

단상 멀티레벨 능동전력필터를 위한 고조파 검지 기법 비교

김운호, 김수홍, 김성민, 서강문
 중앙대학교 전력전자 연구실

Comparison of Harmonic Detecting Methods For Sing-Phase Multi Level Active Power Filters

Yoon-Ho Kim, Soo-Hong Kim, Sung-Min Kim, Kang-Moon Seo
 Chung-Ang University Electrical & Electronics Eng.

ABSTRACT

In this paper, harmonic detecting methods for the active power application are investigated. They are RDFT, Kalman Filter, Adaptive predictive filter, Instantaneous reactive power detecting method, Improved adaptive filter detecting method. The 5 harmonic detecting methods are simulated and their characteristics for the active filter application are compared using simulation results.

1. 서론

고조파의 발생은 전기의 품질을 저하시키는 중요한 문제들 중의 하나로 간주되고 있다. 능동필터 시스템은 정확한 고조파 성분을 검지하지 못하면 올바른 고조파를 보상할 수 없기 때문에 정확하고 보다 빠른 고조파를 검지하기 위한 기법들이 연구되었고 다양한 제어회로들이 나오게 되었다^[1]. 이러한 방식들은 기존의 오프라인 고조파 검지 방식을 극복하여 온라인으로 순간순간 변하는 부하에 대응하여 고조파를 빠르고 정확하게 검지하는 방식들이다. 본 논문에서는 RDFT(Recursive Discrete Fourier Transform), 순시 무효 전력 고조파 검지 기법(instantaneous reactive power harmonic detecting method), 개선된 적응 필터(improved adaptive filter) 그리고 칼만 필터(Kalman Filter)에 대해 비교 분석을 하였다.

2. 고조파 검지 기법

2.1. RDFT (Recursive Discrete Fourier Transform)

RDFT는 DFT의 알고리즘에 기반을 둔다. RDFT의 원리는 다음과 같다. 먼저 N개의 data

point를 가진 신호 data의 집합 $\{x_n\}$ 가 있다고 할 때, k번째 단계에서의 DFT 분석은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X_m(k) = \exp\{j\beta_m\} \exp\{-j\varphi_m(k)\} [\exp\{j\varphi_m(k-1)\}(X_m(k-1) + x(k) - x(k-N))] \quad (1)$$

이 식의 역변환은 DFT로 필터된 신호를 제공하여 다음과 같은 식이 산출된다.

$$x_m(n) = \Gamma(m) \text{Re}\{X_m(k) \exp\{j\beta_m(n-1)\}\} \quad (2)$$

여기서 $x_m(n)$ 은 $m=0,1,2,\dots, N/2$ and $n=1,2,\dots,N$ 에 대한 $x(k)$ 의 m번째 고조파 요소를 표현한다. 또한 이 식의 역변환은 DFT로 필터된 신호를 제공하여 다음과 같은 식이 산출된다.

$$\Gamma(m) = \begin{cases} N^{-1} & m = 0 \text{ and } m = \frac{N}{2} \\ 2N^{-1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

RDFT의 원리는 그림 1과 같다.

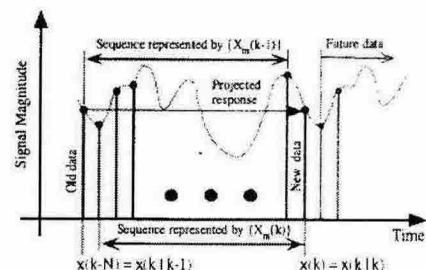


그림 1 RDFT의 원리

2.2 순시 무효 전력

순시무효 전력을 이용한 고조파 검지 방식은 3상 시스템에서 $\alpha-\beta$ 변환을 이용한 식을 기반으로 하며 특정 고조파를 검지하는 것은 용이하지 않으나

전체 고조파를 검지할 수 있으며 정확성과 응답 특성이 좋다는 장점을 가지고 있다. 각 α, β 는 α 축과 β 축을 나타낸다. 이와 같이 $\alpha-\beta$ 변환의 전압과 전류를 이용하여 유효전력 p 와 무효전력 q 는 다음과 표현된다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, p 와 q 성분은 각각 직류 성분과 교류 성분으로 나눌 수 있는데, 이를 수식으로 표현하면 $p = \bar{p} + \tilde{p}, q = \bar{q} + \tilde{q}$ 와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

