

3상 라인인터랙티브형 능동전력필터 시스템을 위한 LC필터 출력특성 해석 및 설계

나종석, 김용진, 이승요, 조준석, 목형수, 최규하
 건국대학교 전기공학과

Analysis of Output Characteristics and Design of LC Filter for Line-Interactive 3-Phase APF

J.S. Na, E.J. Kim, S.Y. Lee, J.S. Cho, H.S. Mok, G.H. Choe
 Dept. of Electrical Engineering Konkuk University.

Abstract - This paper describes a 3-phase Line-Interactive APF system and analyzes its operating characteristics considering LC Filter output characteristics. Topology of APF is similar to that of Off-Line UPS in the point of parallelly operating inverter system. So it is possible to be multi-functioned active compensating system according to power condition Likewise, this actively operating system from APF to UPS, and vice versa is often to be called Line-Interactive system. And more than that, Line-Interactive system needs precise design of LC filter on converter output side to make this system fully operate in both APF and UPS modes. The problem in this point is how to design LC Filter to be contented with two different system characteristics, so this paper analyzes this problem and proposes its design procedures Then, suggested filter design is verified to be contented by the simulations and experimental results

일반적으로 전압형 능동전력필터는 컨버터로 구성되어 컨버터 출력단에 주입 고조파전류의 필터링 및 제어를 위한 파라미터로서 인덕터를 두게되며, 인버터로 구성되는 무정전전원장치의 경우에 있어서는 출력전압의 정현화를 위하여 인덕터와 커패시터로 구성되는 LC저역통과 필터를 인버터 출력측에 사용한다. 따라서 라인인터랙티브형 보상시스템이 원활한 동작을 하기 위해서는 각각의 기능에 맞는 필터를 따로 구성하여 각 보상 모드에서 각각의 필터를 선택적으로 사용하여야 하는데 이는 보상 시스템의 회로 및 제어를 복잡하게 만드는 단점으로 작용한다.

따라서 본 논문에서는 라인인터랙티브형 시스템이 각각의 동작 모드에서 동일한 필터구성을 갖는 경우에서도 각각의 동작이 원활히 수행될 수 있도록 하기 위한 LC필터의 해석 및 설계를 수행하였으며 시뮬레이션 및 실험을 통해 설계된 필터의 특성을 분석하였다.

1. 서론

고조파 및 무효전력을 보상하기 위한 보상장치로서 능동전력필터는 그 회로 구조가 무정전전원장치와 유사하고 그 동작을 위한 제어부의 변경으로 능동전력필터에서 무정전 전원장치로 또는 무정전전원장치에서 능동전력필터로의 전환 운전이 가능한데 이와 같이 전원상태에 따라 보상시스템을 능동전력필터 또는 무정전전원장치로 운전하는 시스템을 라인인터랙티브형 시스템이라 한다[1]. 전원의 질적 향상으로 전원의 정전 보다는 반도체 전력변환장치와 같은 비선형 부하로 인해 발생하는 고조파 전류의 전원오염이 더욱 문제시 되고 있는 현 시점에서 이러한 라인인터랙티브형 시스템의 사용은 전원 정상시 능동전력필터로 운전하고 전원 정전시 무정전전원장치로 운전함으로써 보상 시스템의 이용 효율을 한층 높일 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 이러한 라인인터랙티브형 시스템을 구성하여 보상시스템으로 운전하기 위해서는 첫째 컨버터 또는 인버터의 출력측 필터가 두가지 운전모드의 필터 출력특성을 적절히 만족시켜야 하고, 둘째로는 전원전압의 상태 변화에 따라 각 시스템의 운전 모드전환시 전원의 위상과 시스템의 제어 위상각을 일치하도록 해 주어야 하는 등 여러 가지 해결해야 할 부분들이 존재한다[2].

