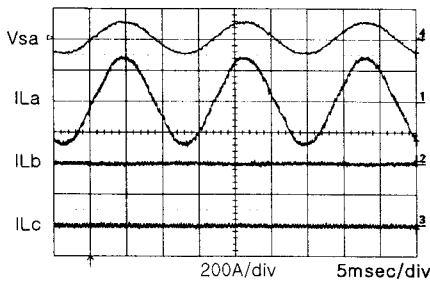


(b)

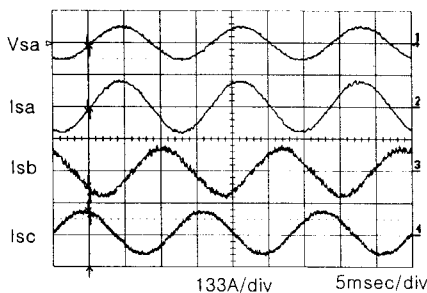
그림 5. 전류제어기 구성도

3. 제안한 Power Conditioner 실험결과

본 논문에서 제안한 제어기중에서 그림4(a)로 구성하여 n 값을 2로 하였을 때 각종 부하 실험을 하였다. 아래 그림 6은 단상의 부하가 전원측에 연결되었을 때의 전압과 전류파형이다. 부하측전류는 단상부하이기 때문에 a상에만 전류가 흐르고 다른 상에 흐르지 않지만 전원측의 실험파형을 보면 삼상평형형을 95%이 될을 확인할 수 있고 각 전류는 각상의 전압에 동상인 전류가 흐름을 확인할 수 있다.

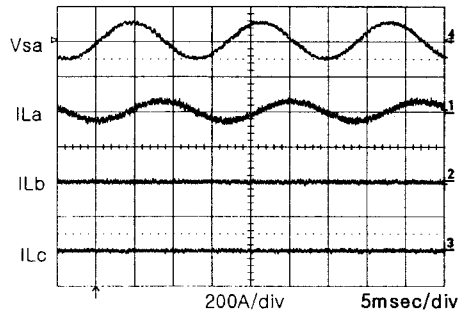


(a)부하측 전압, 전류

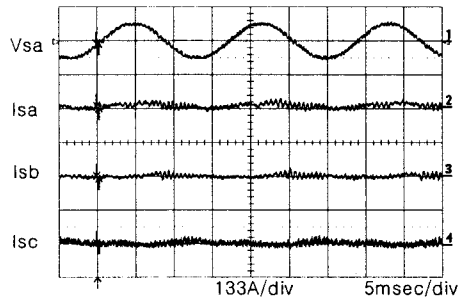


(b)전원측 전압, 전류
그림 6. 상불평형 보상파형

아래 그림7은 리액터 부하일경우의 부하측과 전원측의 전류파형인데 보상기의 동작으로 부하측의 무효전력을 보상하여 전원측에는 부하로 인한 전류가 거의 나타나지 않아 본 제안한 장치가 무효전력을 보상함을 확인할 수 있다.



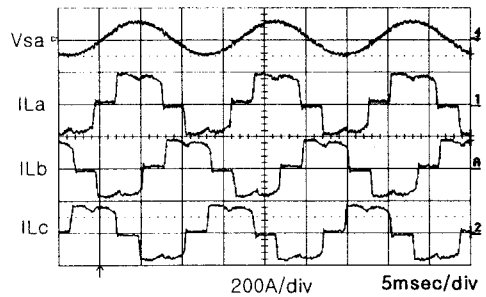
(a) 부하측 전류



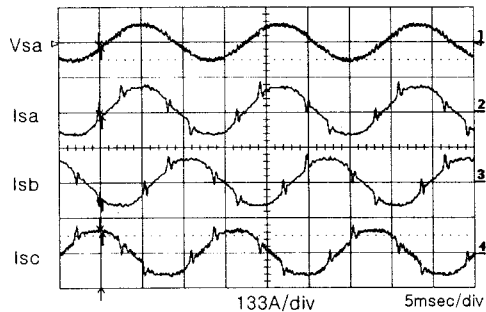
(b) 전원측 전류

그림 7. 무효전력 보상파형

아래 그림 8은 부하측이 정류기 부하일 경우의 전류파형인데 부하측의 전류파형은 정류시 나타나는 고조파를 포함하고 있지만 전원측의 보상한 파형을 보면 거의 정현파로 나타남을 확인할 수 있다.



(a) 부하측 전류



(b) 전원측 전류

그림 8. 정류부하 보상파형

아래 그림은 50kW급의 부하가 연결되었을 때 dc-link의 전압특성과 전류파형을 보여주는데 0.2초 정도의 응답시간을 가지고 있다.