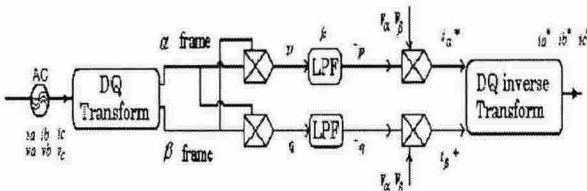


그림 2 순시 무효전력 방법의 block diagram

2.3 적응필터

적응필터는 연속적인 자기학습(self-studying)과 자기조정(self-adjusting)을 이용하여 시스템을 최상의 조건으로 유지시킨다. 그림 3에서 보는 바와 같이 출력을 궤환시켜 일련의 과정을 거친 후 원신호에서 빼 주게 되면 고조파에 해당하는 신호가 출력되어 나온다.

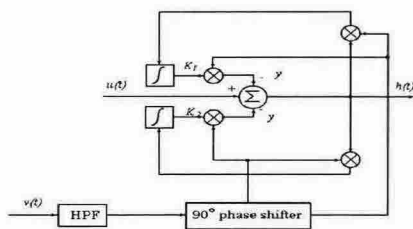


그림 3 Adaptive filter의 block diagram

이 구조는 전압이 변동하게 되면 정확한 고조파를 추출하기 힘들다는 단점을 가지고 있고, 교대로 전압 신호에서의 지연이나 위상차이등과 같은 다른 요인이 발생하게 되면 이를 쉽사리 보상할 수 없고 성능을 저하시키는 단점이 있다. 따라서 개선된 적응 필터의 구조가 그림 4와 같이 제안되었다. 개선된 적응 필터의 안정성 분석은 $\mu_1 = \mu_2$ 가 같은 주파수 대역을 가진 특별한 경우에 수행되는데 이 주

파수 대역에서 필터는 2차 적응 notch 필터와 같은 역할을 하고 전체적으로 매우 안정적이다.

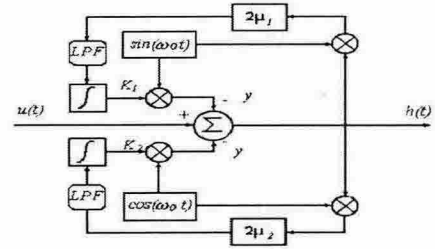


그림 4 개선된 adaptive filter의 block diagram

2.4. Kalman Filter

Kalman filter는 최소 자승법을 사용하여 효과적으로 계산하여 재귀적인 솔루션을 제공하는 수학적 방법이다. Kalman filter는 $x_{k+1} = A_k x_k + B u_k + w_k$

로 추정된 상태와 측정 방정식 $z_k = H_k x_k + v_k$ 의 수학적인 방식으로 사용한다. 필터의 재귀적인 예측을 시작하기 위하여 추정값인 \hat{x} 과 P 를 설정해 줄 필요가 있다. 또한 임의로 설정된 이 값들과 실제 추정치와의 에러를 보정하기 위하여 전추정값과 후추정값이 적용되는데 이는 다음과 같다.

$$\hat{x}^-_k \in \mathcal{R}^n \text{ (a priori state estimate)}$$

$$\hat{x}_k \in \mathcal{R}^n \text{ (a posteriori state estimate)}$$

$$e^-_k \equiv x_k - \hat{x}^-_k$$

$$e_k \equiv x_k - \hat{x}_k$$

e_k means a error

각 오차 성분의 기대치를 곱하면 다음과 같이 오차 공분산을 구할 수 있다.

$$P^-_k = E[e^-_k e^-_k{}^T] = E[(x_k - \hat{x}^-_k)(x_k - \hat{x}^-_k)^T]$$

$$P_k = E[e_k e_k{}^T] = E[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T]$$

$$P_k \text{ means a estimate error covariance} \quad (6)$$

이렇게 설정된 초기 추정값 \hat{x} 과 초기 공분산 P 와 함께 예측을 하게 되는데 다음의 공식을 이용하여 예측을 실시한다. 상태 추정 벡터 \hat{x} 는 고조파 성분의 파형을 빠르게 제공한다.