2. 라인인터랙티브형 3상 능동전력필터 시스템

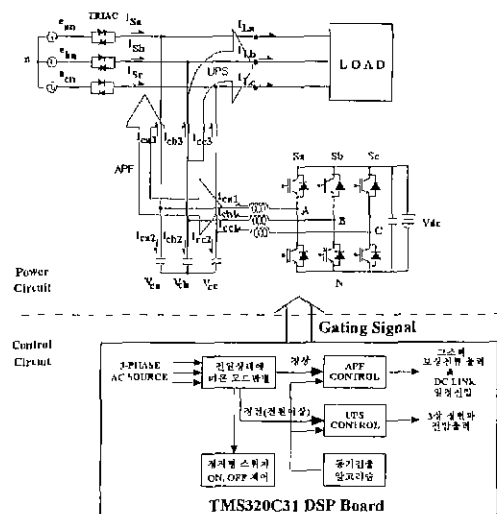


그림 1. 라인인터랙티브형 시스템의 전체구성도

그림 1은 제안된 무정전 전원 기능을 갖는 라인인터랙티브형 3상 능동전력필터 시스템의 전체적인 구조와 동작원리를 개념적으로 나타낸다. 전력회로는 크게 전원측 절환스위치, 3상 풀-브릿지 컨버터/인버터, LC필터, 직류단 배터리 및 제어부로서 디지털 제어기로 사용된 DSP 보드로 구성된다.

시스템의 동작은 전원전압이 정상일때는 능동전력필터로서 운전되며 컨버터는 고조파 및 무효전력을 보상해주는 역할을 하게된다. 정전이 발생하면 전원측의 정지형 스위치는 오픈되며 그림에서와 같이 부하에 전력을 공급해주는 오프라인 UPS로서 동작한다[1,2]. UPS 운전시 필터 커패시터부의 전압제어를 통해 부하에 공급해야할 일정한 크기의 전압이 유지되도록 해주어야 하며 이때 적정용량의 커패시터를 필요로 한다. 따라서 라인인터랙티브형 시스템에서 능동전력필터로 운전하는 경우 필터 커패시터로 흐르는 전류를 컨버터의 기준 출력전류에 포함시켜 주어야 하는데 만일 이 전류 성분을 고려하지 않고 컨버터 출력전류 (i_{cabc1})를 그림 2의 (f)와 같이 제어하는 경우, 그림 2의 (e)와 같은 필터 커패시터 전류의 영향으로 전원측으로 주입되는 보상전류 (i_{cabcS})는 그림 2의 (d)와 같이 나타난다. 따라서 보상후의 전원전류는 그림 2의 (c)와 같이 전원전압과 위상이 일치하지 않게 되며 전원측에 무효 전력을 발생시키는 요인으로 작용하게 된다.

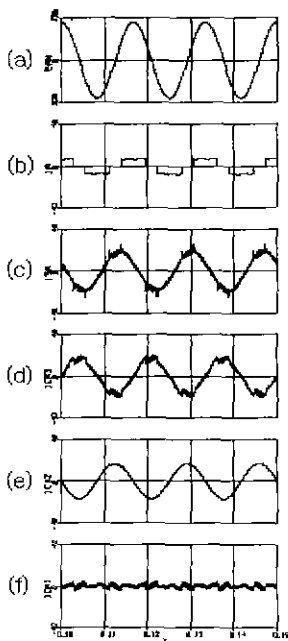


그림 2. APF 운전시 필터커패시터의 영향을 고려하지 않고 제어하는 경우의 각부 파형

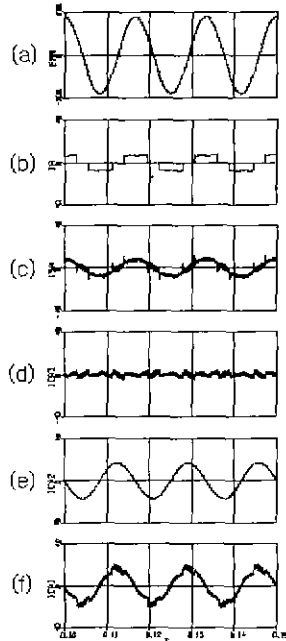


그림 3. APF 운전시 필터커패시터의 영향을 고려하여 제어하는 경우의 각부 파형

따라서 라인인터랙티브형 시스템에서는 이러한 커패시터의 영향을 고려하여 컨버터 출력전류를 제어하여야한다.

즉 그림 3의 (f)와 같이 컨버터 기준 출력전류에 필터 커패시터로 흐르는 전류를 고려해 줌으로써 전원측으로 주입되는 전류의 파형이 그림 3(d)와 같은 형태의 보상전류가 되도록 해주어야 한다. 이때 필터 커패시터의 영향으로 인해 발생하는 무효전력성분을 감당하기 위해 컨버터의 무효전력 보상용량은 보다 커지게 된다. 그러나 라인인터랙티브형 시스템은 이미 전전압 보상을 수행하는 UPS 운전시의 인버터 용량으로 시스템이 설계되므로 APF 모드시의 컨버터 용량은 문제시 되지 않는다. 그림 3 (c)는 필터 커패시터를 고려하여 컨버터 기준 출력전류를 설정한 경우의 보상후 전원전류를 나타내고 있다.

