

DC 급전 전철시스템에서의 능동전력필터 기준보상전류 추정

배 창 한
한국철도기술연구원

Reference compensating current estimation for active power filters in DC traction system

Bae, Chang-han
Korea Railroad Research Institute

Abstract - Digital Kalman filter is presented as a powerful approach to obtain the reference estimation of the control current for shunt active power filter. This algorithm provides the best estimate of the fundamental and harmonic frequency components from the sampled values of the line current or voltage. By adopting of the digital Kalman filtering algorithm, the structure of the control algorithm eliminates the need of a Phase locked loop(PLL) for the synchronization of the reference signal used in the compensation and it not sensitive to the distortion of the line voltage. The effectiveness of the algorithm is confirmed by the computer simulations.

칼만필터를 사용한 경우, 비선형 부하로 인해 발생된 고조파 전류로부터 기본과성분을 추정할 수 있을 뿐만 아니라, 상태변수를 늘려가며 고조파 성분들의 순치까지도 추정할 수 있다. 따라서 능동전력필터의 제어기 구성을 위한 기준보상 전류값을 실시간으로 추정할 수 있으며 DSP상에서 간단히 구현할 수 있다. 또한 능동전력필터의 전류보상 시에 기준 신호의 동기화를 위한 위상동기루프가 필요 없으며, 전압의 왜곡에도 민감하지 않게 동작할 수 있다. 실제 운영 중인 변전소의 계통 측 전류파형을 사용해 기준전류파형을 추정함으로써 이산형 칼만필터를 사용한 기준보상전류추정 알고리즘의 성능을 확인하였다.

1. 서 론

DC 급전 전철시스템에 회생차량이 보급되면서 회생차량의 에너지 회생능력을 활용하기 위한 회생용인버터들이 개발되고 있으며 일본의 전철시스템에서는 운용되고 있다. 회생용인버터는 전동차가 전기제동이나 하구배 구간을 운행할 때 발생하는 회생전력을 급전계통이나 변전소의 고압배전계통으로 회수시키는 동작을 수행한다. 전동차가 역행동작을 하는 동안에는 회생전력이 발생되지 않기 때문에 기존의 회생용인버터들은 대기모드로 동작한다. 따라서 회생용 인버터를 전류형 능동전력필터로 동작시켜 계통상의 전류고조파를 저감시키는 연구가 진행 중이다[1,2]. 전철 시스템에서 능동전력필터는 전철변전소 및 추진장치에서 수동필터를 대신해 전류고조파를 제거하기 위한 매우 유용하며 효과적인 방법으로 사용되고 있다. 그림 1은 DC 급전 전철시스템에 적용되는 전류형 능동필터 기능을 갖는 회생용인버터의 시스템 블록도를 나타낸다. 회생용 인버터가 능동전력필터 모드로 동작할 경우에는 부하 전류 i_L 에 포함된 고조파 성분들을 상쇄시키기 위해서 보상전류 i_C 를 주입하고 전원측에 흐르는 전류 i_S 를 정현파 형태로 만든다. 이러한 고조파 전류, 역률저하, 및 전압왜곡을 줄이기 위한 능동전력필터의 제어기법과 기준보상전류를 얻기 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다[3,4]. 대표적인 방법으로 이산푸리에 변환(Discrete Fourier Transform)을 사용해 부하 전류로부터 직접 고조파 성분을 얻고 제거하는 방법이 있는데, 이것은 전류신호의 동기화를 위한 위상동기루프(Phase Locked Loop)가 반드시 필요하며, 부하전류의 급변 시에 응답특성이 좋지 않다[5]. pq 이론에 의한 순시부하전력제어는 능동전력필터의 응답특성은 개선시킬 수 있으나 전압의 왜곡발생에 민감한 성능을 갖는 단점이 있어 이에 대한 연구가 이루어지고 있다[6].

본 논문에서는 전류제어형 능동전력필터에 필요한 기준보상전류를 얻기위해 이산형 칼만필터 알고리즘을 사용하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션으로 검증하였다. 이산형

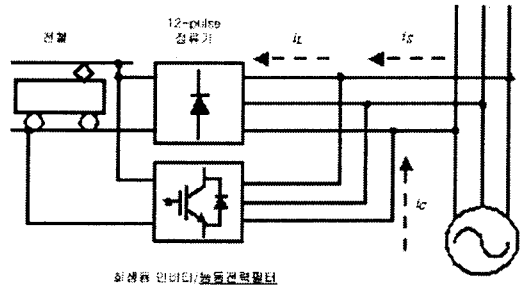


그림 1. DC급전 전철시스템의 회생용인버터/능동전력필터 블록도

2. 기준 전류 추정알고리즘

2.1 기준 전류추정 상태방정식

기준전류를 추정을 위한 상태방정식을 위해 잡음이 없는 기준신호를 식(1)과 같이 나타내고 식(2)와 같이 상태변수들을 정의한다.

$$I(t_k) = A(t_k) \cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x1_k &= A(t_k) \cos(\omega t_k + \theta) \\ x2_k &= A(t_k) \sin(\omega t_k + \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

