

외란관측기를 사용한 복합형능동전력필터의 Deadbeat제어에 관한 연구

문백영*, 조광승*, 박지호', 신동률', 김동완**, 우정인'
 동아대학교 전기공학과 동명대학 전기과**

Deadbeat control of Hybrid Active Power filter using Disturbance-observer

B.Y.Moon*, K.S.Cho*, J.H.Park*, D.R.Shin*, D.Y.Kim**, J.I.Woo*
 Dept. of Electrical Engineering, DongA University
 School of Electricity & Electronics, TongMyong College

ABSTRACT

When LC filter is connected parallel to the Active Power Filter, a problem of the resonance between the Active Power Filter(AF) and LC filter often arises.

In this paper, Deadbeat control of Hybrid Active Power Filter using Disturbance-observer is introduced to solve this problem. By the estimation of the harmonics disturbance using proposed disturbance observer, the compensation characteristics of the AF is improved and the resonant current is suppressed. The validity of proposed disturbance observer is verified from simulation results using PSIM.

1. 서 론

산업기기의 고속·고정도화에 따라 정밀 제어용 전력변환장치가 요구되고, 전원계통에는 이들 고속 스위칭에 의한 전력변환장치가 비선형부하로 동작하여 심각한 고조파전류를 부하측으로부터 역으로 파급시킨다. 이들 고조파를 제거하기 위해서 구조가 간단하며 설치 및 보수유지가 용이한 LC수동필터가 널리 사용되고 있으나, 고조파전류의 순시적 가변성에 대응하기 어려울 뿐만 아니라 비선형 부하전류의 증가에 따라 전원임피던스와 증가적으로 직·병렬의 고조파 공진회로를 구성하게 되므로 고조파전류에 대한 보상 능력이 저하되는 단점이 있다. 수동필터의 이러한 단점을 보완하기 위해서 순시응답적 능동전력필터가 직렬 또는 병렬로 설치되어 사용된다. 하지만, 능동전력필터는 전체 고조파 전류를 보상하기 위해서는 스위칭 소자의 용량이 증대되어 실용화에 문제가 있다. 따라서, 본 논문

에서는 저차의 고조파전류에 동조된 수동필터와 고차의 고조파전류를 제거하는 능동전력필터를 병렬로 연결한 복합형 능동전력필터를 제안한다.^[1] 제안된 시스템은 능동전력필터의 고조파 보상전류 및 수동 LC필터와 능동전력필터의 공진으로 발생하는 공진전류를 보상하기 위해서 외란 관측기를 이용하여 필터간의 공진전류를 추정하였다.^[2] 외란 관측기를 이용하여 필터간의 공진전류를 추정하였으며, 추정된 공진전류 값을 능동전력필터의 전원전류검출치에 역상으로 인가함으로써 공진전류를 보상할 수 있고, Deadbeat 제어를 능동전력필터의 전류제어기로 적용함으로써 매우 빠른 과도응답특성을 얻을 수 있다.^[3] 따라서, 능동전력필터는 공진고조파전류에 대한 등가 임피던스로부터 단락경로를 제공함으로써 고조파 공진을 억제하고, 저차의 고조파전류는 수동필터에 의해서 제거되므로 능동전력필터의 용량을 감소시킬 수 있다. 또한 중부하 변동에 따른 스위칭 전류의 증가가 전원임피던스와 수동LC필터 및 능동전력필터의 등가임피던스를 각각 변동시키므로 야기되는 전류 지연성과 무효전력진동의 증가도 억제할 수 있다.

본 논문에서는 전력전자전용프로그램인 PSIM을 이용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 검토함으로써 제안된 외란관측기를 사용하는 복합형 능동전력필터의 deadbeat제어가 본 시스템에서 타당하다는 것을 확인한다.

2. 제안한 시스템

2.1 복합형 능동전력필터의 구조

그림 1은 본 논문에서 사용된 복합형 능동전력필터의 전체 시스템 구성도를 나타내고 있다.

