

EMTP를 이용한 12-펄스 정류기 모델링

문다혜

성노규
성균관대학교

김철환

Modeling of a 12-pulse Rectifier using EMTP

Da-Hye Moon, No-Kyu Seong, Chul-Hwan Kim
Sungkyunkwan University

Abstract - HVDC(High Voltage Direct Current) 송전 시스템은 세계 각국에서 경쟁적으로 개발하고 있으며 계통에의 연계가 점점 증가하고 있다. 전형적인 HVDC 송전 시스템에서는 낮은 고조파 함유율과 높은 전압을 등의 이유로 주로 12-펄스 사이리스터 정류기가 사용된다. 본 논문에서는 12-펄스 정류기를 EMTP(ElectroMagnetic Transient Program)를 이용하여 모델링 하였으며, 고조파 분석을 통하여 모델링의 적절성을 검증하였다.

1. 서 론

HVDC 송전 시스템은 교류 대신 직류를 송전하는 시스템으로 1954년 스웨덴에서 처음 도입된 이후로 계속 발전하고 있다[1]. HVDC 송전 시스템은 전력 전자 기술과 대용량 반도체 소자의 개발에 힘입어 비약적으로 발전하였고, 우리나라뿐만 아니라 여러 국가에서 주요하게 사용되고 있다.

HVDC 송전 시스템의 장점은 다음과 같다[2].

- 1) 장거리 전력전송에 있어서는 교류 전송에 비하여 가격이 저렴하다.
- 2) 교류 계통에 영향을 주지 않으며 대용량의 전력전송이 가능하다.
- 3) 주파수에 상관없이 연계가 가능하다.
- 4) 전력의 예비율을 낮출 수 있기 때문에 기존에 설치된 발전 용량을 줄일 수 있다.
- 5) 발전계획을 보다 크고 경제적으로 세울 수 있다.

이러한 장점을 갖고 있는 HVDC 송전 시스템에서는 주로 12-펄스 정류기가 사용된다. 이 때 다이오드의 비선형 동작과 직류평활용 콘덴서 때문에 입력전원 전류는 왜곡되고, 많은 고조파를 함유하게 된다. 다이오드 정류기에 의해서 왜곡된 입력전류는 전력계통내 공동접속점에서의 전압왜곡, 전력계통 소자들의 정격 증가, 민감한 전자장치의 오동작, 전기에너지의 비효율적인 사용 등을 야기 시킨다. 이러한 다이오드 정류기의 입력전류의 고조파를 저감하기 위한 많은 방법이 제안되었다[3]. 능동전력필터 및 PWM 정류기에 의한 방식은 성능이 우수하지만 제어가 복잡하고 많은 스위칭 소자와 센서 등을 사용하여 효율 및 경제성의 측면에서 어려움이 있다[4].

따라서, 본 논문에서는 이와 같은 문제점에 대하여 새로운 해결책을 개발하기 위하여 HVDC 시스템의 기초가 되는 6-펄스 정류기와 2대의 6-펄스 정류기를 연결한 12-펄스 정류기를 EMTP를 이용하여 모델링 하였다. 시뮬레이션을 통하여 출력 전압을 분석하고 고조파 특성을 분석하여 모델링을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 정류기

교류 전력에서 직류 전력을 얻기 위해 정류 작용에 중점을 두고 만들어진 전기적인 회로 장치를 정류기라 한다.

일반적으로 정류의 방식은 크게 단상 반파 정류, 단상 전파 정류, 3상 정류 세 가지로 나누어진다. 단상 반파 정류는 입력 교류 파형의 반 싸이클은 정류기에 의해 차단되어 출력 파형이 맥동이 심한 직류 파형이므로 그리 많이 쓰이지 않는다. 단상 전파 정류는 단상 반파 정류에서 정류되지 않은 싸이클마저 정류하는 방식이다. 이 회로의 출력 파형은 최대와 최저점이 다소 차이가 많이 나며 고조파 성분 또한 많이 포함하게 된다.

2.1.1 3상 정류기

3상 정류기는 일반적으로 대용량부하에 직류 전압과 전류를 공급하는 산업용으로 사용되고 있다. 3상 전파 정류는 3상 교류의 정류에 사용되는데 전파 정류기의 출력은 반파 정류기보다 본질적으로 맥동성분이 훨씬 적게 포함되어 있다[5]. 3상 전파 정류회로의 출력파형은 단상 전파

정류회로의 출력파형보다 맥동이 훨씬 적어 최고점과 최저점이 비슷하므로 직류 파형에 가까운 출력을 얻을 수 있다.

