

수동필터를 이용한 RTDS 고조파 제거 모의 훈련 코스 개발

이남호* 조윤성* 이철균* 이육화* 신정훈** 김태균**
 LS산전* 전력연구원**

Development of the RTDS Training Course for Control of Harmonic Currents using Passive Filters

N.H LEE* Y.S CHO* C.K LEE* W.H LEE* J.H SHIN** T.K KIM**
 LSIS* KEPRI**

Abstract - This paper presents the RTDS training course on using passive filters for control of harmonic currents. The course can show harmonic currents in power system, which is occurred by function generators, with Fourier analysis function of RTDS and the effect of passive filters implemented in RTDS to eliminate harmonics. In addition to, With Jeju-Haenam HVDC system, we have simulated the effect of passive filters on harmonic currents occurred by massive power conversion system of HVDC.

분해하여 해석할 수 있으며, 이 정수배 성분을 고조파라 부른다. 즉 주기가 T인 왜형파의 시간함수를 f(t)라 하면 다음과 같은 Fourier 급수로 전개할 수 있다.

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots$$

$$= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t$$

여기서 $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, a_0 는 직류분이다.

1. 서 론

본 논문에서는 공급계통의 정현파 전압을 비선형 부하에 인가하면 비정현파의 부하전류가 계통내로 흐르게 되어 발생하는 고조파에 대한 대책중의 하나인 수동필터의 특징과 설계방법을 소개하고 RTDS를 이용한 수동필터의 고조파 제거 모의 훈련에 대해 기술하였다. 고조파 제거를 위한 수동필터는 능동필터, 1차 감쇄필터, 2차 감쇄필터로 구분하며 각 필터의 특성을 고려하여 제거하고자 하는 고조파 차수에 대한 R, L, C 값 계산 및 동조의 침예도(Q)에 따라 필터를 설계한다. 본 논문에서 소개하는 RTDS 모의훈련 코스는 함수발생기에 의해 발생한 다양한 고조파 전류원을 RTDS의 Fourier 분석 기능을 통해 계통에 포함된 고조파를 확인하고 해당 고조파 제거를 위한 수동필터를 RTDS상에 구현하여 수동필터에 의한 고조파 제거효과를 보여주고 있다. 또한 실제계에 대한 수동필터의 설치 예를 위해 제주-해남간 HVDC 계통을 사용하여 대규모 전력변환장치인 HVDC 계통 내에 발생하는 고조파를 확인하고 이에 대한 수동필터의 효과를 모의하였다. 본 논문의 목적은 고조파 제거를 위해 가장 많이 사용되는 수동필터의 설계와 효과를 RTDS를 이용하여 훈련코스를 개발함으로써 수동필터에 대한 전기공학 전공학생의 이해와 교육효과를 증진시키는 데 있다.

주파수가 가장 낮은(n=1) 정현파를 기본파라 하고, 그 이외의 주파수(n>1)를 제 n차 고조파라고 한다. 제 n차 고조파는 기본파에 비해 크기는 1/n이고 기본파의 n배 주파수를 갖는다.

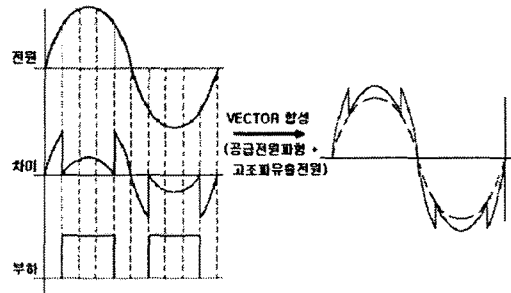


그림 1 비선형부하에 의한 고조파 전류 발생

2. 본 론

2.1 고조파 발생원인 및 대책

공급계통의 정현파 전압을 비선형 부하에 인가하면 비정현파의 부하전류가 계통내로 흐르게 된다. 이 전류는 전원임피던스에 의해 전압강하를 발생하게 하고, 이와 같은 전압강하에 의해 정현파의 전원 전압은 왜곡된 파형이 된다. 즉 그림1과 같이 사용주파수인 정현파 전류를 전원에서 공급할 때 비선형 부하가 방형파 전류를 필요로 할 경우 사인파와 방형파의 차이에 상당하는 전류가 전원 측으로 흘러들어가고 이는 전원 측 정현파와 합성이 되어 고조파 전류의 형태를 이룬다. 이러한 주기성을 갖는 왜형파는 다음과 같이 Fourier급수로 전개하여 기본주파수(60Hz)와 정수배의 주파수 성분(n×60Hz)으로

