

변전소 및 공장전원 실시간 전원품질 감시시스템 구축방안

Monitoring for the Electric Power Quality at a Substation or a Plant

박 홍 진
(Hong Jin Park)

포항공대 철강학부 전화 : (054)279-5092, 팩스 : (054)279-8119, E-mail : hodokagi@postech.ac.kr

Abstract : 전원품질은 전원의 전압, 전류 및 주파수 성질을 나타낸다. 이러한 품질은 전력시스템에 대한 광범위한 전력의란이나 신호간섭 등에 의해 변화한다. 전력반도체에 의한 인버터, 컨버터, 제어기 등의 기술이 다양해지고 그 응용범위가 확대됨에 따라, 전원계통에 고조파에 의한 전력품질에 오염이 많이 발생한다. 전력전자기술이 응용하는 다양한 전력기기 들은 고조파 발생원이 되어, 전력에너지를 사용하는 모든 분야에서 전력품질 문제가 대두되었고 이 문제를 해결하기 위해 많은 노력을 기울여왔다.

본 논문에서는 무효전력보상과 고조파전류를 보상하기 위한 3상 능동전력필터의 모델을 제안한다. 제안된 시스템은 PWM 전압원 인버터의 구조로 되어있으며 두 가지의 특징을 가지고 있다. 첫째는 고정된 주파수로 동작한다는 점이며 둘째는 비선형 부하 하에서 부하전류의 무효성분을 검출 및 계산을 하지 않고 무효전력과 고조파전류를 보상할 수 있다는 점이다. 또한 시간영역에서 제어를 함으로써 간단하게 제어기를 설계할 수 있다.

Keywords : power quality, 능동전력필터, 수동필터, monitoring.

1. 서론

최근 비선형부하의 증가로 인해 야기되는 외란과 간섭 등에 의해 전원의 품질이 저하되는 문제가 많이 발생한다. 전력용 컨버터나 아크로 같은 비선형 부하의 증가는 전력시스템의 동작에 다양한 비정형적인 현상을 초래한다. 이러한 것들 중 가장 중요한 것은, 고조파 오염, 무효 전력량의 증가, 전력시스템의 전압변동 등이다. 이러한 문제들은 민감한 부하와 전력분배시스템에 미치는 영향 때문에 전력시스템을 다루는 전문가들에게는 가장 주요한 관심거리가 되고 있으며, 전력시스템의 손실을 증가시키고, 회전기기류에서 과도한 열을 야기 시키고, 통신 회로 상에서 중요한 장애를 야기 시킬 수 있다. 또한 장비에 오동작을 일으킬 수 있는 제어회로상의 노이즈를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제점들은 민감한 전기장치를 사용하는데 커다란 문제가 되고 있으며, 이를 위해 전원품질의 감시와 보상 문제가 대두되고 있다. IEEE 표준 446-1987 [1]은 컴퓨터 전원장치 등과 같은 민감한 부하에 대하여 전원 품질의 오차허용 범위를 나타내고 있다. 표1에 나타낸 IEEE 표준 446-1987에서는 15% 이상의 전압강하는 30주기(또는 500 ms) 이상에서는 허용하지 않고 있다. 또한 35%의 전압강하는 단지 1사이클(또는 16.7 ms)에서만 허용하며 역률은 0.8 이상을 요구하고 있다. 이러한 요구사항을 맞추기 위하여 전압조정과 역률 조정은 매우 중요한 문제이다.

통상적으로 수동 LC 필터는 고조파를 제거하고, 역률을 증가하는데 사용되어 왔다. 그러나 실제사용상에서는 이러한 수동 2차 필터는 다음의 문제점/불리한 점을 나타내고 있다.