2.5. Adaptive predictive filter

능동 전력 필터에서 고조파 기준 신호를 발생하는데 적응 예상 필터를 적용하는 방법도 있다. 적응 예상 필터의 원리는 그림 5에 보인 것처럼 고조파 기준 전류 발생기는 최고치 검지자, prefilter, adaptive predictive filter 그리고 Lagrange 보간기로 구성이 되어 있다.

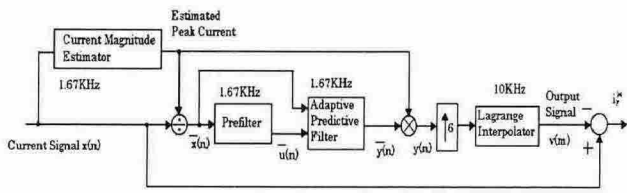


그림 5 기준신호 발생기

입력 신호는 적응 알고리즘을 처리하는데 어려움을 최소화하기 위하여 정규화 된다. 정규화는 입력 신호를 예측 최대값으로 나눠줌으로써 구현된다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 RDFT

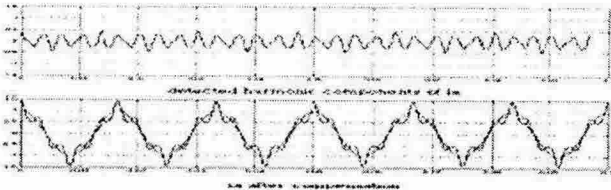


그림 6 RDFT를 이용한 주파수 분석

그림6은 입력전류 파형을 RDFT한 결과이다. 상단의 그림은 RDFT의 역변환을 취해줌으로써 고조파 성분을 추출한 것이고 아래 그림은 보상된 파형이다.

5.2 Kalman filter

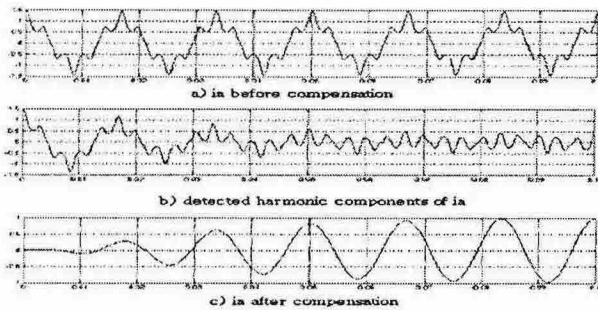


그림 7 Kalman filter에 의한 고조파 검출 및 보상

그림7은 칼만 필터를 적용한 결과이다. b)는 추출된 고조파를 나타내는 상태 변수 즉 추정치이다. 약 5주기가 지난 후에 보상이 이루어지는 것을 볼 수 있다.

5.3 Instantaneous reactive power

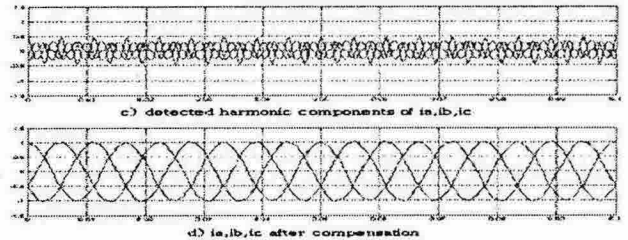
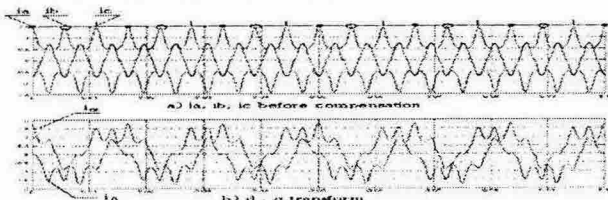


그림 8 순시 무효 전력에 의한 고조파 검출 및 보상

그림 8은 순시 무효 전력을 이용한 결과이다. (c)성분을 원 신호에 보상시키면 d)와 같이 3개의 정현파가 산출된다.