전력계통에는 각종 고조파 발생원이 존재하며 그 종류는

- 변압기 여자전류
- 용접기, 아크로, 유도도 등
- SCR 교류위상제어
- AC/DC 정류기
- 컴퓨터, 모니터 등 단상정류장치
- 안정기
- Inverter, DC Converter, UPS 등

이 있으며 그 가운데서 특히 고조파 발생량이 크고 계통에 영향을 주는 것은 대용량 아크로, 대용량 전력변환장치(정류기, 사이리스터) 등이다. 이러한 고조파에 대한 대책으로는

- 수동필터(Passive Filter)
- 능동필터(Active Filter)
- Electro-Magnetic Device
 - › 위상변위(Phase Shift)장치

- ▶ 증성선 고조파 저감장치
- 기타
 - ▶ 변환기의 다펄스화
 - ▶ 단락용량 증대
 - ▶ 기기의 고조파 내량 강화
 - ▶ 콘덴서용 직렬리액터 설치
 - ▶ PWM 방식 도입
 - ▶ 공급선로의 전용화

등이 있다.

2.2 수동 필터 종류 및 설계

고조파를 제거하는 데에 있어 2.1절에서 기술한 바와 같이 다양한 방법이 존재하지만 본 절에서는 전통적으로 사용되어온 방법인 동조필터나 감쇄필터(고대역필터)와 같은 수동필터 기술에 관해 개괄적으로 기술하고 이를 고조파 모의 혼련코스에 적용하고자 한다. 수동필터는 일반적으로 계통 내에 존재하는 고조파를 흡수하여 계통의 다른 부분이 고조파의 영향을 받지 않도록 차단하는 데에 있다. 따라서 수동필터는 고조파의 발생원과 가급적 가까이 설치되어야 하며 대체로 대규모 고조파 발생원이 있을 경우에는 고조파를 발생시키는 설비와 함께 설치되어 마치 설비의 일부처럼 사용되는 경향이 있다. 이는 대규모 전력계통 내 임의의 지점에서 불특정 다수의 부하에서 발생하는 고조파를 제거하기 위한 것이라기보다는 특정 부하에서 발생하는 고조파를 제거하기 위한 것이다.

수동필터는 동조의 침예도에 따라 5차나 7차 등 저차 고조파에 침예하게 동조되는 동조필터(tuned filter 또는 band-pass filter, high Q filter)와 17차 및 그 이상의 주파수에서 낮은 임피던스 경로를 제공하는 필터로 통상 고대역 필터(high-pass filter)라 불리는 감쇄필터(damped filter, low Q filter)의 두 가지 형태의 필터가 있다. 이들 필터는 설계가 간단하고 제작비용도 가장 낮으며 감쇄필터는 구조상 다시 1차, 2차, 3차 등으로 나뉜다.

2.2.1 동조필터

동조필터는 R, L, C의 직렬공진회로에 의해 구성되는데, 단일고조파에 공진하고, 공진주파수에서는 저저항을 나타낸다. 필터의 임피던스는

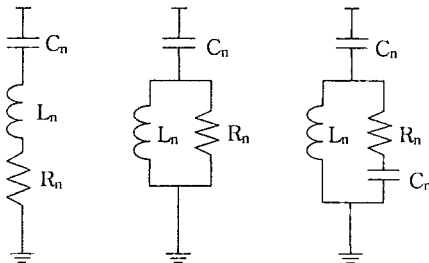
$$Z_n = R_n + j(\omega_n L_n - \frac{1}{\omega_n C_n}) \quad (1)$$

여기서, L_n : 제 n차 고조파필터의 인덕터 [H]

C_n : 제 n차 고조파필터의 커패시터 [F]

R_n : 제 n차 고조파필터의 실효저항 [Ω]

ω_n : 제 n차 각 주파수 = $2\pi f_n$ [rad/sec]



(a) Band-Pass(동조필터) (b) High-Pass(2차 감쇄필터) (c) C-Type(3차 감쇄필터)

그림 2 동조필터

로 주어진다. 동조필터의 동조주파수 f_n 을 식(1)의 인덕터와 커패시터의 공조조건에서 구하게 되면

$$\omega_n L_n = \frac{1}{\omega_n C_n} \quad (2)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_n C_n}} \quad (3)$$

로 정의되고 필터의 성능지수를 공진의 날카로움을 의미하는 Q_n factor로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$Q_n = \frac{\sqrt{L_n/C_n}}{R_n} = \frac{\omega_n L_n}{R_n} = \frac{1}{\omega_n C_n R_n} \quad (4)$$

공진주파수에서는 필터 임피던스 Z_n 은 R_n 과 같이 되고, 필터 효과는 R_n 이 작을수록, 즉 Q_n 이 클수록 크고, 완전동조하면 고조파전압 $V_n = I_n R_n$ 이 된다.