2.1.2 12-펄스 정류기

3상 정류기는 단상정류기보다 직류 출력의 질이 현저히 개선된다. 6-펄스 정류기의 경우, 단상 정류기보다 출력전압의 고조파는 적고 주파수는 전원주파수의 6배가 된다. 그러나 6-펄스 정류기는 입력 전류에 제 5차 및 제 7차 고조파를 포함하게 되어 고조파 문제를 야기 시킬 수 있다. 따라서 정류기의 입력과 출력 특성을 개선하기 위해 2개의 6-펄스 브리지를 사용하면 출력 고조파 성분을 더욱 감소시킬 수 있다. 이러한 형태를 12-펄스 정류기라 한다. 12-펄스 정류기의 입력전류는 고조파가 현저히 저감되어 정현파에 가깝고 역률 또한 개선된다.

따라서, 전형적인 HVDC 시스템에서는 주로 12-펄스 사이리스터 정류기가 사용된다. HVDC 시스템의 중단은 보통 두 개의 3상 컨버터 브리지가 직렬로 연결된 12-펄스 컨버터 형태로 구성되어 있다. 6-펄스 정류기를 직렬 연결하게 되면 고조파 성분이 제거되고 출력 전압의 크기 또한 높아져 정류 성능이 향상된다.

2.2 고조파

발전단에서 공급되는 전압, 전류는 본래 정현파이지만 정류장치, 인버터 등의 비선형 부하의 사용으로 인해 입력 전류는 정현파가 되지 못하고 왜형파가 된다. 왜형파란 사인파가 아닌 주기적인 파형을 말하는데 기본파 성분과 그 정수배의 주파수를 지닌 성분이 중첩된 파형이다. 여기서 기본 주파수 위와 중첩되어 있는 고조파 성분을 고조파라 하고 공급 계통의 기본 주파수의 정수배 주파수를 가지는 정현파 전압·전류를 말한다.

완전한 정현파가 왜곡되는 현상을 전압과 전류 고조파 왜곡이라 한다. 일반적으로 왜곡은 배전 계통에 연결된 비선형 부하에 의해 발생한다 [6]. 이때 왜곡된 부하 전류는 계통에 왜곡된 전압을 발생시킨다. 이러한 고조파 피해를 줄이고 고조파에 민감한 전력계통기와 부하를 보호하기 위한 고조파 저감대책이 필요하다.

일반적으로 고조파 저감 대책에는 정류기를 다펄스화시켜 출력상수를 증가시키는 방법을 사용한다. 펄스의 수가 커지면 교류 전류에 포함되어 있는 고조파 차수가 높아져 고조파가 저감된다. 따라서 6-펄스 정류기 보다는 두 개의 6-펄스 정류기를 직렬로 연결한 12-펄스 정류기를 사용하여 고조파 성분이 적은 향상된 정류 성능을 가지게 된다.

6-펄스 정류기와 12-펄스 정류기 각각의 입력 전류를 푸리에 급수로 나타내면 다음과 같다.

$$i(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_0 (\cos \omega_c t - \frac{1}{5} \cos 5\omega_c t + \frac{1}{7} \cos 7\omega_c t - \frac{1}{11} \cos 11\omega_c t + \frac{1}{13} \cos 13\omega_c t - \dots) \quad (1)$$

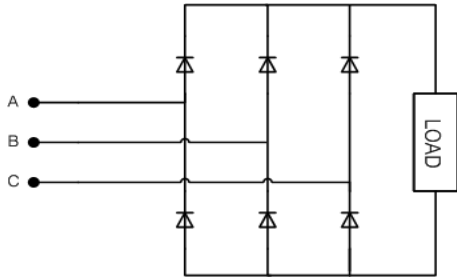
$$i(t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_0 (\cos \omega_c t - \frac{1}{11} \cos 11\omega_c t + \frac{1}{13} \cos 13\omega_c t - \dots) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 비교해 보면 6-펄스 정류기의 입력 전류에는 교류시스템의 기본주파수와 6n±1, n = 1, 2, 3 ... 차수의 고조파 항으로 구성되어 있는 반면에 12-펄스 정류기의 경우 고조파 발생 차수는 12n±1인 차수의 고조파 항이 포함되어 있음을 알 수 있다. 따라서 12-펄스 정류기를 사용하면 제 5차 고조파와 제 7차 고조파 등이 제거된 향상된 정류 결과를 얻을 수 있다.