본 시스템에서 고조파 전류를 발생시키는 비선형 부하로 3상 다이오드 정류기가 사용된다. 여기서

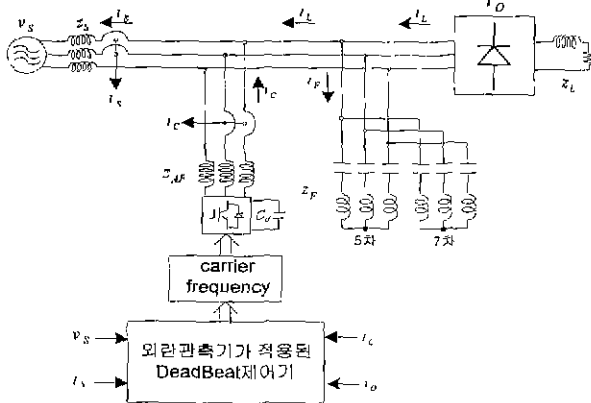


그림 1. 본 시스템의 전체구성도

발생된 고조파 전류 i_L 이 전원단으로 파급되므로서 전원전류 i_S 를 왜곡시키게 된다. 이를 억제하기 위해서 이용된 것이 수동LC필터와 병렬형 능동 전력필터가 복합된 능동전력필터이다. 수동LC필터는 저차 고조파인 5차·7차·고차의 부하 고조파를 식 (1)처럼 제거한다.

$$i_L' = i_L - i_F \quad (1)$$

고조파전류에서 순시적으로 가변되어 전류 i_L' 에 포함되어지는 나머지 부하고조파전류 i_{Lh}' 의 보상을 위해서 전원전류 i_S 를 검출한다. 검출된 전원전류 i_S 는 기본파전류성분인 i_{Sf} 와 고조파전류성분인 i_{Sh} 로 구성되어 있다. 여기서 능동전력필터의 보상전류 i_C 의 지령치인 고조파전류성분 i_{Sh} 는 식 (2)에 의해서 구해진다.

$$i_{Sh} = i_S - i_{Sf} \quad (2)$$

식 (3)의 보상전류 i_C 는 능동전력필터와 보상전류지령치 i_{Sh} 에 의해서 구해진다.

$$i_C = -G_{AF}i_{Sh} \quad (3)$$

여기서, G_{AF} 는 능동전력필터의 전달함수를 표현한다.

기본적인 보상전류 i_C 생성식 (4)는 식 (2)를 식 (3)에 대입함으로써 얻을 수 있다.

$$i_C = -G_{AF}(i_S - i_{Sf}) \quad (4)$$

이때, 수동필터와 전원임피던스사이의 공진을 억제하기 위해서는 $G_{AF} \ll Z_S$ 가 되어 전원임피던스에 비해 아주 작은 임피던스 성분을 갖는 능동전력필터로 단락경로를 제공함으로써 고조파 공진전류를 억제한다.

2.2 제안된 외란관측기

병렬형 능동전력필터의 적용으로 수동LC필터와 전원

임피던스간의 공진은 해결하였지만, 수동LC필터와 능동 전력필터 사이에서 공진 문제가 다시 발생한다. 이를 해결하기 위해서 외란공진성분인 i_{AF-LC} 를 추정할 수 있는 외란관측기를 적용하였다. 외란관측기에 의한 외란공진성분을 획득하기 위해서는 그림 2의 회로도를 중첩의 원리를 적용하여 그림 3의 고조파전류원 i_O 흐름과 그림 4의 보상전류 i_C 흐름으로 나누어 생각하여야 한다.

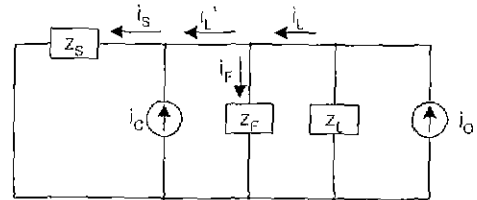


그림 2. 복합형 능동전력필터의 회로도

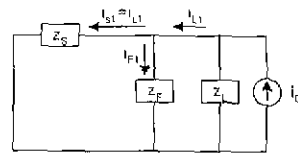


그림 3. i_O 의 고조파전류 흐름도

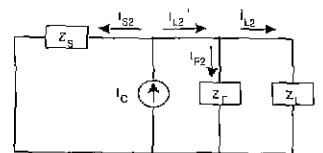


그림 4. i_C 의 보상전류 흐름도

첫번째로 그림 3에서 고조파전류원 i_O 에서 전원측으로 흐르는 전류 i_{S1} 를 구하면

$$i_{S1} = i_{L1}' \quad (5)$$

가 되는데, 고조파전류원 i_O 를 적용하여 i_{S1} 를 구해보면

$$i_{S1} = G_S i_O \quad (6)$$

로 표현된다. 여기서 G_S 는

$$G_S = \frac{z_L z_F}{z_S(z_F + z_L) + z_L z_F} \quad (7)$$

이다.