3. 컨버터/인버터 출력단 LC필터 설계 및 특성해석

UPS 동작시의 인버터 출력전압의 정현화와 APF 동작시 PWM 형태의 컨버터 출력전압을 보상 주입전류로 변환해 주기 위해 컨버터 출력측에 LC필터를 설치하여야 한다. 이때 두가지 운전 성능을 모두 만족시키기 위해 필요한 인덕턴스와 커패시턴스의 범위는 시뮬레이션을 통해 UPS 운전시 출력전압의 THD와 APF의 경우 보상 후 전원전류의 THD를 최소화 시키는 관점에서 설계된다.

3.1 LC필터 설계

APF 운전 모드에 있어서 급격한 전류변화를 갖는 보상전류의 원활한 제어와 전류필터링 작용을 위해 인덕터의 인덕턴스는 적절한 값으로 설정되어야 하는데, 본 논문에서는 식 (1)을 사용하여 정격전류에서 정격전압의 3~5% 전압강하를 발생하도록 하는 값으로 우선 설정하고 이를 기준으로 필터 커패시터의 커패시턴스를 조금씩 변경하면서 시뮬레이션하여 그 보상후 전원측 전류의 THD가 최소화되는 시점에서 인덕턴스를 선정하도록 하였다.

$$L = \frac{\epsilon V}{\omega I} \quad [H] \quad (1)$$

여기서 V[V]는 정격전압, I[A]는 정격전류, ω 는 출력각주파수, ϵ [%]는 전압강하율이다. 3상 시스템에서의 부하 3[kVA], 선간 실효치 전압 220[V]에 대해 각 상에 대한 인덕터의 용량은 식 (1)로 부터 1.3[mH]~2.5[mH] 범위로 산출되며 이를 기준으로 필터 커패시터의 커패시턴스를 200[μ F]~400[μ F]의 범위로 변동시켜 시뮬레이션을 실시하였으며 이중 250[μ F]과 400[μ F]에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 이때 보상후 전원전류의 THD가 인덕턴스 1.3[mH]에서 커패시터의 용량에 상관없이 가장 양호한 특성을 나타내고 있으나 필터 커패시터의 용량이 적정이상 크게되면 APF 운전시 그 만큼의 무효전력분을 컨버터가 감당하여야 하고 전원전류 보상효과도 저하시키게 되므로 적절한 커패시터 용량을 선정함이

바람직하다. 아울러 선정된 커패시터의 커패시턴스는 UPS 운전시 UPS 동작특성에도 밀접한 영향을 미치기 때문에 UPS 동작특성을 또한 고려하여 설정하여야만 한다.

