

모듈형 멀티레벨 컨버터의 출력파형 고조파저감과 직류전압평형 연구

정종규*, 한병문*, 최준영**
 명지대학교*, (주) 효성**

Calculation Method for Harmonic Reduction and Capacitors' Voltage Balancing of Modular Multilevel Converter

Jong-Kyou Jeong*, Byung-Moon Han*, Jun-Young Choi**
 Myongji University*, Hyosung Corp.**

ABSTRACT

본 논문에서는 최근 직류송전용 컨버터로 많은 관심이 집중되고 있는 모듈형 멀티레벨 컨버터(Modular Multi-level Converter)에서 출력파형의 고조파를 저감하는 모듈레이션 방법과 각 모듈의 직류전압 불평형을 해소하는 알고리즘에 대해 기술하고 있다. 먼저 본 논문에서 임의의 개수로 반브리지 모듈이 주어졌을 때 고조파 레벨이 최소화되도록 다펄스 형태로 출력파형을 형성하는 방식을 제안하고 그 타당성을 PSCAD 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션으로 검증하였다. 이 방식은 다펄스 출력파형의 각 계단을 형성하는 모듈의 턴온과 턴오프 시점을 보편화된 수식으로 정하는 방식으로 알고리즘 구현이 매우 용이하다. 또한 각 모듈의 직류전압 불평형을 바로잡는 알고리즘을 제안하고 그 타당성도 시뮬레이션으로 검증하였는데, 이 방식은 각 모듈이 교류 매 반주기마다 생성하는 펄스의 크기를 순차적으로 형성하는 것으로 알고리즘의 구현이 용이하다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 향후 국내에서 모듈형 멀티레벨 컨버터를 개발할 때 유용하게 활용될 것으로 보인다.

1. 서론

최근 자기소호가 가능한 IGBT, GTO 등의 전력용 반도체 소자의 개발이 가속화되고 있다. 이에 따라 대용량 전압원 컨버터의 개발이 가능하게 되고 이를 FACTS(Flexible AC Transmission System), HVDC(High Voltage Direct Current) Transmission 등에 응용하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 HVDC분야는 그 동안 대용량에서는 사이리스터를 이용한 전류원 HVDC시스템이 주를 이루었다. 하지만 대용량 전압원 컨버터가 경쟁력을 갖추면서 대용량 HVDC시스템에 적용되는 곳이 늘어가고 있다. 대용량 전압원 HVDC시스템에서 가장 핵심이 되는 기술은 전압원 컨버터의 토폴로지와 모듈레이션 방식이다. 최근 직류송전용 전압원 컨버터로 모듈형 멀티레벨 컨버터에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^[1]

본 논문에서는 모듈형 멀티레벨 컨버터에서 출력파형의 고조파를 저감하는 모듈레이션 방법과 각 모듈의 직류전압 불평형을 억제하는 알고리즘을 제안하고, 그 타당성을 PSCAD 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션으로 검증하였다.

2. MMC(Modular Multilevel Converter)

1.1 MMC 동작원리

그림 1은 MMC의 회로 구성도이다. MMC의 Phase Module은 상·하단 arm으로 구성이 된다. 각 arm은 직렬로 연결된 SM(Sub-Module)로 구성이 되며, SM은 스위치 상태에 따라서 출력 측 터미널에 커패시터의 전압을 형성하거나 바이패스 동작을 하여 영전압을 형성한다. 만약 상·하단 arm의 각 SM중 전압을 형성하는 동작과 영전압을 형성하는 동작을 하는 개수를 적절하게 조정하면 출력전압의 크기를 제어할 수 있다.

