

중성선 영상 고조파 전류 저감을 위한 하이브리드 전력 필터

지용혁*, 박상훈*, 김재형*, 원충연*, 송상훈**
 *성균관대학교, **한국산업기술시험원

Hybrid Power Filter for the Zero Sequence Harmonics Reduction in Neutral Line

Young-Hyok Ji*, Sang-Hoon Park*, Jae-Hyung Kim*, Chung-Yuen Won*, Sang-Hoon Song**
 *Sungkyunkwan University, *Korea Testing Laboratory

ABSTRACT

According to the development of power switching device technology, the power conversion system is used from the small electric power units to the large industrial instruments. These instruments are operated as harmonic sources in the grid and the harmonics cause zero sequence harmonics in the neutral line. To reduce zero sequence harmonics, the zigzag transformer is used conventionally. But the zigzag transformer can reduce only 60~70% of harmonics. In this paper, hybrid power filter for zero sequence harmonics reduction and the harmonic detection method are proposed.

1. 서 론

최근 Power MOSFET, IGBT등 전력용 스위칭 소자 기술의 발달로 다양한 형태의 전력변환 시스템이 일반 가정용 소형기기에서부터 산업용 대형기기까지 광범위한 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 이와함께 인텔리전트 빌딩등에 확산 적용되고 있는 홈네트워크, 전자식 형광등, OA기기, FA기기 등의 비선형 부하 사용량이 많아지면서 3상 4선의 저압 배전계통에서는 중성선 전류 유입으로 인해 변압기, 케이블 및 전기기기 수명의 단축 및 소손으로 인해 상당한 양의 에너지가 손실되고 있다.

현재 국내의 3상 4선식 저압 배전 계통(220V/380V)에서 중성선 전류는 각 상전류의 벡터합으로 나타나며 각 상에 흐르는 기본파 전류는 120°의 위상차를 가지고 있어 3상이 평형이고 선형인 부하에 대하여 중성선 전류는 이상적으로 0이다. 선형 부하일 경우, 3상 불평형의 조건에서도 일반적으로 상전류의 20%를 초과하지 않으나 비선형 부하일 경우에는 3상 평형의 조건에서도 중성선에는 영상분 전류가 현저히 증가하게 된다^[1]

기존의 영상분 중성선 전류 저감 장치로 사용되고 있는 zigzag transformer는 이론적으로 영상분에 대한 임피던스가 0이다. 그러나 전원 임피던스나 도선의 기생 임피던스 등의 계통소자의 값에 의해 필터로 유입되는 전류와 중성선 전류의 비율이 결정되기 때문에 영상분에 대한 임피던스는 0이 아니다. 실제 중성선 전류 제거 성능이 60~70% 정도이다.

본 논문에서는 중성선에 흐르는 영상분 전류의 효율적인 저감을 위해 Zigzag transformer를 사용한 기존의 수동필터와 능동전력필터를 결합하여 보다 높은 저감율을 가지는 하이브리드형 고조파 필터와 그 제어 알고리즘을 제안하였다.^[1]

2. 시스템 구성 및 동작원리

2.1 시스템 구성

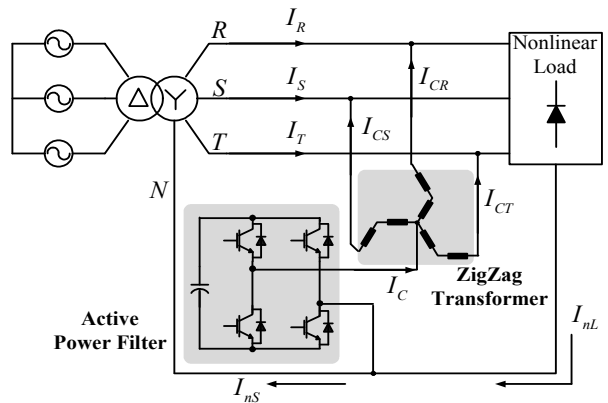


그림 1. 시스템 구성도
 Fig. 1. System block diagram

그림 1은 본 논문에서 제안하는 중성선의 영상분 전류 저감을 위한 하이브리드형 전력필터의 블록도를 나타낸다. 제안된 시스템은 기존에 영상분 전류 저감 장치로 사용되고 있는 zigzag transformer와 단상 능동전력필터를 결합한 형태로 구성되어 있다.