두번째로 그림 4에서 보상전류 i_C 에서 전원측으로 흐르는 전류 i_{S2} 를 구하여보면

$$i_{S2} = i_C - i_{L2}' \quad (8)$$

로 표현할 수 있다.

외란 공진성분을 구하기 위해서, i_S 를 구하여 보면

$$i_S = i_{S1} + i_{S2} \quad (9)$$

가 되는데, 전원전류의 식 (9)에 고조파전류원에서 전원측으로 흐르는 전류식 (5)와 보상전류에서 전원측으로 흐르는 전류식 (7)을 대입하면

$$i_S = i_{L1}' + i_C - i_{L2}' \quad (10)$$

가 된다. 식 (10)을 i_{L1}' 에 대한 식으로 다시 정리하면

$$\begin{aligned} i_{L1}' &= i_s - i_C + i_{L2}' \\ &= i_{SL} + i_{AF-LC} \end{aligned} \quad (11)$$

가 된다. 그림 3의 고조파전류 i_O 에는 필터간의 공진전류 i_{AF-LC} 가 포함되어 있지만, 그림 4의 보상전류 i_C 는 고조파전류 i_O 의 고조파전류만을 보상하고, 필터간의 공진전류를 보상하지 못하고 있다. 외란관측기는 능동전력 필터에서 보상되지 못하는 필터간의 공진전류를 얻기 위해서 식 (11)에서처럼 i_O 에 포함되어 있는 기본파 전원전류 성분과 필터간의 공진전류 성분을 검출한다. 식 (12)는 추정된 공진전류 \hat{i}_{AF-LC} 은 i_{L1}' 에서 HPF를 이용하여 기본파전원전류를 제거함으로써 획득할 수 있음을 보여준다.

$$\hat{i}_{AF-LC} = i_{L1}' - i_{SL} \quad (12)$$

외란관측기에 의해서 추정된 공진전류 \hat{i}_{AF-LC} 를 전원전류 검출치에 역상으로 피드백시켜줌으로서 외란성분인 공진전류 i_{AF-LC} 도 능동전력필터에서 보상할 수 있게 된다. 그림 5는 제안한 외란관측기가 포함된 전체시스템 블록도를 나타내고 있다.

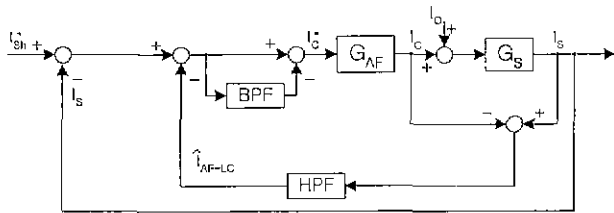


그림 5. 외란관측기를 포함한 블록다이어그램

2.3 Deadbeat 제어기

Deadbeat제어를 위해서는 정확한 시스템의 파라메타가 필요하며 제어입력의 출력에 지연이 없어야 한다는 등의 제약조건이 따르게 된다. 이에 의한 시스템 파라메타의 변동분을 외란관측기를 이용해서 보상하며, 제어입력의 출력지연에 대한 대책으로 관측기를 이용한 예측제어를 적용함으로써 안정된 능동전력필터 특성을 얻도록 한다. 그림 1로부터 3상 변수를 이용한 능동전력필터의 전압방정식은 다음과 같다.

$$L_{AF} \frac{di_C}{dt} = v_C - v_S \quad (12)$$

여기서, L_{AF} , i_C , v_C 는 능동전력필터의 출력 임피던스, 출력전류 및 전압을, 그리고 v_S 는 전원전압을 나타낸다. 샘플링 주기 T_s 가 di_C/dt 보다 작다면 식 (12)은 k 번째 샘플링 시점에서 다음과 같이 근사화된다.

$$i_C(k+1) = i_C(k) + \frac{T_s}{L_{AF}} v_C(k) - \frac{T_s}{L_{AF}} v_S(k) \quad (13)$$