파라미터	영역 또는 최고값
1. 정상상태의 전압조정	+5,-10에서 +10%, -15% (ANSI C 84.1-1970 은 +6, -13%)
2. 전압 교란	
가. 순간 저전압	- 0.5초이내에서 -25~ -30%
나. 과도상태의 과전압	- 4 ~20ms 에서 -100% - 0.2ms 이내에서 +150 ~ 200
3. 고조파 전압 왜형	선형부하에서 3 ~ 5
4. 노이즈	규정 없음
5. 주파수 변화	60Hz ±0.5Hz ~ ±1Hz
6. 주파수 변화율	1Hz/s
7. 3상 상전압 불평형	2.5 ~ 5
8. 3상 부하 불평형	5 ~ 20% (각상에서 최대)
9. 역률	0.8 ~ 0.9
10. 부하량	0.75 ~ 0.85 (부하 연결시)

표 1 주요 컴퓨터 제조업체의 부하 파라미터와 입력 전력품질의 영역

1. 전원 측 임피던스는 필터링 특성에 강하게 작용을 한다.
2. 고조파 전류 요소와 기본파 전류요소가 필터로 흐를 때 필터의 용량은 두개의 전류를 고려하여 정해져야 한다.
3. 고조파 전류 요소가 증가할 때, 필터는 과부하가 될 수 있다.
4. 전력시스템과 수동필터 간의 병렬공진은 특정주파수에서 전원 측에 고조파 전류의 증폭을 야기한다.

5. 수동필터가 전력시스템과 직렬공진을 일으켜 발생시킬 수 있는 전압변형에 의해 수동 필터로 과도한 고조파 전류가 흐를 수 있다.

이러한 문제들을 극복하기 위해서, 능동전력필터가 연구, 개발되었다[2]. 최근에는 그들 각각의 제어전략을 가진 다양한 능동전력필터의 구조가 제안되고 있고, 점차적으로 고전력 비선형 부하에 의해 야기되는 문제에 대한 다양한 해결책으로 인식되고 있다[3]-[7].

본 논문을 통해 제안하는 3상 능동전력필터의 구조는 그림 1 과 같다. 제시된 구조는 직류 캐패시터에 연결된 PWM 전압원 인버터에 근거한 것이다[5]-[7]. PWM 전압원 인버터를 사용하는 능동전력필터를 다루는 많은 자료들이 있을 지라도, 본 논문에서 나타난 3상 능동전력필터는 다음의 방법에서 이전에 검토된 접근방법과 다르다.

1. 무효전력보상은 부하전류의 무효성분을 감지하거나 따로 계산을 하지 않고 이루어진다. 그리하여 간단한 제어시스템을 만들 수 있다.
2. 전류제어는 히스테리시스 전류제어보다 더 나은 스위칭 패턴을 나오게 하는 일정한 스위칭 주파수로 수행된다[8]. 이것은 인버터 출력의 고주파 전류를 감소시키고 반도체장비에 스트레스를 적게 한다.
3. 전류보상은 시간영역에서 실행하여 시스템이 빠른 응답성을 보이는 장점이 있다.
4. 능동전력필터의 성능을 향상시키기 위하여, 직류전압 제어루프가 이용된다. 직류전압 제어루프를 사용하여 직류전압을 안정화함으로써 고조파 전류의 크기를 감소시키고, 인버터의 전압이득을 증가시키게 된다.
5. 전압과 전류 제어루프는 간단하고, 하드웨어로 구현하기가 쉽다.

또한, 직렬형 능동전력필터[10]에 비해 본 논문에서 제안하는 시스템은 부하와 병렬로 연결되어 있는 구조이다. 직렬형은 입력전압을 보상하는 구조임에 반해, 병렬형은 입력의 전류를 보상하게 된다. 병렬로 연결된 능동전력필터는 전력시스템의 단락문제가 발생할 때 직렬형에 비해 쉽게 시스템을 보호할 수 있는 구조이다. 그리고 고정주파수로 스위칭을 하여 능동전력필터에 의해 발생하는 고주파성분을 쉽게 필터링할 수 있는 장점이 있다.

본 논문은 포괄적인 정상상태와 과도상태의 능동 전력필터의 구조를 설명하고 분석한다. 또한, 전력회로와 제어회로의 설계기준을 제안한다. 마지막으로 예측 가능한 결과는 시뮬레이션을 통해 보여준다.

2. 시스템 설명

본 논문에서 제안하는 능동전력필터의 주요부분은 그림

1에 나타난 것과 같이 직류 캐패시터에 연결된 PWM 전압원 인버터이다. 이 인버터를 통해 고조파 전류를 보상하는데, 고조파 전류 보상은 동등한 크기이나 부호가 반대인 고조파 전류요소를 투입하여 이루어지게 된다. 이러한 보상을 통해 입력전류의 왜곡을 상쇄하고, 연결된 전력시스템상의 전원품질을 향상한다[3][4].