Zigzag transformer는 기본적으로 철심에 2개의 권선을 반대방향으로 감은 형태이다. 이러한 권선법은 영상분 전류는 위상을 같게 하여 상쇄되게 하고 정상, 역상분 전류는 벡터합성이 크게 되도록 하여 영상분에 대한 임피던스는 작게 한다. 반면에 정상분과 역상분에 대한 임피던스를 크게하여 영상분 전류가 전원측으로 유입되지 않도록 하는 원리이다. 그림 2에 그 구성도 및 원리를 나타내었다.^{[1][2]}

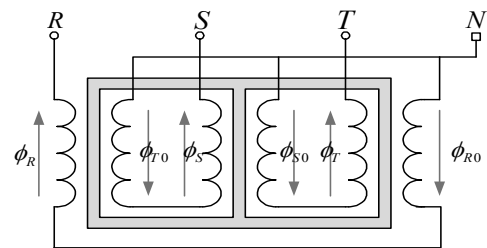


그림 2. 지그재그 권선형 변압기 구성도 및 원리
 Fig. 2. Configuration and principle of zigzag transformer

2.2 시스템 동작 원리

제안된 하이브리드형 전력필터에서 단상 인버터로 구성된 능동전력필터부는 중성선에 흐르는 영상분 전류를 검출하여 이를 zigzag transformer로 주입 하는 역할을 한다. 즉, 능동전력 필터부는 그림 3과 같이 등가적으로 영상분 전류원과 같이 표현될 수 있다. 따라서 본 시스템은 서론에서 언급하였던 전원 임피던스나 도선의 기생 임피던스의 영향을 줄이고 보다 안정적이고 높은 영상분 전류 저감율을 보일 수 있다.

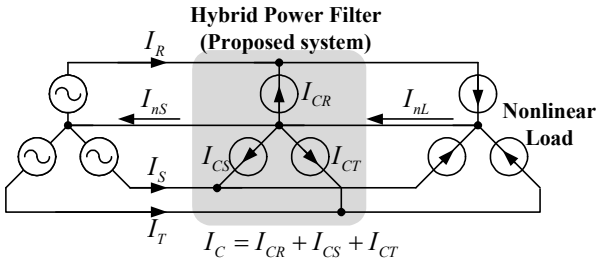


그림 3. 시스템 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of proposed system

3. 시스템 제어기 구성

3.2 제안된 고조파 검출기법

능동전력필터부의 제어에 있어서 고조파의 검출은 제어의 레퍼런스 값을 결정하는 중요한 요인이다. 따라서 고조파 검출 기법의 성능이 전체 시스템 성능에 큰 영향을 미친다.

본 논문에서 제안하는 고조파 검출 기법은 Goertzel 알고리즘을 이용한 이산 푸리에 변환(DFT)에 기본을 두고 있다.

입력의 표본화된 신호를 $x[n]$ 이라 할 때, 그 DFT는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{nk}, \quad W_N^{nk} = e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (1)$$

여기서 W_N 은 회전인자로 복소평면의 단위원 원주상에서 $1/N$ 원주만큼 이동한 점을 의미한다.

Goertzel 알고리즘을 통하여 $x[n]$ 을 처리하면, LTI(Linear Time Invariant)필터의 특성에 따라, 그 결과 $y_k[n]$ 은 임펄스 응답 $h[n]$ 과의 컨볼루션에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$y_k[n] = x[n] * h[n] = x[n] * (W_N^{-nk} u[n]) \quad (2)$$

식(2)에서 $h[n]$ 을 z -변환하여 나타내면 이 필터의 전달함수 $H(z)$ 는 다음과 같다.

$$H(z) = \frac{1}{1 - W_N^{-k} z^{-1}} = \frac{1 - W_N^k z^{-1}}{1 - (2\cos\frac{2\pi k}{N})z^{-1} + z^{-2}} \quad (3)$$

식(3)에서 알 수 있는 바와 같이 $z = \exp(-j2\pi k/N)$ 에서 전달함수 $H(z)$ 의 영점과 극점이 상쇄되므로 $f_s = 2\pi$ 가 될 때 공명이 집중되게 된다. 즉, 입력의 주기신호에 있어서 한주기의 신호를 샘플링하고 그 데이터를 바탕으로 검출하고자 하는

주파수를 분리해 낸다.^[3]

식(3)을 선형 차분 방정식을 이용하여 시간영역에서의 입력력 관계식으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_k[n] = 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) Q_k[n-1] - Q_k[n-2] + x[n] \quad (4)$$

$$y_k[n] = Q_k[n] - W_N^k Q_k[n-1] \quad (5)$$

식(4)와 (5)를 블록도로 표현하면 그림 4와 같다.^[3]