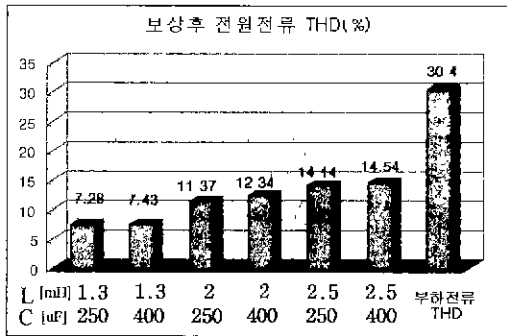


그림 4. APF 운전시 L 및 C에 따른 보상후 전원전류의 THD

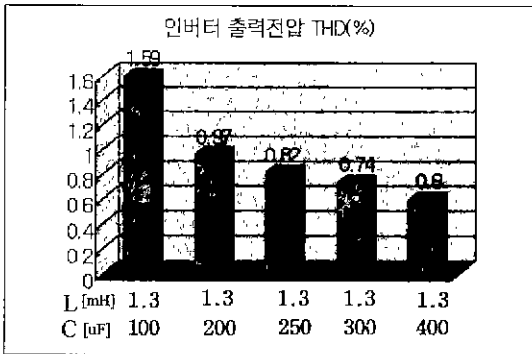


그림 5. UPS 운전시 L 및 C에 따른 출력전압의 THD

따라서 그림 4의 결과로부터 컨버터 출력단의 인덕턴스를 1.3[mH]로 설정하고 이 값을 기준으로 UPS 모드에서 여러 가지 커패시턴스에 따른 인버터 출력전압의 THD를 시뮬레이션하여 얻었으며 그 결과를 그림 5에 나타 내었다. 그림 5에서와 같이 UPS 모드시 커패시터의 커패시턴스가 400[μF]에서 가장 양호한 출력 특성을 나타내나 필터 커패시터의 용량이 커지면 APF 운전시 컨버터가 출력해야할 무효전류 성분이 증가하므로 필터 커패시터의 용량을 선정하는데 있어 절충안이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 UPS의 출력 전압 THD가 0.82[%]로 양호한 특성을 나타 낼 뿐만아니라 APF의 운전특성에 미치는 영향을 고려하여 250[μF]의 커패시턴스를 설정하였다. 이때 UPS 운전시의 LC 저역통과 필터의 차단주파수는 397[Hz]이다.

3.2 LC 값에 따른 능동전력필터 모드의 특성

능동전력필터 모드로 동작시 컨버터에서 전원측으로 주입되는 보상전류(i_{cabcl})는 UPS 운전을 위한 커패시터의 영향을 받게 된다. 즉, 컨버터에서 발생하는 보상전류는 부하측 임피던스가 크므로 모두 전원측으로 흘러야 하지만 컨버터와 전원 사이에 그림 6과 같이 커패시터가 존

재하는 경우 실제 전원측 계통 임피던스가 이상적인 영(0)이 아니어서 어느정도 값을 가지고 있다고 한다면 일부 보상 고조파 주입 전류가 커패시터 쪽으로 흐를 수 있어 전원전류의 보상 효과가 다소 저감될 수 있다.

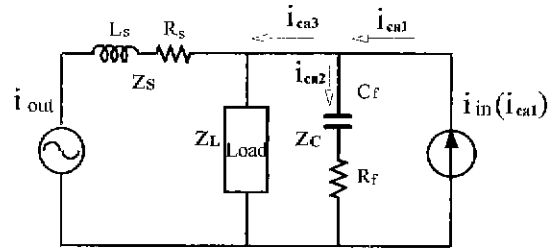


그림 6. 능동필터로 운전시 상당 등가회로

즉, 필터 커패시터의 임피던스는 $Z_c = 1/\omega C$ 이므로 C 값이 큰 경우 높은 차수의 주파수 성분을 갖는 고조파는 그 임피던스(Z_c)가 작아지므로 커패시터측으로 보상전류(i_{cabcl})중 일부 성분의 유입이 가능하다. 반면 C값이 작으면 임피던스(Z_c)가 커지므로 대부분의 보상전류가 전원측으로 주입되어 필터 커패시터가 존재하더라도 능동필터의 성능향상을 기대할 수 있다.

그러나 전원이상시 UPS로 동작하는 라인인터랙티브형 시스템에서는 적정 크기 이상의 커패시터 용량이 요구되므로 커패시터 용량 선택에 따라 전원측 전류의 보상효과가 영향을 받게되며 가능한 작은 용량을 선정하여야 능동전력필터 모드시의 성능을 만족시킬 수 있다. 다음에서 이러한 커패시터 용량 선정에 따른 LC필터 출력특성을 주파수 해석을 통해 확인 할 수 있다.

3.3 각 운전 모드에 따른 필터 주파수 특성

본 논문에서 구성한 UPS 운전시의 LC 저역통과 필터의 상당 등가회로는 그림 7과 같으며 그 입출력 전달함수는 식(2)와 같다.

$$G_{ups}(s) = \frac{-\frac{R_f}{L}s + \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R_f}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (2)$$

여기서 L과 C는 필터의 인덕턴스 및 커패시턴스이고 R_f 는 기생 저항을 나타내고 있다.

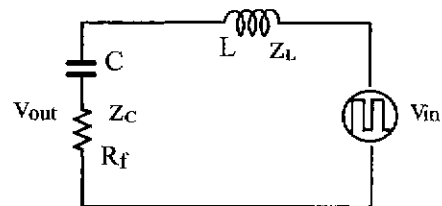


그림 7. UPS 운전시 상당 LC 저역통과 필터의 등가회로

그림 8은 라인인터랙티브형 보상시스템이 능동전력필터로 운전되는 경우 전원측의 계통임피던스를 고려한 경우에 대한 상당 등가회로를 나타낸다. 이때 컨버터는 전류원으로 동작하며, 입출력 전류에 대한 전달함수는 식(3)과 같이 얻을 수 있다.