그림 1에서 알 수 있듯이 제안된 시스템은 전압원 인버터가 입력전원과 부하 사이에 병렬로 연결되어 있는 구조이다. 이 시스템의 제어 장치와 제어시스템의 블록다이어그램은 그림 2에 나와 있으며, 이 제어장치는 전류제어기, 전압제어기, 게이트 파형 생성기, 참고전류 생성기 등으로 구성되어 있다.

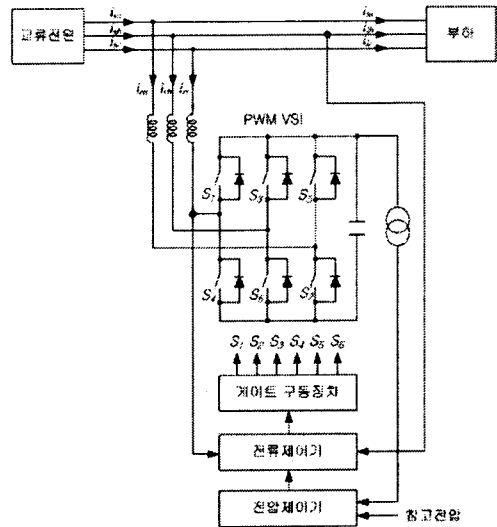


그림 1. 능동전력필터

인버터에 의해서 생성된 교류전류는 참고전류 발생장치로부터 얻어진 참고신호를 따라야 한다. 이 참고전류는 그림 3 과 같이 구할 수 있다. 입력전류의 모양을 정현파라고 가정하고 부하의 전류를 감지하여 정현파 입력전류에서 부하전류를 빼면 인버터 전류의 참고전류를 구할 수 있다. 인버터의 전류가 참고전류를 따라가게 되면, 부하전류의 모양과 관계없이 입력전류는 항상 정현파의 모양을 따르게 되어 역률이 1에 수렴하게 된다. 기존에 제안되었던 방식[9]은 전류의 참고값을 만들기 위해 부하전류를 감지하여 여기서 기본파 성분을 검출하는 기능이 필요 하였으나, 본 논문에서 제안하는 제어 알고리즘에서는 부하 전류의 기본파 성분의 검출 없이, 부하 전류의 모양에 관계없이 어떠한 비선형 부하에도 역률을 1에 수렴하도록 제어할 수 있게 된다.

그림 2의 참고전류 생성기의 정현파의 위상은 입력전압과 동기화되고, 크기는 직류 전압제어 장치에서 결정된다.

부하의 전류가 커지게 되면 인버터의 직류측 전압이 떨어지게 되어 이를 보상하기 위해 입력전류의 크기가 증가해야 하고, 부하의 전류가 작아지면 인버터의 직류측 전압이 증가하여 이를 보상하기 위해 입력전류의 크기가 감소하게 된다. 여기서 만들어진 정현파와 부하전류에 의해 만들어진 참고전류에 의해 인버터의 동작이 결정된다. 인버터의 전류가 참고전류를 따라가게 되면, 고조파 전류요소를 공급하여 부하에서 필요한 무효전력을 공급하고, dc 전압을 일정하게 유지하도록 하며, 스위칭 손실을 보상하기 위해 필요한 유효전력의 미세한 부분을 공급한다. PI type의 전압제어기에 의해 일정하게 유지된 직류전압에 의해 인버터 전압의 이득이 증가되고, 고주파 인버터 전류의 고조파요소 성분이 감소된다.