2.2.2 감쇄필터

고대역 필터(high-pass filter)라고 불리는 감쇄필터는 공진의 Q를 둔하게 하면 광범위의 고조파에 대해서 저저항으로 할 수 있다. 즉 어떤 특정 주파수(Cut-off Frequency)이상의 주파수 성분에 대하여 낮은 임피던스로 작용하여 높은 차수의 고조파 성분을 흡수하는 역할을 한다. 경우에 따라서는 제거해야 할 고조파의 가장 낮은 차수에 주파수를 맞추어 모든 고조파성분에 대하여 하나만의 감쇄필터를 사용하는 경우가 종종 있다. 하지만 고대역필터 통과대역 안의 임피던스 최소화는 동조필터의 동조주파수에서의 임피던스만큼 낮아질 수 없고 모든 계통 내 고조파의 상당부분을 하나의 필터로 흡수하려 하면 기본과 주파수 입장에서 보았을 때 필터가 대단히 큰 용량을 지녀야 하기 때문에 그다지 좋은 방법은 아니다. 따라서 보통 5차, 7차 등 상대적으로 크기가 큰 저차고조파 성분에 대해서는 동조필터를 적용하지만 상대적으로 크기가 작은 고차 고조파 성분에 대해서만 개별적인 보상을 하지 않고 감쇄필터를 통하여 일괄적인 보상을 하게 된다.

2차 감쇄필터의 임피던스는

$$Z_{n2} = \frac{1}{j\omega C_n} + \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{1}{j\omega L_n}} \quad (5)$$

로 주어진다. 감쇄필터의 동조된 주파수 즉 차단주파수(cut-off frequency)는 동조필터의 동조주파수를 구하는 식(3)과 동일한 식으로 구해진다. 공진의 날카로움으로서 감쇄필터의 성능지수 Q_n 을 정하면 다음과 같이 되며 동조필터의 Q_n 과 역수의 형태로 된다.

$$Q_n = \frac{R_n}{\sqrt{L_n/C_n}} = \frac{R_n}{\omega_n L_n} = \frac{R_n \omega_n C_n}{1} \quad (6)$$

2.3 수동필터를 이용한 고조파 제거 RTDS 모의

2.3.1 고조파 전류원에 대한 수동필터 적용

수동필터에 의한 고조파 성분 제거를 모의하기 위해 그림 3과 같이 RTDS가 제공하는 함수발생기(function generator)를 사용하여 크기가 다르고 위상이 같은 기본파, 3, 5, 7, 11, 13, 17조파의 전류를 발생시키는 계통도를 구성한다. 계통에 흐르는 고조파 전류를 제거하기 위한 각 고조파 차수에 대한 동조필터의 설계는 식(3)과 (4)를 이용하여 R, L, C의 값을 구한다. 여기서 사용되는 커패시터는 1μF이며 동조의 침예도(Q)는 100으로 하였다. 다음의 예는 3조파에 대한 필터계수를 구하는 과정이며 다른 조파의 경우도 동일한 방법으로 구하게 된다.

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 3 \times 60)^2 C} = \frac{10^6}{(2\pi \times 3 \times 60)^2} \approx 0.78179 \text{ [H]}$$

$Q=100$ 이므로

$$R = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{Q} = \frac{\sqrt{\frac{0.78179}{10^{-6}}}}{100} \approx 8 [\Omega]$$

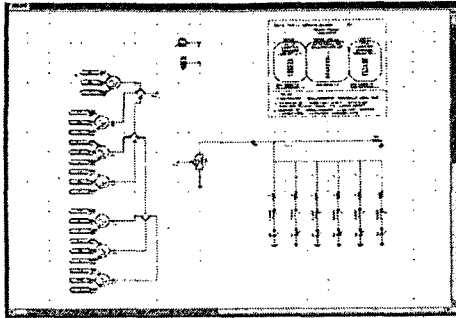


그림 3 수동필터를 이용한 고조파 전류 제거

수동필터 통과 이후의 계통에 유입되는 전류파형을 Fourier 분석을 하면 다음과 같고 분석결과 수동필터에 의해 고조파전류가 제거되었음을 확인할 수 있다.