$t_{k+1} = t_k + \Delta T$ 시점에서 상태변수 방정식은 식(3)와 (4)로 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \cos(\omega\Delta T) & -\sin(\omega\Delta T) \\ \sin(\omega\Delta T) & \cos(\omega\Delta T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix}_k \quad (3)$$

$$z_k = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix}_k + v_k \quad (4)$$

만약 신호에 n 번째 주파수 성분까지 계산하기 위해서 다음과 같은 상태변수방정식을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ \vdots \\ x2n \\ x2n+1 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} M1 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & Mn \\ \vdots & \dots & \vdots \\ Q2 \\ \vdots \\ x2n-1 \\ x2n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ \vdots \\ x1 \\ x2 \\ \vdots \\ x1 \\ x2 \end{bmatrix}_k + v_k \quad (5)$$

여기서 $M_i = \begin{bmatrix} \cos(i\omega\Delta T) & -\sin(i\omega\Delta T) \\ \sin(i\omega\Delta T) & \cos(i\omega\Delta T) \end{bmatrix}$ 이다.

2.2 이산형 칼만필터 알고리즘

플랜트가 외란에 의한 영향을 많이 받고, 잡음이 있는 신호를 측정할 때 칼만필터를 사용하며, 이 때 잡음은 가우시안 백색 잡음(gaussian white noises)으로 가정한다. 이산형 동적 방정식을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X(k+1) &= FX(k) + W(k) \\ Z(k) &= HX(k) + V(k) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $W(k)$ 는 시스템잡음이고, $V(k)$ 는 측정잡음이며 서로 상관관계가 없다. 이산형 칼만필터는 아래 수식과 같다.

$$\widehat{X}(k+1, k) = F\widehat{X}(k, k) \quad (8)$$

$$P(k+1, k) = FP(k, k)F^T + Q(k) \quad (9)$$

$$\widehat{X}(k+1, k+1) = \widehat{X}(k+1, k) + K(k+1)[Z(k+1) - H\widehat{X}(k+1, k)] \quad (10)$$

$$K(k+1) = P(k+1, k)H^T[HP(k+1, k)H^T + R(k+1)]^{-1} \quad (11)$$

$$P(k+1, k+1) = P(k+1, k) - K(k+1)HP(k+1, k) \quad (12)$$

여기서 \widehat{X} 는 최적 상태 추정치, P 는 상태추정오차의 공분산, K 는 칼만게인, $Q(k)$ 는 $W(k)$ 의 공분산행렬, $R(k)$ 은 $V(k)$ 의 공분산행렬이다.

능동전력필터의 기준보상전류 추정을 위해서는 k시점에서 k+1시점 시의 기준전류 값을 알아야 하므로 위의 알고리즘을 아래와 같은 수식으로 수정하여 기준전류를 시간 지연 없이 추정하게 된다.

$$\begin{aligned} \widehat{X}(k+1, k) &= F\widehat{X}(k, k-1) + G(k)[Z(k) - H\widehat{X}(k, k-1)] \\ G(k) &= FK(k) = FP(k, k-1)H^T[HP(k, k-1)H^T + R(k)]^{-1} \end{aligned}$$

$$P(k+1, k) = [F - FK(k)H]P(k, k-1)F^T + Q(k) \quad (13)$$

위의 수식과 식(7)의 상태방정식을 이용하여 계통상에 포함된 고조파 성분을 제거한 능동전력필터의 기준보상전류신호를 얻을 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

운영 중인 DC 급전시스템의 변전소 계통단에서 측정된 전류로부터 능동전력필터의 기준보상전류를 이산형 칼만필터 알고리즘으로 추정하였다. 이산형 칼만필터의 샘플링 주파수는 10kHz 하였으며 측정잡음의 공분산 R은 100으로 하였다. 계통상에서 검출된 전류파형으로부터 기본파와 3, 5, 7, 9, 11조파의 12개 상태변수를 갖는 이산형 칼만필터 알고리즘을 구현하였다. 그림2는 고조파 전류가 포함된 계통측 전류파형과 이산형 칼만필터에서 추정한 기준보상전류 파형을 보여주는 것으로 전류파형이 정현파에 가까우며 시간 지연이 없음을 확인할 수 있다.

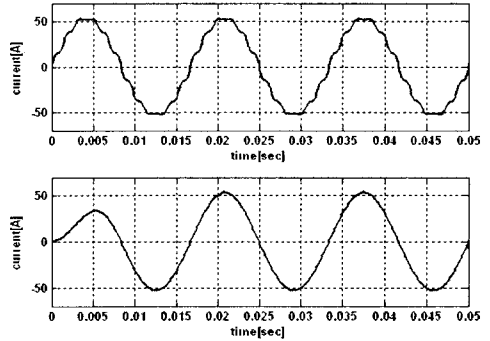


그림 2. 계통상의 전류파형과 추정된 기준전류파형

그림3은 이산형 칼만 필터의 칼만게인값 변화를 그린 것으로 시간이 진행됨에 따라 고정된 계인 값으로 수렴됨을 확인할 수 있다.