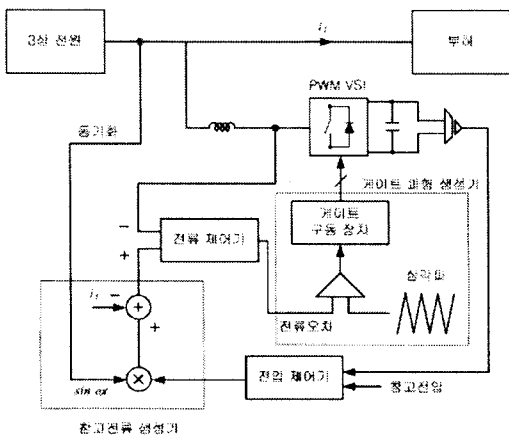


그림 2 능동전력 필터링 제어시스템의 블록다이어그램

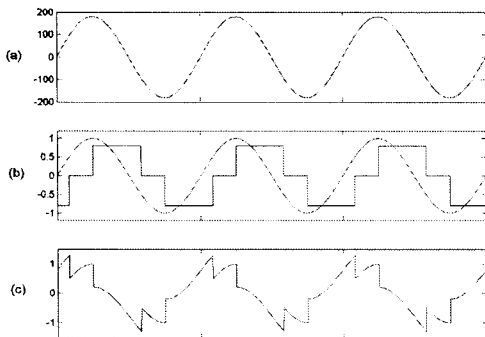


그림 3. 전류 참고파형의 생성과정 : (a) 입력전압, (b) 입력전류(i_s)의 참고 값과 임의의 부하전류(i_l), (c) 인버터의 참고파형.

앞서 설명한 인버터 전류의 참고값과 실제 인버터 전류의 값으로 동작하는 전류제어기의 출력이 삼각파형과 비

교되어 스위칭 신호를 만들게 되는데, 단순히 히스테리시스를 이용한 뱅뱅제어를 이용하지 않고 가상의 히스테리시스 창안에 고정주파수의 삼각파형을 추가하여 게이트 구동 파형을 만들어 낸다. 이렇게 게이트 구동 파형을 만들게 되면 스위칭 주파수가 고정되는 장점이 있고, 또한 전류오차가 삼각파형의 범위 내에 존재하므로 자동적인 과전류 방지동작을 하게 된다.

능동전력필터의 안정성은 인버터의 직류전압을 참고전압에 가깝도록 유지하는 능력과 관계가 있다. 이 안정성은 이미 연구가 되었는데[10], 자체적으로 직류측 전압을 제어할 수 있는 능력이 있는 인버터의 경우에는 직류 캐패시터의 값 등에 관계없이 안정한 시스템이 된다. 또한, 인버터에 의해 흡수되는 유효전력의 최대값을 제한함으로써 시스템의 안정성을 보장할 수 있다. 이 최대값은 직류측 전압차의 최대값을 제한하여 구현을 하는데 이 제한으로 인해 부하전류의 기본파 성분의 크기가 제한되게 된다.

3. 시뮬레이션결과

그림 4와 5는 각각 정상상태와 과도상태에 대한 가상의 전류와 전압의 파형을 나타낸다. 그림4에서 보는 바와 같이 부하의 전류는 입력전압과 60° 의 차이를 보이고 있으며, 능동전력필터가 효과적으로 고조파요소와 무효전력을 보상하는 것을 보여준다.

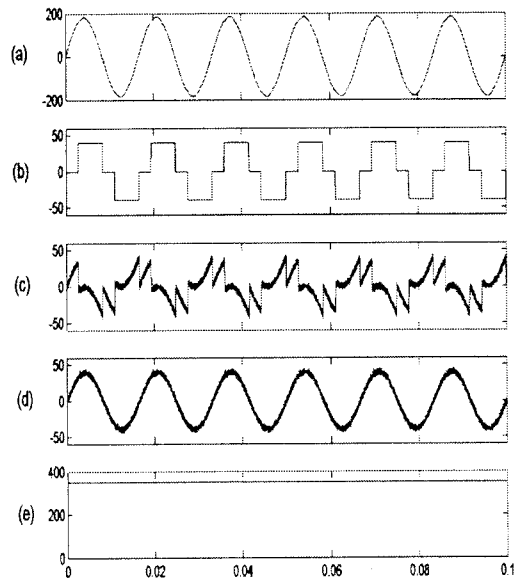


그림 4. 정상상태에서의 시뮬레이션 결과 : (a) 상전압 v_{an} , (b) 부하전류 i_l , (c) 인버터 교류 출력 전류, (d) 전원측 교류전류, i_s , (e) 직류 캐패시터에 걸리는 전압 v_{dc}

그림5는, 부하의 전류크기가 스텝으로 변화하는 모양이다. 이 부하의 전류는 최대값 40[A]에서 80[A]로 변화하였으며 능동전력필터가 이러한 부하운전조건에서도 충분히 빠르게 응답하는 것을 보여주고 있다.