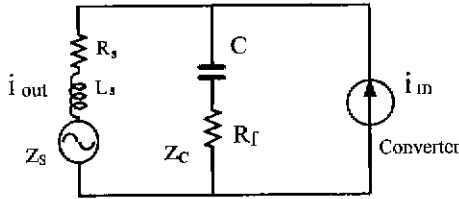
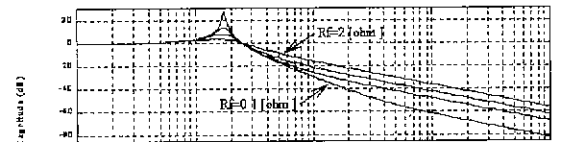


그림 8. 능동필터로 운전시 단상 등가회로

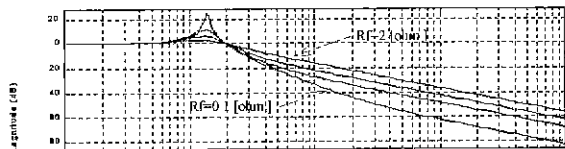
$$G_{abr}(s) = \frac{\frac{R_f}{L_s}s + \frac{1}{L_s C}}{s^2 + \frac{R_f + R_s}{L_s}s + \frac{1}{L_s C}} \quad (3)$$

그림 9는 UPS 운전시 LC값 선정에 따른 LC필터 주파수 특성을 식 (2)를 이용하여 나타낸 것이다. 앞 절에서 설정한 LC 범위의 값들에 대해 필터 인덕턴스를 1.3[mH]로 고정하고 커패시턴스를 250[μF], 400[μF]으로 변동하였을 경우에 대한 보드선도를 나타 내었으며 각각의 경우 차단주파수가 약 400[Hz], 320[Hz] 정도임을 알 수 있다. 또한 그림에서 모두 댐핑저항 R_f 값을 0.1[Ω], 0.5[Ω], 1[Ω], 2[Ω]으로 하여 각각의 경우를 비교하였으며 그림에서와 같이 $R_f = 2[Ω]$ 정도면 공진 주파수에서의 공진현상을 방지 할 수 있음을 알 수 있다.

그림 10은 APF 운전시 필터 커패시터 값에 따라 전원측으로 주입되는 보상전류의 주파수 성분을 나타낸다. 전원측 전류의 정현화와 역률개선을 목적으로 전원측으로 주입되는 보상전류의 보상성분은 홀수차 고조파 성분과 무효전력 성분으로서, 필터 커패시터의 값이 20[μF]~400[μF]으로 커지거나 높은 차수의 고조파 성분의 전류가 흐를수록 커패시터측 임피던스가 작아진다. 그리고 그에 따른 전원측과의 임피던스 차이에 의해 보상전류의 전원측 주입성분이 변화하게 된다. 그림 10 (a)의 경우는 C값을 작게하여 이상적인 능동전력필터 운전특성을 보여주는 예로서 이때의 차단주파수는 약 4933[Hz]이며 컨버터의 고주파수의 리플성분만을 제외한 고조파 성분이 전원측으로 주입됨으로서 그 보상 성능이 커패시턴스가 큰 경우보다 우수할 것임을 예측할 수 있다. 이에 비해 커패시턴스가 400[μF]인 그림 10(d)의 경우는 차단주파수가 1114[Hz]로서 17차 성분 이상은 차단되어 전원측으로 주입되지 못함으로써 그림 (a)의 경우에 비해 전원전류 보상 효과가 저하될 것임을 예측 할 수 있다.