식 (13)은 $k+1$ 번째 샘플링 시점에서의 능동전력필터의 출력전류는 k 번째 샘플링 시점에서의 능동전력필터의 출력전류, 출력전압 및 전원전압에 의해서 구해질 수 있음을 나타낸다. 따라서, $k+1$ 번째 샘플링 시점에서의 능동전력필터의 출력전류가 지령치와 일치한다면 $i_C(k+1)$ 를 $i_C^*(k+1)$ 로 대체하고, $v_C(k)$ 에 대하여 정리하면 Deadbeat 제어법칙은 다음과 같이 된다.

$$v_C(k) = \frac{L_{AF}}{T_s} i_C^*(k+1) - \frac{L_{AF}}{T_s} i_C(k) + v_S(k) \quad (14)$$

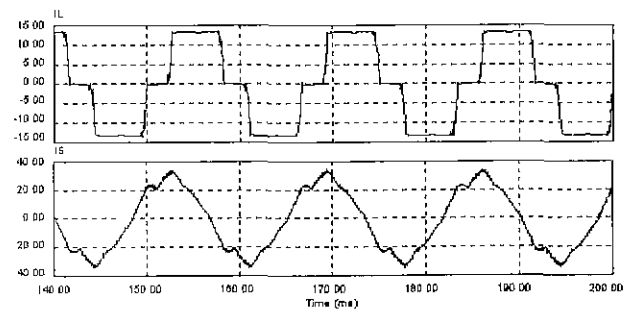
이 제어법칙은 k 번째 샘플링 시점에서의 능동전력필터의 출력전류와 전원전압 정보로부터 능동전력필터의 출력전류를 $k+1$ 번째 샘플링 시점에서 정확히 지령치에 추종하도록 한다.

3. 시뮬레이션 결과

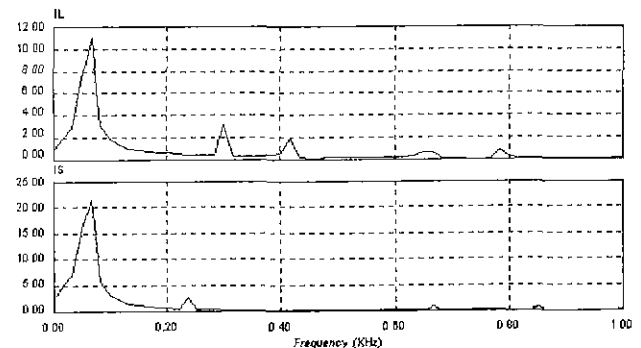
표 1과 표 2는 시뮬레이션에 적용된 시스템의 파라메타 값과 5차·7차 수동필터의 파라메타의 값을 나타내고 있다.

v_S	110V	f_r	60Hz		5차	7차
L_S	3.18 mH	R_S	1.2Ω	L	1.2 mH	1.2 mH
L_L	38.2 mH	R_L	16Ω	C	340 μF	170 μF
L_{AF}	2 mH			R	0.16Ω	0.23Ω