5.4 Adaptive filter

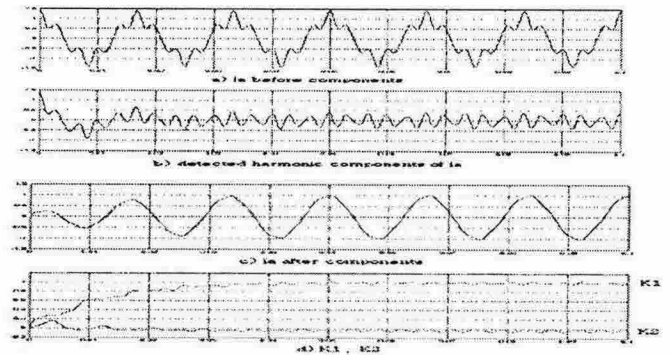


그림 9 Adaptive filter를 이용한 고조파 검출 및 보상

그림 9는 adaptive filter에 의한 고조파 추출을 나타낸다. b)를 살펴보면 검출된 고조파는 처음에 전체 신호와 같은 파형을 나타내다가 약 1.5주기가 지난 후 고조파의 형태를 띠게 된다. 이를 원신호에 보상시키게 되면 c)와 같게 된다. 이 때 적분 후 K1과 K2를 살펴보면 d)와 같은 파형이 산출된다.

5.5 Adaptive predictive filter

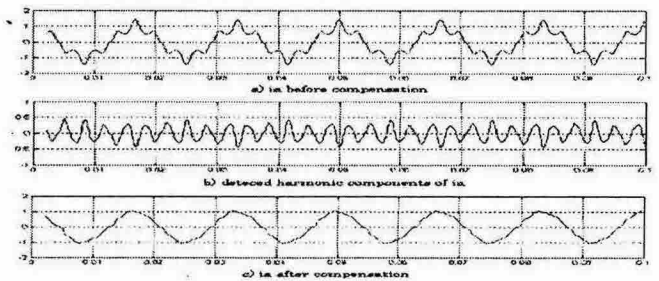


그림 10 Adaptive predictive filter를 이용한 고조파 검출 및 보상

그림10은 Adaptive predictive filter에 의한 고조파 추출을 보여준다. 먼저 한 단계 앞서 보상하는 이 filter는 처음부터 정현파에 가까운 파형을 보여주지만 완벽한 정현파를 보여주지 않는다. 고조파 성분이 조금 남아있음을 보여주고 있다.

5.6 시뮬레이션 결과 주파수 분석

각 방법에 따른 시뮬레이션 결과 고조파 보상 후 입력 전류 ia의 FFT 분석을 해보았다. 먼저 원 신호 ia를 FFT 분석하면 그림 11-(a)와 같다. 60Hz에서 1, 300Hz에서 0.3, 420Hz에서 0.1, 660Hz에서 0.05의 값을 가진다.

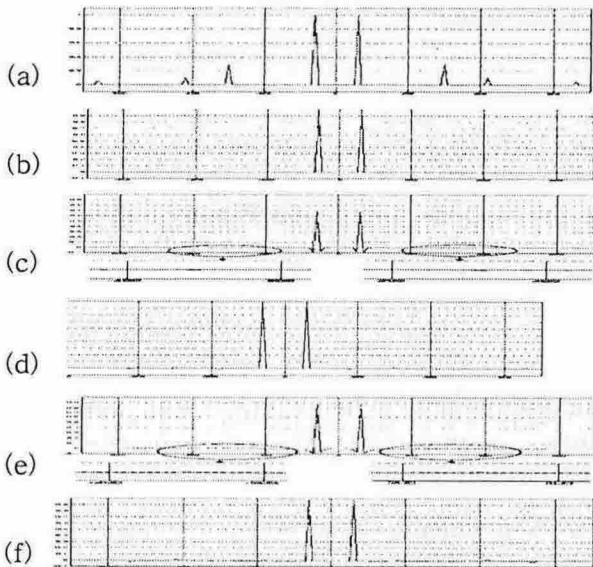


그림 11 주파수 분석 결과

(a) ia의 주파수 분석 (b) RDFT 주파수 분석 (c) Kalman filter 주파수 분석 (d) Instantaneous reactive power 주파수 분석 (e) Adaptive filter 주파수 분석 (f) Adaptive predictive filter 주파수 분석