2.3 정류기의 모델링 및 검증

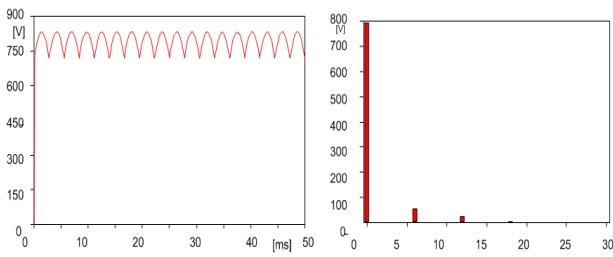
2.3.1 6-펄스 정류기 모델링

다음 그림 1은 EMTP를 이용하여 모델링한 3상 전파 브리지 정류기 중 6-펄스 정류기의 회로도이다.



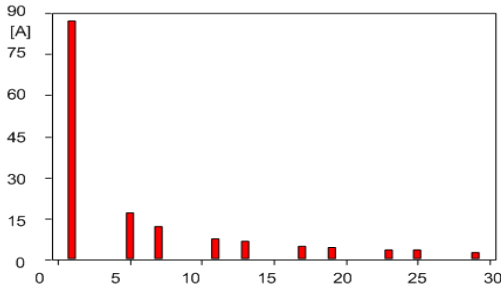
〈그림 1〉 6-펄스 정류기 모델링 회로

다음 그림 2는 그림 1의 모델링 회로에 대한 모의 결과이다. 그림 2(a)의 전압파형을 관찰하면 맥동과 함께 교류에서 직류로 정류되었음을 알 수 있다. 출력 전압은 교류 공급 전압의 1/6의 주기로 나타난다. 출력 전압에 중첩되는 고조파는 $6n\omega$ 이다($n = 1, 2, 3 \dots, \omega = 3$ 상 전원의 주파수). EMTP의 PlotXY를 통하여 고조파 분석을 수행하면 그림 2(b)와 같다. 출력 전압에는 기본 주파수의 6배, 12배, 18배 등의 $6n\omega$ 의 고조파가 함유되어 있음을 확인할 수 있다.



(a) 출력 전압 (b) 고조파 분석 파형
〈그림 2〉 6-펄스 정류기의 출력 전압과 고조파 분석 파형

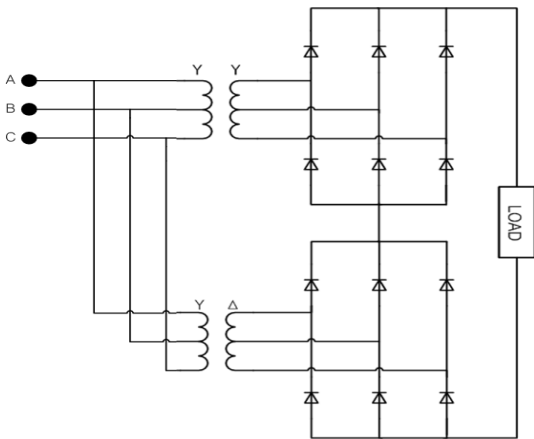
다음 그림 3은 입력 전류의 고조파 분석 파형이다. 식(1)과 같이 6-펄스 정류기의 입력 전류는 기본 주파수항에 제 5차, 7차, 11차, 13차 등 $6n \pm 1$ 의 고조파 항들이 중첩되어 있음을 확인할 수 있다.



〈그림 3〉 입력 전류의 고조파 분석 파형

2.3.2 12-펄스 정류기 모델링

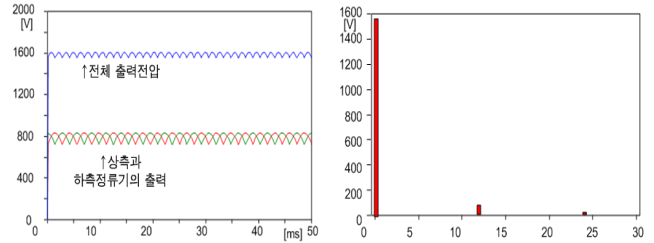
다음 그림 4는 EMTP를 이용하여 12-펄스 정류기를 모델링한 회로 모형이다.