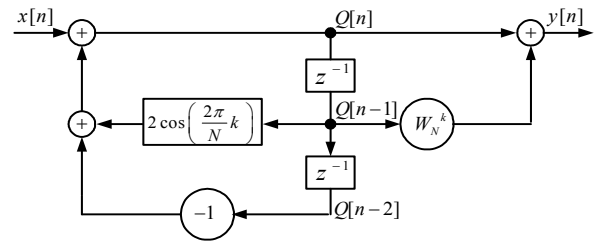


그림 4. Goertzel 알고리즘 블록도
Fig. 4. Block diagram of the Goertzel Algorithm

Goertzel 알고리즘은 주어진 k 에 있어서 연산에 N 개의 실수 곱셈과 하나의 복소수 곱셈만이 요구된다. 같은 조건에 있어서 일반적인 DFT에서 N 개의 복소수 곱셈이 필요하고, radix-2 FFT에서는 $N \log_2 N$ 개의 복소수 곱셈이 요구된다. 이것은 DSP와 같은 디지털 신호 처리 제어기 구성에 있어 보다 유리하다는 것을 의미한다.^[4]

식(5)로부터 검출하고자 하는 주파수의 크기는 식(6)와 같이 얻을 수 있고, 위상은 식(7)과 같이 얻을 수 있다.

$$|y_k(N)|^2 = Q_k^2(N-1) + Q_k^2(N-2) - 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) Q_k(N-1) Q_k(N-2) \quad (6)$$

$$\angle y_k(N) = \tan^{-1}\left\{\frac{\sin(2\pi k/N) Q[N-2]}{Q[N-1] - \cos(2\pi k/N) Q[N-2]}\right\} \quad (7)$$

즉, 중성선 전류를 I_{nL} 이라 하고 한 주기중 N 개의 샘플링을 받아 중성선 전류에 존재하는 3차 고조파성분, I_{3rd} 를 검출할 때, I_{3rd} 는 다음과 같이 표현된다.

$$I_{3rd} = I_{nL}[N] + \left\{2\cos\left(\frac{6\pi}{N}\right) - e^{-j6\pi/N}\right\} I_{nL}[N-1] - \left\{2\cos\left(\frac{6\pi}{N}\right) e^{-j6\pi/N} + 1\right\} I_{nL}[N-2] + e^{-j6\pi/N} I_{nL}[N-3] \quad (8)$$

식(8)에서 확인할 수 있듯이 본 논문의 고조파 검출 기법은 센싱받는 신호의 한 주기 데이터가 요구되며 그 특성상 한주기의 지연이 발생한다. 이는 센싱받는 신호의 주기가 짧을수록 추종 속도가 높아진다는 것을 의미한다.

따라서 제안된 영상분 검출 기법은 중성선 전류검출에 있어 기존의 60Hz의 성분을 검출하여 제거하는 검출 기법에 비하여 3배 이상의 검출속도를 가질 수 있다.

3.2 전체 시스템 제어기법

그림 5는 본 논문에서 제안하는 시스템의 전체 제어 블록도를 나타낸다. 이는 고조파 검출부와 전류제어부로 구성된다.

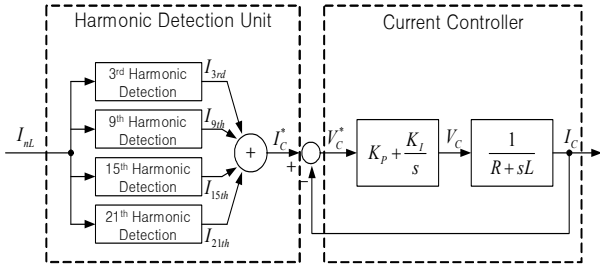


그림 5. 시스템 제어 블록도
Fig. 5. System control block diagram

고조파 검출부에서는 센싱받은 부하단 중성선 전류값을 이용하여 각 고조파 성분을 분리하고 각 고조파 성분의 크기 및 위상을 이용하여 능동전력필터의 전류 지령치를 생성한다. 본 논문에서는 그림4의 알고리즘을 3차, 9차, 15차, 21차 고조파에 적용하여 한 주기동안 4개의 주파수 성분을 검출하였다. 전류 제어부는 고조파 검출부에서 생성된 전류지령치와 센서부에서 검출한 출력전류를 비교하여 PI제어기를 이용하여 능동전력필터부의 출력전류를 제어한다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 PSIM을 이용한 시뮬레이션으로 제안된 시스템의 영상분 전류저감 특성을 분석하였다. 중성선 실효전류는 30[A]기준으로 설계하였고 그림 6에 시뮬레이션 회로도도와 표 1에 각부 파라미터를 정리하였다.