RDFT의 경우(b) 주파수 분석시 기본파의 크기가 1로 완벽하게 보상됨을 볼 수 있다. 하지만 연산시 원신호의 주파수 성분만을 검출하고 고조파를 성분에 해당하는 주파수를 검출하는데 시간이 걸리지 않았지만 역변환을 하여 보상할 때 시간이 지연되는 것을 보였다. Kalman filter의 경우(c) 알고리즘이 복잡하여 연산시 걸리는 시간에 의해 정상상태 응답 속도가 다소 늦다는 것을 볼 수 있다. 하지만 FFT 분석 결과 60Hz에 해당하는 성분에서 주파수 응답을 보이고 300Hz, 420Hz에서 아주 미세하게 나타나지만 거의 무시할 만한 수준이고 660Hz에서는 발생하지 않는다. 따라서 정확한 주파수 성분을 추출했다고 볼 수 있다.

순시 무효 전력 방법(d)에 의한 보상 후 ia 성분은 처음부터 고조파가 보상되어 정현파 성분이 나타나지만 180Hz에서 예상되지 않는 고조파 성분이 발생하였다. 그리고 기존의 고조파 성분인 300Hz, 420Hz, 660Hz이 완전히 제거되지 않은 것을 볼 수 있다. 즉 빠르게 보상은 하였지만 정확하게 보상은 못하였다. Adaptive filter(e)는 정상상태 응답까지 약간의 시간이 걸린다. 그리고 300Hz에서 고조파가 완벽하게 제거되지 않음을 볼 수 있다. 그림 11-(f)는 Adaptive predictive filter의 주파수 분석을 보여준다. 고조파는 상쇄되었지만 시간 영역

에서 보듯이 완전한 정현파는 나오지 않았고 주파수 분석 시 180Hz와 540Hz에서 예상하지 못한 고조파 성분이 발생하게 되었다.

5.7 시뮬레이션 결과 비교

	RDFT	칼만필터	순시 무효전력	적응필터	적응 예측필터
정상상태 응답시간	0 sec	0.05sec	0sec	0.05sec	0.002sec
계산의 복잡성	Complex	Complex	Simple	Simple	Simple
정확성	Correct	good	Not correct	Not correct	Bad
안정성	Good	Good	Bad	Good	Good
필요조건	Sampling frequency of an integer power of 2	Initial condition	Cut-off frequency	Bandwidth $\mu 1, \mu 2$	Initial condition

6. 결론

본 논문은 능동필터를 위한 5가지의 고조파 검지 기법들을 분석하고 시뮬레이션을 통해 각 기법들을 비교하였다. 모의실험 결과에서 보듯이 각각의 방식은 장, 단점을 가지고 있다. 정확도의 측면에서와 시간 응답적인 측면으로 나뉠 수 있는데 정상상태 응답 시간이 가장 빠르고 정확도가 높은 것은 Instantaneous reactive power method이지만 전압의 변동에 매우 민감하다. 가장 안정적이지만 시간이 걸리는 것은 RDFT 방식이며 이는 주파수 분석을 통한 방식이기 때문이다. 민감성에 대한 대책을 보완한다면 Instantaneous reactive power가 고조파를 제거하는데 매우 효과적인 것으로 판단된다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2002-000-00497-0) 지원으로 수행되었음

참고 문헌

- [1] Rechka, S.; Ngandui, T.; Jianhong Xu; Sicard, P.; "A comparative study of harmonic detection algorithms for active filters and hybrid active filters" Power Electronics Specialists Conference, 2002. pESC 02. 2002 IEEE 33rd Annual ,1 ,23-27 June 2002 Pages:357 - 363 vol.1
- [2] Fang-Zhang Peng, Hirofumi Akagi, Nabae, "A study of active power filters using quad-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation," IEEE Transactions on Power Electronics, vol.5, no1, January. 1990. pp. 9-15
- [3] Karimi, H.; Karimi-Ghartemani, M.; Reza Iravani, M.; Bakhshai, A.R.; "An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions" Power Delivery, IEEE Transactions on ,18 ,Issue: 4 ,2003 Pages:1350 - 1356