표 1. 본 시스템 파라메타 표 2. 수동필터 파라메타

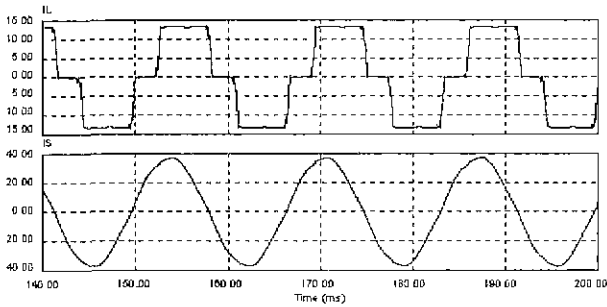


(a) 부하전류와 전원전류의 파형

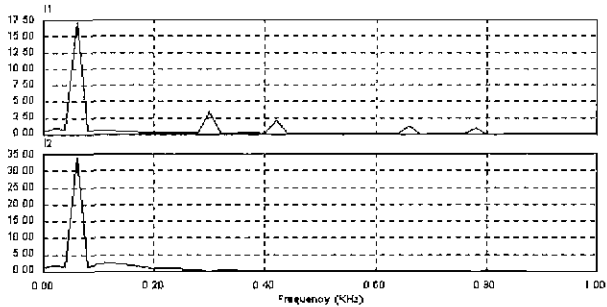


(b) 부하전류와 전원전류의 주파수분석파형

그림 6. 수동LC필터

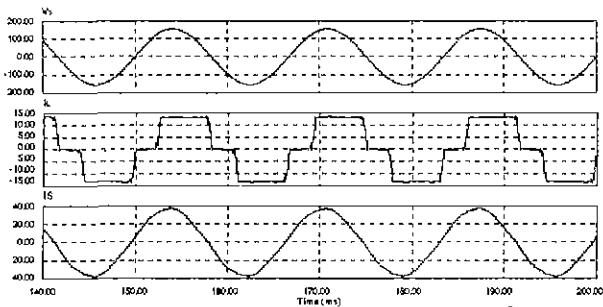


(a) 부하전류와 전원전류의 파형

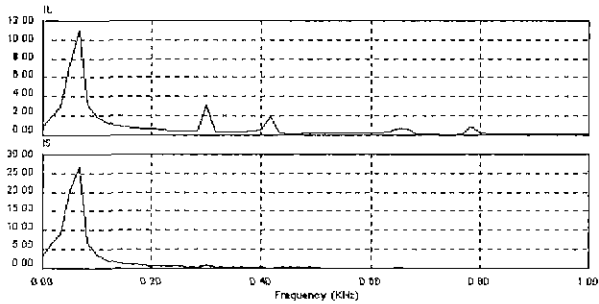


(b) 부하전류와 전원전류의 주파수분석파형

그림7. 복합형 능동전력필터



(a) 전원전압과 부하전류 및 전원전류의 파형



(b) 부하전류와 전원전류의 주파수분석파형

그림8. 외란관측기가 적용된 복합형 능동전력필터

그림 6(a)는 전원계통의 고조파전류 제거를 위해서 5차·7차 수동LC필터만 사용하였을 경우에 대한 부하전류 및 전원전류의 파형을 나타내고 있다. 그리고, 그림 6(b)는 각 파형에 대한 주파수분석 스펙트럼을 나타낸다. 여기서, 전원전류의 주파수분석파형은 전원 임피던스와 수동LC필터가 병렬공진을 일으킴으로서 발생하는 3.8차

(230Hz)의 공진전류를 확인할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 전원임피던스와 수동LC필터 사이에 능동전력필터를 병렬로 연결하였을 때의 부하전류와 전원전류의 파형을 그림 7(a)에서 보여주고 있다. 그림 7(b)의 전원전류 주파수분석파형은 그림 6(b)에서 나타나는 공진주파수와 고차고조파가 제거되었지만, 1.8차(108Hz)에서 능동전력필터와 수동LC필터사이의 병렬공진이 나타난다. 따라서, 수동필터와 능동전력필터사이의 공진 문제를 해결하기 위하여 외란관측기가 적용된 경우의 파형을 그림 8에서 보여준다. 그리고, 그림 8(b)에서는 3.8차와 1.8차의 공진전류가 모두 제거됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전원전류검출형 능동전력필터를 수동LC필터와 전원 계통사이에 병렬로 연결함으로써 발생하는 병렬공진 전류를 억제하여 능동전력필터의 성능향상을 목적으로 하였다. 외란 관측기를 이용하여 필터간의 공진전류를 추정하였으며, 추정된 값을 능동전력필터의 전원전류검출치에 역상으로 인가하여 공진전류를 보상하였다. 또한, 보상전류지령치에 대한 실시간 제어를 위해서 Deadbeat 전류제어기를 사용하였다.

PSIM을 이용한 시뮬레이션의 결과를 통하여 제안된 외란관측기의 사용이 필터간의 공진전류를 억제함을 확인할 수 있었으며, 능동전력필터의 고조파전류 보상 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] FANG ZHENG PENG, HIROFUMI AKAGI, AKIRA NABAE "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters" IEEE Trans. Ind. Appl, pp 983-990, Vol. 26, NOVEMBER/DECEMBER, 1990
- [2] Shin-ichi Hamasaku, Atsuo Kawamura, Hirokazu Tokuda, Isao Amano, "Compensation Characteristic of the Source Current Detection Type Active Filter using the Disturbance-observer for Resonance Suppression", IPEC-Tokyo 2000, pp.1495-1500, Vol.3, April 3-7, 2000
- [3] J.H.Park, D.R.Shin, T.K.Roh, I.M.Ahn, H.W.Lee, J.I.Woo, " DEADBEAT CONTROL OF THREE PHASE VOLTAGE SOURCE ACTIVE POWER FILTER USING SINUSOIDAL TRACKING MODEL", IEEE TENCON 1999, pp. 1442-1445, Vol.2, september, 1999