〈그림 4〉 12-펄스 정류기 모델링 회로

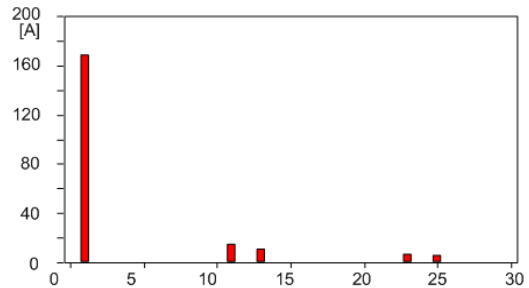
다음 그림 5는 그림 4의 12-펄스 정류기를 모델링한 결과이다. 12-펄스 정류기의 경우, 각 브리지의 출력은 6-펄스 정류기의 출력 전압과 동일한 모양의 파형이고 서로 30°의 위상차를 가진다. 따라서 그림 5(a)를 통하여 12-펄스 정류기의 출력 전압은 상측과 하측 정류기 출력 전압을 합한 것이 됨을 알 수 있다. 그림 5(b)의 고조파 분석 파형을 통해 출력 전압은 전원 주파수의 12배인 고조파 주파수를 갖게 됨을 확인할 수 있다.

또한, 12펄스 정류기의 경우 6-펄스 정류기보다 맥동이 줄어들 뿐만 아니라 높은 출력 전압을 얻을 수 있음을 알 수 있다.



(a) 출력 전압 (b) 고조파 분석 파형
〈그림 5〉 12-펄스 정류기의 출력 전압과 푸리에 변환

12-펄스 정류기의 입력 전류에 대한 고조파 분석 파형을 수행하면 다음 그림 6과 같다. 식 (2)와 같이 제 5차 및 7차 고조파가 제거되어 $12n \pm 1$ 의 고조파 항들만이 중첩되어 있음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 식 (2)에서 제시된 바와 같이 12-펄스 정류기의 모델링이 적절히 되었음을 확인할 수 있다.



〈그림 6〉 입력 전류의 고조파 분석 파형

3. 결 론

본 논문에서는 EMTP(Electromagnetic Transient Program)를 이용하여 12-펄스 정류기를 모델링하였고, 6-펄스 정류기 보다 향상된 정류 결과를 확인하였다. 입력 전류에 대한 고조파 분석 결과를 통하여, 6-펄스 정류기의 경우, 교류시스템에서 발생하는 고조파 발생 차수가 $6n \pm 1$ 인 반면, 12-펄스 정류기의 경우 고조파 발생 차수는 $12n \pm 1$ 이 되어 제 5차 고조파와 제 7차 고조파가 제거됨을 확인하였다. 또한 출력 전압의 맥동성분이 감소되고 직류성분의 전압크기가 상승하여 직류에 가까운 출력을 얻을 수 있음을 검증하였다.

본 논문에서 모델링한 12-펄스 정류기를 통해 향후 대용량 직류 송전 시스템을 모델링 하고 분석하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] N.Monsur, V.K.Sood, L.Lopes, "Modeling A Hybrid Diode-Thyristor or HVDC Rectifier In EMTP-RV", 2006.
- [2] 김찬기, 권영훈, 문형배, 임성주, "HVDC SYSTEM의 기술 동향과 추가 건설", 전기저널, 2006.
- [3] Sewan Choi, Kiyong Kim, "A New 24-Pulse Diode Rectifier for High Voltage and High Power Application", 전력전자학회 논문지, 1999.
- [4] Sewan Choi, Junyong Oh, Chungyuen Won, Youngseok Kim, "Drawing Sinusoidal Input Currents of Series-Connected Diode Rectifiers by A Current Injection Technique", 전력전자학회 논문집, 1999.
- [5] 홍순찬, 전희중, 백형래, 원충연, "PSpice를 활용한 전력전자공학", 인터비전, 2005.
- [6] 대한전기학회, "최신 배전시스템 공학", 북스힐, 2006.