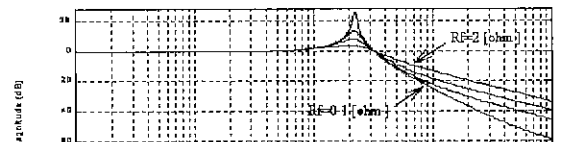


(a) 1.3[mH], 250[μF]

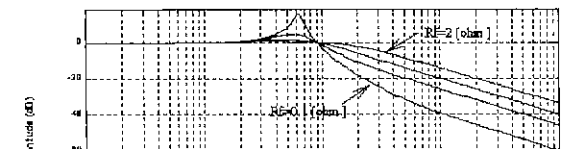


(b) 1.3[mH], 400[μF]

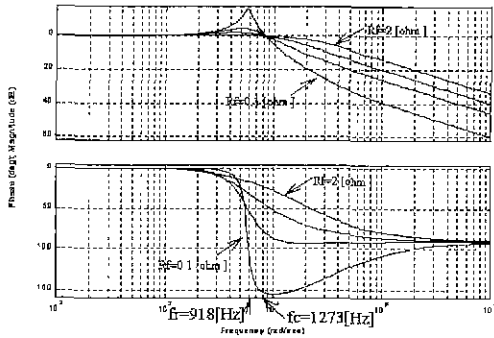
그림 9. UPS 운전시 L 및 C에 따른 필터출력 주파수 특성



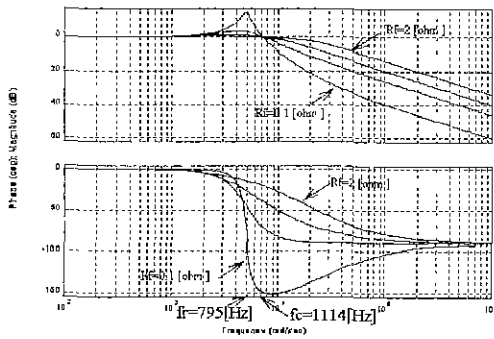
(a) L=1.3[mH], C=20[μF]



(b) L=1.3[mH], C=250[μF]



(c) L=1.3[mH], C=300[μF]



(d) L=1.3[mH], C=400[μF]

그림 10. APF 운전시 L 및 C에 따른 필터출력 주파수 특성

4. 실험 및 결과고찰

라인인터랙티브형 보상시스템에서 설계된 LC필터가 능동전력필터 및 무정전전원장치 각각의 모드에서 원활한 출력특성을 나타내는지를 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험을 위한 조건은 표1과 같다.

표 1. 실험 조건

	APF+UPS
전원	3상 220[V]
직류측 전압	360[V]
필터 인덕턴스	1.3[mH]
필터 커패시턴스	250[μF]
부하	다이오드 정류기 3[kVA]
샘플링주파수	10[kHz]

우선 무정전전원장치의 실험결과로서 그림 11은 UPS 모드시 인버터 출력의 기준 상전압을 180[V]로 한 경우의 출력 전압파형을 나타내고 있다. 실험결과를 통하여 무정전전원장치가 원하는 기준 출력전압을 원활히 발생시키고 있음을 확인 할 수 있다.

그림 12는 능동전력필터의 운전 실험결과로 (a)는 전원 전압, (b)는 부하전류, (c)는 컨버터 출력전류, (d)는 전원측에 흐르는 보상후 전류파형을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 그림 (b)의 구형파 부하전류가 보상후 그림 (d)의 정현파 전류로 보상되었음을 알 수 있다. 이때 그림 13은 보상전후에 있어서 보상전 부하전류 및 보상후 전원전류

의 고조파 스펙트럼으로서 보상전 5, 7차의 저주파수의 고조파 성분이 보상후 상당량 감소하였음을 알 수 있다. 그러나 17차수에 해당하는 고조파 전류 성분이 다소 증가하였는데 이는 출력측 필터에 커패시터가 달려 있기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 그림의 (c)에서는 컨버터 출력전류에 필터 커패시터에 흐르는 전류성분이 포함되어 나타남을 확인 할 수 있다.

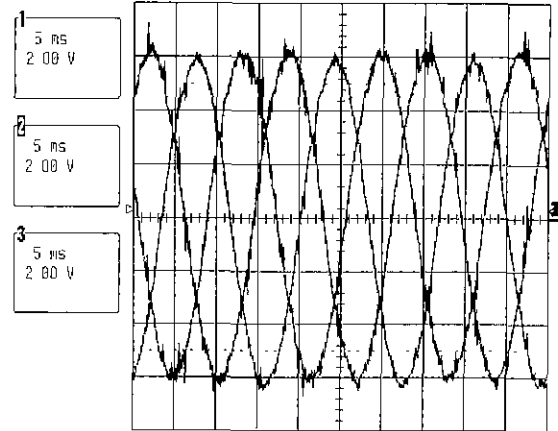


그림 11. UPS 모드시 인버터 출력 상전압 [60V/DIV]