표 1. 시뮬레이션 각부 파라미터
Table 1. Simulation Parameters

Parameters	Value
각 상의 라인 임피던스	3[mΩ], 0.150[mH]
중성선의 라인 임피던스	1[mΩ], 0.500[mH]
저압전원단 선간전압/상전압	380[V] / 220[V]
각상의 부하 임피던스	1421[μF] / 37.33[Ω]
능동전력필터 스위칭 주파수	10kHz

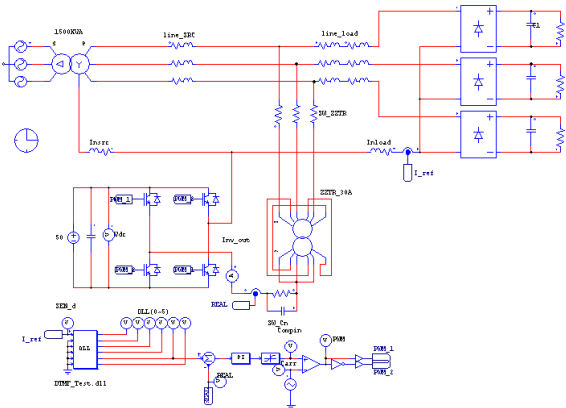


그림 6. PSIM 시뮬레이션 회로도
Fig. 6. PSIM simulation schematic

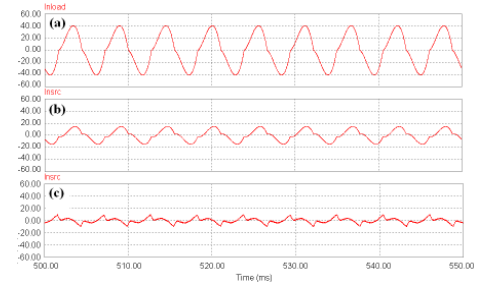


그림 7. (a)부하측 중성선 전류, (b)전원측 중성선 전류(기준), (c)전원측 중성선 전류(제안된 시스템 사용시)
Fig. 7. Neutral current waveforms

그림 7(a)는 부하측 중성선 전류의 파형을 나타낸다. (b)와 (c)는 각각 기존의 zigzag transformer만 사용시와 제안된 시스템 사용시의 전원측 중성선 전류 파형이다. 중성선 전류 실효치를 기준으로 하였을 때, (b)의 경우 약 66.47%의 보상율, (c)의 경우 90.72%의 보상율을 얻었다. 그림 8(a)는 중성선전류를 주파수별로 분리한 것이고 (b)는 본 논문에서 제안한 검출기법의 검출 특성으로 정확한 크기와 위상으로 고조파를 분리해 내고 있음을 확인할 수 있다.

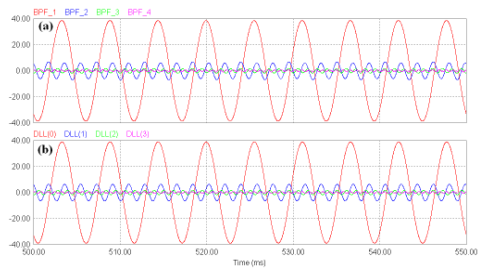


그림 8. 고조파 검출 성능
Fig. 8. Performance of harmonic detection

5. 결론

본 논문에서는 지그재그결선 변압기와 능동전력필터를 결합한 하이브리드형의 고조파 필터를 제안하고 Goertzel 알고리즘을 이용한 새로운 고조파 검출기법을 제안하였다. 기존의 중성선 영상분 전류 저감장치인 Zigzag transformer의 경우 실측 데이터를 바탕으로 시뮬레이션에 적용 하였으며 그 정확도는 약 97.5%로 실제와 상당히 비슷한 특성을 보였다. 시뮬레이션 결과, Zigzag transformer는 약 66.47%의 중성선 전류 저감율을 보였으며, 제안된 시스템은 86.79% ~ 90.72%의 저감율을 보여 제안된 시스템의 타당성을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] 장민수 최세완 김기용, "3상 4선식 배전계통에서 중성선 전류 고조파의 제거를 위한 저가형 능동전력필터 개발", 전력전자학회 하계 학술대회, pp 607-611, 2002.
- [2] 정연해 이기철 강창원 한성배, "케이블 중성선 과전류 원인 및 대책", 전력기술인, vol. 2002. 05, pp.31-37, 2002.
- [3] G. Goertzel, "An algorithm for the evaluation of finite trigonocetric series", Amer.Math.Mon., vol.65, no.1, pp. 34-35, Jan. 1958.
- [4] Asiminoaci,L BlaabjergF. Hansen,S, "Detection is key", IEEE Industry Applications Magazine, Volume 13, Issue 4, pp.22-33, 2007.