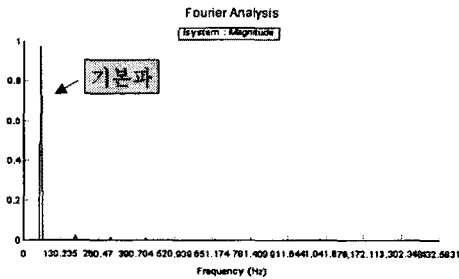


그림 4 수동필터 통과 후 계통전류 분석

2.3.2 제주-해남 HVDC 계통에 대한 수동필터 적용

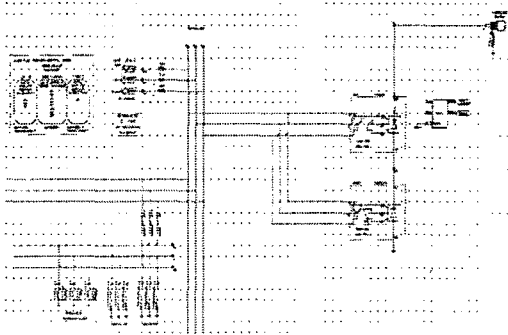


그림 5 해남 HVDC 계통

위의 RTDS 모의 계통은 제주-해남 HVDC 연계 선로 중 해남 측 계통이며 HVDC 컨버터는 대용량의 전력변환장치로 구성되어 AC계통이나 DC 선로 측에 고조파전류를 제공한다. HVDC 선로에 유입되는 전원측 전류파형에 대한 Fourier 분석은 전류 내에 포함되어 있는 고조파 성분을 확인할 수 있고 그 결과 비교적 큰 고조파 성분은 11, 13 조파이며 기타 23, 25차 이상의 고조파 성분도 적은 양이 포함되어 있음을 확인하였다. 11, 13조파의 제거를 위해서는 위의 예와 동일한 방식으로 동조필터를 설계하여 적용하였고, 23차, 25차 이상의 고조파

성분을 제거하기 위해서 차단주파수가 21조파 인 감쇄필터를 사용하여 다음과 같이 필터를 설계하였다.

$$L = \frac{10^6}{(2\pi \times 21 \times 60)^2} \approx 0.01596 [H]$$

$$R = Q \times \sqrt{\frac{L}{C}} = 1 \times \sqrt{\frac{0.01596}{10^{-6}}} \approx 126.332 [\Omega]$$

여기서 Q=1이고, C=1μF이다.

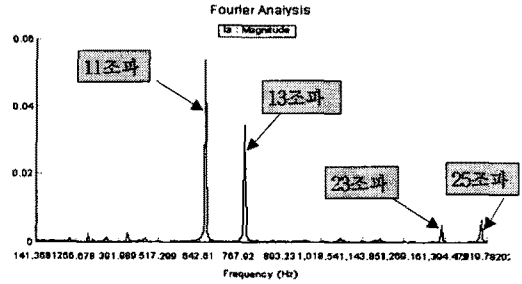


그림 5 해남 HVDC 계통 고조파 분석

수동필터를 해남 HVDC 계통에 적용한 결과 고조파 전류가 제거되었으며 계통 전류에 대한 Fourier 분석결과는 다음과 같다.

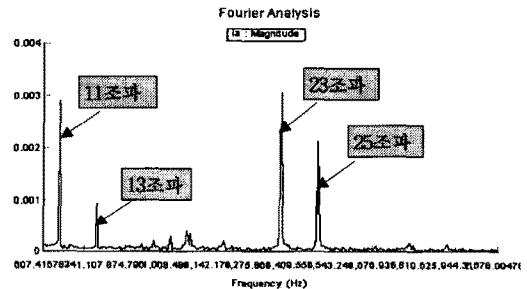


그림 6 필터 통과 후 해남 HVDC 에 흐르는 전류분석

3. 결 론

본 논문에서는 실시간 시뮬레이터(RTDS)를 이용하여 고조파 특성을 모의하고 다양한 수동 필터를 설계(R, L, C 계수 계산)하여 계통에 적용함으로써 고조파 해석 및 대책에 대한 이해를 증진시키고자 하였다. 본 RTDS 훈련 코스를 통하여 교육생은 비선형 부하가 설치된 계통에 고조파가 포함된 전류가 흐르고 Fourier 파형 분석을 통해 고조파를 각 조파별 확인하는 방법과 이에 대한 수동필터를 설계하여 계통에 설치하는 과정 그리고 필터의 효과를 효과적으로 모의할 수 있을 것이라 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 신중린외 3인, "무효전력제어에 의한 에너지 절감방안 연구", 동상산업부, 1998년 2월
- [2] G.H. TOMLISON, "Electrical Networks and Filters", Prentice Hall, 1991