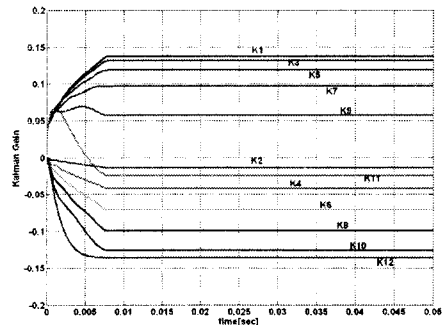


그림 3. 칼만게인 변화곡선

실제 운영되는 DC 급전시스템의 변전소에서 측정된 계통 측 전류파형은 부하에 해당하는 전동차들의 운행상태에 따라 크게 변화한다. 전류파형의 크기가 변화한 경우를 그림4에 나타낸다. 여기서 0.12초에 계통전류파형의 크기가 급변하였음에도 짧은 시간 내에 이산시간 칼만 필터가 기본과 전류성분을 추정함을 확인할 수 있다. 이때 각 3, 5, 7, 9조파 전류성분들은 그림 5와 같이 변화한다.

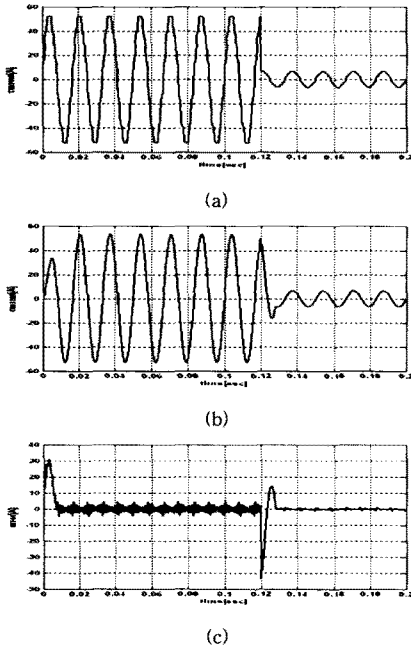


그림 4. (a) 계통상 고조파가 포함된 전류파형, (b) 추정된 기준전류파형, (c) 오차

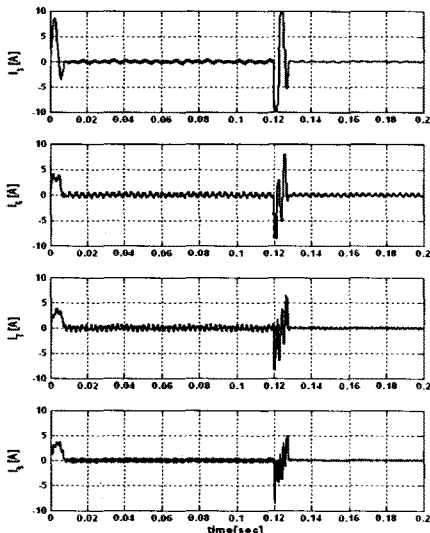


그림 5. 이산형 칼만필터 상태변수 중 3, 5, 7, 9조파 전류파형들

4. 결 론

본 논문에서는 능동전력필터의 기준보상전류 추정을 위한 상태방정식을 유도하고 이산형 칼만필터를 설계하였다. 이러한 기준전류추정 기법의 성능을 실제 DC 급전 전철시스템의 변전소에서 측정된 전류파형에 적용하여 시뮬레이션 하였으며 우수성을 검증하였다. 고조파전류가 포함된 계통 전류로부터 기본과성분과 3, 5, 7, 9, 11조파 성분을 추정하였으며 부하의 급변으로 인한 계통 측 전류의 변화 시에도 기준전류파형을 빠른 시간내에 추정함을 확인하였다. 앞으로 실제 실험을 통해 성능을 검증할 필요가 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김용기 외 11, "차세대 전철시스템 에너지 회생장치 개발", 한국철도기술연구원, 2003.
- [2] P.J. Randewijk, and T.H.R. Enslin, "Evaluation of converter topologies for improving power quality in DC traction substations," ISIE, vol. 2, pp.802-807, 1996.
- [3] J. Barros, E. Perez, "An adaptive method for determining the reference compensating current in single-phase shunt active power filters," IEEE Trans. Power Delivery, vol.18, no.4, pp.1578-1580, 2003.
- [4] V.M. Moreano, A.P. Lopez, and R.I.D. Garcias, "Reference current estimation under distorted line voltage for control of shunt active power filters," IEEE Trans. Power Electron., vol.19, no.4, pp.988-994, 2004.
- [5] S. Marethoz and A.C. Rufer, "Open loop and closed loop spectral frequency active filtering," IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, pp.564-573, 2002.
- [6] S.J. Huang, J.C. Wu, and D.D. Divan, "A control algorithm for three-phase three-wired active power filters under nonideal mains voltages," IEEE Trans. on Power Electron., vol.14, pp.753-760, 1999.