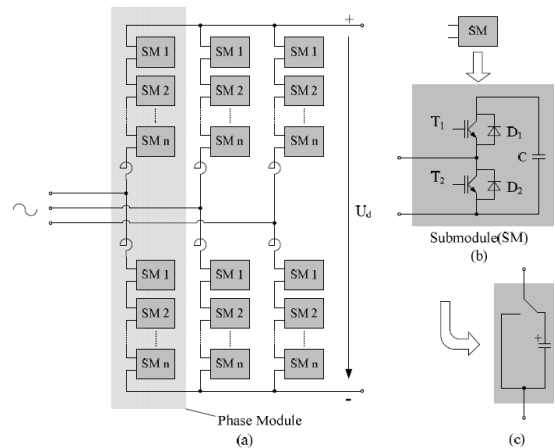


그림 1 MMC와 Sub-Module의 구성도, Sub-Module의 등가모델
 Fig. 1 Design of MMC and Sub-Module, Sub-Module's electrical equivalent

그림 2는 SM의 T1, T2 스위치의 상태에 따른 동작을 나타낸 것이다. 그림 2 (a)는 SM의 출력 터미널에 커패시터 전압을 형성하며, 그림 2 (a)의 좌측 SM은 커패시터 전압을 충전, 우측 SM은 커패시터 전압을 방전하는 동작을 한다. 또한 그림 2 (b)는 SM의 출력 터미널에 영전압을 형성하며 T1 또는 D1을 통해서 양방향으로 전류가 흐른다.

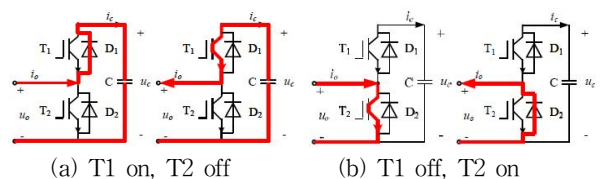


그림 2 Sub-Module 동작
 Fig. 2 Sub-Module operation

1.2 출력전압 고조파 저감 알고리즘

MMC의 출력전압은 각 SM에서 형성하는 전압이 합쳐져서 나타난다. 그림 3은 MMC에서 나타나는 출력전압이 사인에 가까운 파형을 형성함으로써 고조파를 저감하는 방법을 나타낸 것이다. 만약 각 SM의 출력전압의 폭을 적절하게 조절하면 사인에 가까운 출력전압을 얻을 수 있다.^[2]

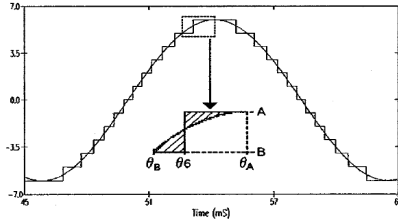


그림 3 고조파 저감 알고리즘
Fig. 3 Algorithm for harmonic reduction

고조파 저감 알고리즘의 기본원리는 두 개의 빗금친 부분의 면적이 동일하다면 주어진 SM의 개수로 형성할 수 있는 출력전압의 파형은 최소의 고조파를 함유한다는 것이다. 그러므로 그림 3에서 θ_6 은 아래의 수식을 통해서 결정할 수 있다. 수식 (1)은 두 개의 빗금친 면적을 적분을 통해서 구하고 이때 면적이 같다면 두 개의 적분을 비교한 값은 0이 된다.

$$\int_{\theta_B}^{\theta_6} (\sin\theta - B)d\theta - \int_{\theta_6}^{\theta_A} (A - \sin\theta)d\theta = 0 \quad (1)$$

수식 (2)는 수식 (1)의 θ_6 를 좌항에 놓고 정리한 것이다.

$$\theta_6 = \frac{A\theta_A - B\theta_B + \cos\theta_A - \cos\theta_B}{A - B} \quad (2)$$

수식 (2)에서 θ_A 와 θ_B 는 수식 (3)을 통해서 구할 수 있다.

$$\theta_A = \sin^{-1}A \quad \theta_B = \sin^{-1}B \quad (3)$$

수식 (2)는 일반화 정리를 하면 수식 (4)와 같다. 여기서 M은 arm을 구성하는 SM의 개수를 의미한다.

$$\theta_n = (n\theta_{n/M} - (n-1)\theta_{(n-1)/M}) + M(\cos\theta_{n/M} - \cos\theta_{(n-1)/M}) \quad (4)$$

$$(n = 1, 2, \dots, 6 \quad A = \frac{n}{M} \quad B = \frac{n-1}{M})$$

그림 4는 PSCAD 프로그램을 이용하여 고조파 저감 알고리즘을 적용한 MMC의 출력전압을 시뮬레이션한 결과파형이다. MMC의 출력전압은 사인파형과 유사하게 나타나고 있으며, 만약 SM의 개수를 늘린다면 좀 더 사인파형에 가까운 결과파형을 얻을 수 있을 것이다.