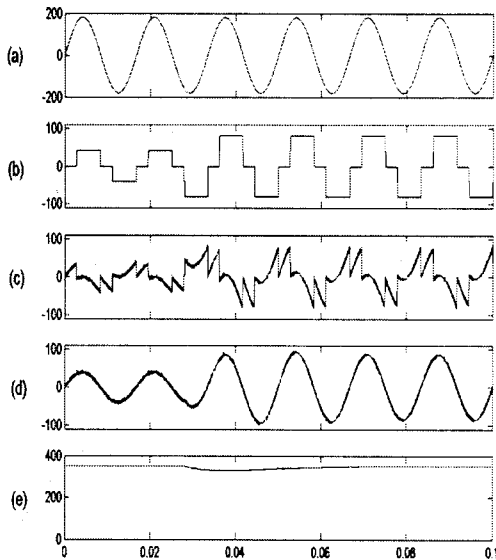


그림 5. 과도상태에서의 시뮬레이션 결과 : (a) 상전압 v_{anr} , (b) 부하전류 i_l , (c) 인버터 교류 출력 전류, (d) 전원측 교류전류, i_s , (e) 직류 캐패시터에 걸리는 전압 v_{dc}

4. 결론

본 논문에서 고정주파수에서 동작하는 능동전력필터를 제안하였다. 제안된 능동전력필터는 고조파 전류요소와 부하측에서 요구하는 무효전력을 보상해 준다. 무효전력보상은 연관되어 있는 무효전력요소를 감지하거나 계산하지 않으며 그리하여 회로구성을 간략화시키고 있다. 능동전력필터의 구현은 직류 캐패시터에 걸리는 전압을 일정하게 유지시켜 주는 직류전압제어 루프에 의해 향상되고 있다. 이런 방법으로 인버터 전압이득은 증가되고, 고주파 리플전류는 감소된다.

참고문헌

[1] IEEE Standard 1159-1995, "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality," IEEE Piscataway NJ, November 1995
 [2] W. M. Grady, M. J. Samotyj, and A. H. Noyola, "Survey of active power line conditioning

methodologies," *Trans. Power Delivery*, vol. 5. no. 3, July 1990, pp. 1536-1542.

- [3] L. Gyugyi and E. C. Strycula, "Active ac power filters," in *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting*, Oct. 1976, pp. 529-535
 [4] H. Kawahira, T. Nakamura, S. Nakazawa, M. Nomura, "Active Power Filter," *Proc. of the IEEE-IPEC*, March, 1983, pp. 981-992
 [5] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Devices without Energy Storage Components," *IEEE Trans. on Industry Appl.*, vol. IA-20, no 3, May/June 1984, pp. 625-630.
 [6] H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh, "Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage-Source PWM Converters," *IEEE Trans. on Industry Appl.*, vol. IA-22, no 3, May/June 1986, pp. 460-465.
 [7] L. Malesani, L. Rossetto, P. Tenti, "Active Filters for Reactive Power and Harmonic Compensation," *Proc. Of the IEEE PESC*, June 1986, pp. 321-330
 [8] M. Kazerani, P. D. Ziogas, and G. Joos, "A novel active current waveshaping technique for solid-state input power factor conditioners," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 38, no. 1, pp. 72-78, Feb. 1991.
 [9] Luis A. Moran, Juan W. Dixon and Rogel R. Wallace. "A Three-Phase Active Power Filter Operating with Fixed Switching Frequency for Reactive Power and Current Harmonic Compensation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 42, no. 4, pp. 402-408, Aug. 1995.
 [10] F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "A new approach to harmonic compensation in power systems," in *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting*, 1998, pp. 874-880.
 [11] Joos, G.; Moran, L.; Ziogas, P., "Performance analysis of a PWM inverter var compensator," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 6, no. 3, pp. 380-391, July. 1991.