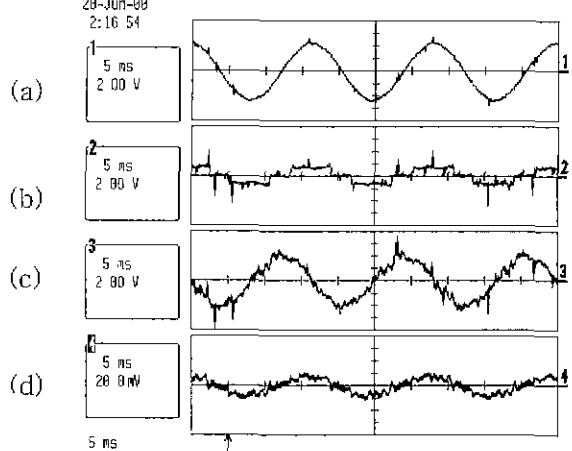


그림 12. 능동전력필터 운전시 실험결과
(a)전원전압 (b)부하전류
(c)인버터 출력전류 (d)전원전류

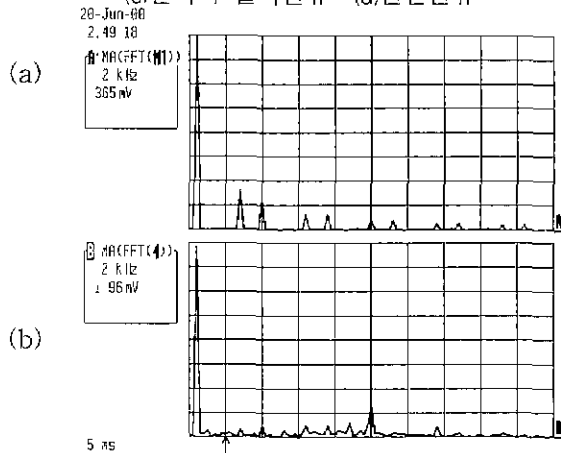


그림 13. 보상전후의 전원전류 고조파 스펙트럼

(a) 보상전 스펙트럼 (b) 보상후 스펙트럼

5. 결론

전원 정상시 능동전력필터로 운전하고 전원 정전시 무정전전원장치로 운전하는 라인인터랙티브형 보상 시스템에 있어서 컨버터 또는 인버터 출력측의 LC 필터를 설계하고 그 출력특성을 해석하였다. 먼저 APF 운전을 기준으로 설정된 인덕터에 대해 커패시터를 $100[\mu F] \sim 400[\mu F]$ 의 범위로 변동시켜 시뮬레이션을 실시하여 UPS 출력전압의 THD와 APF의 보상 후 전원전류의 THD를 최소화시키는 관점에서 필터 설계를 수행하였다. 능동전력필터 운전시와 UPS 운전시 각기 다른 필터 입출력 전달함수 특성을 갖게 되는데 이 두가지 모드의 출력특성을 보드선도를 이용하여 주파수해석을 수행 하였고 3[kVA]급 실험장치를 구성하여 실험을 실시하였다. 실험을 통해 설계된 LC 필터가 서로 다른 운전모드에서 각기 충실하게 그 역할을 수행함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] R. Cheung, P.Yu. "New-Interactive UPS System with DSP-based Active Power-Line Conditioning", PESC, pp.981-985, 1996.
- [2] 나종석, 이승요, 조준석, 목형수, 최규하, "무정전전원기능을 갖는 라인인터랙티브형 3상 능동전력필터", 추계 전력전자 학술대회 논문집, pp.273-278, Nov. 1999.
- [3] Hirofumi Akagi, Akira Nabae and Satoshi Atoh, "Control Strategie of Active Power Filters Using Multiple Voltage-Source PWM Converters", IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-22, no.3, 1986, pp. 460-465
- [4] C. Lin Chen, C. E. Lin "An Active Filter for Unbalanced 3-phase System Using Synchronous Detection meathod", PESC, pp.1451-1455, 1994.
- [5] T. Kawabata, et. al., "Digital Control of Three-Phase PWM Inverter with LC Filter", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 6, no. 1, pp. 62-72, Jan. 1991.
- [6] J.S.Cho, S.Y. Lee, H.S. Mok, G.H. Choe, "Modified Deadbeat Digital Control for 3-Phase Uninterruptible Power Supply", IAS'99 Vol.3. pp. 2208-2215 Oct. 1999.