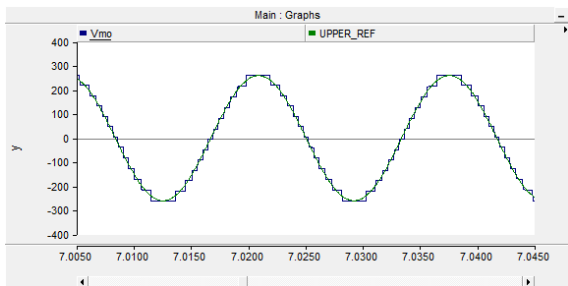
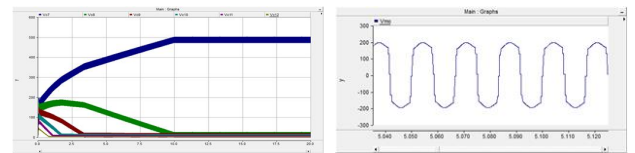


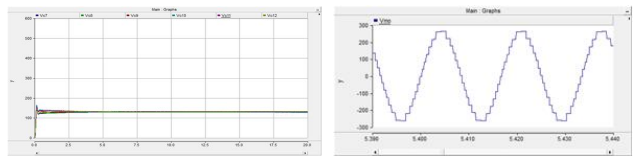
그림 4 MMC 출력전압과 사인 기준파형의 비교
Fig. 4 Comparison of MMC output voltage and sine reference

1.3 Sub-Module 직류전압 불평형 억제 알고리즘

MMC의 phase module은 상·하단 arm으로 구성이 되어 있으며, 각 arm은 SM이 직렬로 연결되어 구성된다. 각 SM은 두 개의 IGBT와 직류 커패시터로 구성되어 있다. MMC의 SM은 사인에 가까운 출력전압을 형성하기 위해서 적절한 출력전압 폭을 형성해야 하며, 이때 모든 SM의 커패시터 전압크기는 동일한 값을 일정하게 유지해야한다. 만약 각 SM 커패시터의 전압크기가 틀리게 되면 MMC는 사인에 가까운 출력전압을 형성할 수 없게 된다. 그러므로 각 SM 커패시터의 직류전압 불평형이 발생하지 않도록 이를 억제하는 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 각 SM이 교류 매 반주기마다 생성하는 펄스의 크기를 순차적으로 형성하는 것으로 직류전압 불평형을 바로잡았다. 그림 5 (a)는 직류전압 불평형 억제 알고리즘을 적용하지 않은 시뮬레이션 결과 파형이며, 그림 5 (b)는 알고리즘을 적용한 결과파형이다. 직류전압 불평형 억제 알고리즘을 적용함으로써 MMC의 출력전압이 안정적으로 형성되는 것을 확인하였다.



(a) 알고리즘 미적용 시뮬레이션 결과파형



(b) 알고리즘 적용 시뮬레이션 결과파형

그림 5 각 SM 커패시터 전압과 MMC의 출력전압파형

Fig. 5 Each Sub-Module capacitor voltage and output voltage of MMC

3. 결론

본 논문에서는 모듈형 멀티레벨 컨버터의 동작원리를 알아보고 출력파형의 고조파를 저감하는 모델레이션 방법과 각 모듈의 직류전압 불평형을 해소하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 그 타당성을 PSCAD 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션으로 검증하였다. 제안하는 방식은 구현이 용이하여 향후 국내에서 모듈형 멀티레벨 컨버터를 개발할 때 유용하게 활용될 것으로 보인다.

이 논문은 지식경제부의 에너지인력양성사업의 지원으로 명지대학교 스마트그리드 고급인력양성센터를 통해서 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] E. Solas, G. Abad, J. A. Barrena, A. Carcar, S. Aurtinetxea, "Modelling, Simulation and Control of Modular Multilevel Converter", accepted to EPE-PEMC2010
- [2] B. Han, S. Baek, H. Kim, G. Karady, "Dynamic Characteristic Analysis of SSSC Based on Multibrige Inverter", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, NO. 2, April 2002