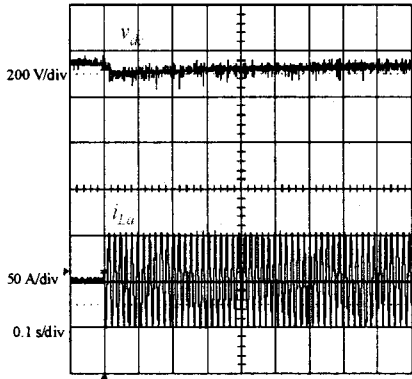


그림 9. 50kW 부하연결시 시스템 응답

아래 그림 10은 갑작스런 부하가 전원측에서 탈락이 되었을 때의 시스템의 응답특성을 보여주는데 전원측의 리액터에 축적된 에너지가 Power Conditioner측으로 넘어오면서 나타나는 특성으로 0.2초 정도의 안정화 시간이 필요하다.

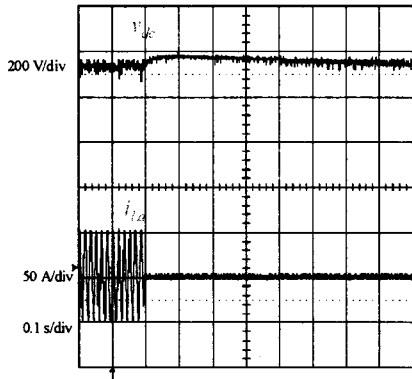


그림 10. 50kW 부하탈락시 시스템 응답

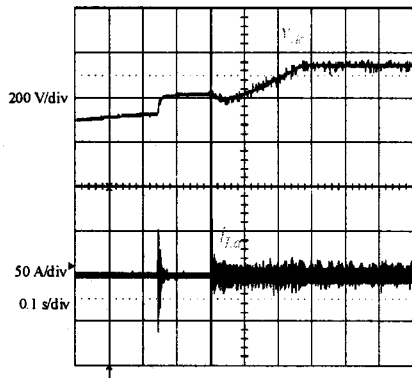


그림 11. 시스템 기동시 특성

위의 그림11은 시스템이 초기에 기동시 나타나는 dc-link의 전압파형과 충전전류를 나타내고 있는데 초기에는 저항을 통하여 커패시터를 충전시키고 일정 이상의 전압이 되었을 때 MC(Magnetic Circuit

Breaker)를 동작시킨 후에 Power Conditioner를 동작시키고 전압기준치를 스텝으로 증가시켜 750V까지 증가시켰다. 이와 같은 소프트스타트 기능을 구현하여 초기 기동시의 과도한 전류가 흐르는 것을 방지하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 가변 전류제어기의 이득을 가지는 Power Conditioner를 제안하였고 디지털제어기로 시스템을 구현하여 각종 부하실험을 하였다. 본 장치는 전력품질이 사회 문제화된 시점에서 다양하게 배전측에 적용 가능하고 전력제어기들이 통합되어 가고 있어 디지털 제어기의 적용은 반드시 필요하게 되는데 이로 인하여 아날로그 제어기보다 제어기 성능을 높일 수 없는 문제를 본 제안한 제어기로 극복할 수 있음을 실험으로 확인하였다. 또한 제어기의 튜닝이 용이하여 제품화하였을 때 상품성을 더욱 높였다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.Y Jeong, J.G. Cho, Y.Kang, G.H. Rim, E.H. Song " A 100kVA Power Conditioner for Three-Phase Four-Wire Emergency Generators " PESC'98, pp1906~1911, 1998
- [2] P.Verdelho and G.D. Marques,"An Active Power Filter and Unbalanced Current Compensator" IEEE Trans. Ind. Electronics., vol 44, pp 321~328, 1997
- [3] Marricio Aredes and Jurgen Hafner and Klemens Heumann,"Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies" IEEE Trans. Power Electronics, vol 12, pp311~318, 1997
- [4] C.Y Jeong, J.G. Cho, Y.Kang, G.H. Rim, E.H. Song " A 100kVA Power Conditioner for Three-Phase Four-Wire Emergency Generators " PESC'98, pp1906~1911, 1998
- [5] P. Verdelho and G.D. Marques," An Active Power Filter and Unbalanced Current Compensator" IEEE Trans. Ind. Electron., vol 44, pp. 321-328,1997.
- [6] Marricio Aredes and Jurgen Hafner and Klemens Heumann," Three-Phase Four-wire Shunt Active Filter Control Strategies" IEEE Trans. Power Electronics, vol 12, pp.311-318, 1997
- [7] Luis A. Moran and Juan W. Dixon and Rogel R.Wallac," A Three-Phase Active Power Filter Operating With Fixed Switching Frequency for Reactive Power and Current Harmonic Compensation", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42 No. 4, pp. 402-408, August 1995.
- [8] C. Y. Jeong, J. G. Cho, J. W. Baek, and D. W. Yoo " A New Intergerated Controller Based 100kVA Mobile Engine Generator for Single/Three Phase Distribution Line Backup", APEC 2000, pp 902-907
- [9] Luis A. Moran and Juan W. Dixon and Rogel R.Wallac," A Three-Phase Active Power Filter Operating With Fixed Switching Frequency for Reactive Power and Current Harmonic Compensation", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42 No. 4, pp. 402-408, August 1995.