

4권선 변압기의 삼중 델타 전원 연결과 새로운 커먼-모드 필터 연결방법을 이용한 전류 고조파 저감

온성재, 설승기
서울대학교 전력전자연구센터

Suppression of Current Harmonics with Triple Delta Sourced Winding and Novel Connection of Common-mode Filter

Sungjae Ohn, Seung Ki Sul
Seoul National University Power Electronics Center (SPEC)

ABSTRACT

본 논문에서는 삼중 델타 전원과 새로운 커먼 모드 필터 결선을 통해 스위칭에 의한 고조파를 저감하는 방법을 제안한다. PWM에 의해 생성되는 측대파 고조파(Sideband harmonics) 위상을 분석함으로써, 인터리빙 운전 시 삼중 델타 전원 연결과 제안된 커먼모드 필터가 측대파 고조파 전류를 크게 저감할 수 있음을 보인다. 3개의 고정자 권선을 가지는 영구자석 전동기를 이용하여 제안된 필터의 유효성을 검증하였다.

1. 서론

최근 계통 주파수 조정을 위한 MW급 대용량 ESS들과 이를 위한 전력변환 회로에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 리튬 이온 배터리를 이용한 BESS(Battery Energy Storage System)의 경우, 수 초 이내에 MW의 출력을 요구하는 주파수 조정용 ESS 분야에서 큰 주목을 받고 있다.

계통 연계형 전력변환회로의 경우, 계통의 전류 고조파 규제를 만족시키기 위한 필터가 필요하다. 필터에 사용되는 수동소자들은 시스템의 가격과 부피를 증가시키기 때문에 그 크기를 최소화하기 위하여 LCL, LLCL등의 다양한 필터 구조들이 제시되었다. 컨버터를 병렬로 연결하는 경우, 인터리빙 운전을 통해 컨버터 간 전류 고조파의 위상을 천이시켜 상대적으로 작은 필터로도 계통 고조파 규정을 만족시킬 수 있다. 반면, 작은 필터를 사용하기 때문에 컨버터 측 전류는 많은 고조파가 존재하고 이는 반도체 소자와 필터에서 추가적인 손실을 야기한다.

참고문헌 [1]에서는 컨버터 병렬 운전 시 컨버터 측 전류 고조파를 저감을 위한 4권선 변압기의 새로운 결선 방법이 제안되었다. 2차 측 3상 권선 1개에 3상 컨버터 1대의 출력이 연결되는 일반적인 결선 방식과 달리, 그림 1과 같이 1개의 권선 양단 전압을 합성하는 데에 2대의 컨버터가 참여한다. 따라서 컨버터 2대의 스위칭 상태가 1개 권선 전압을 합성하는 데에 관여하여, 권선 전압의 레벨 수는 9개까지 증가한다. 본 논문에서는 전압고조파의 위상을 분석하여 [1]에서 제안된 회로가 저감하는 전류 고조파를 분석한다. 분석한 결과를 토대로 컨버터 측 전류 파형을 개선하기 위한 커먼 모드 필터의 새로운 연결 방법을 제안하였다.

2. 본론

2.1 삼중 델타 전원이 저감하는 측대파 고조파의 위상 분석

참고문헌 [1]에서 제안된 결선 방식에서 변압기 2차 측 1번

권선의 양단 전압을 컨버터 출력 상전압으로 표현하면 식 (1)과 같다.

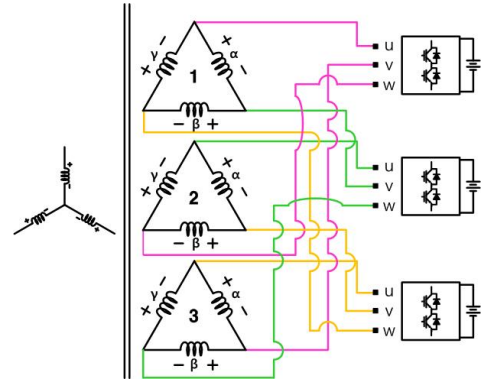


그림 1 컨버터 병렬 운전을 위해 [1]에서 제안된 삼중 델타 전원

$$\begin{cases} V_{\alpha 1} = V_{as1} - V_{bs2} \\ V_{\beta 1} = V_{bs2} - V_{cs3} \\ V_{\gamma 1} = V_{cs3} - V_{as1} \end{cases} \quad (1)$$

인터리빙(Interleaving)을 통해 고조파 전압의 위상을 천이한다면 컨버터 2대가 출력하는 전압고조파 위상에 따라 특정 고조파 전압을 상쇄하는 것이 가능할 것을 생각할 수 있다.

2.2 3상 전압 간의 위상에 따른 측대파 고조파의 분류

참고문헌 [2]에서는 PWM에 의해 발생하는 전압고조파를 수학적으로 분석하였다. 기본파 출력 전압의 각주파수를 ω_0 , 캐리어 주파수를 ω_c 라고 했을 때, $m\omega_c + n\omega_0$ 의 주파수에서 전압고조파는 다음과 같이 표현된다.

$$V(m, n) = V_{mn} \cos(\omega_{mn} t + m\theta_c + n\theta_0) \quad (2)$$

$$\omega_{mn} \equiv m\omega_c + n\omega_0$$

3상의 경우 $\theta_0 = 2\pi/3$ 이므로, $m\omega_c + n\omega_0$ 의 주파수를 가지는 a,b,c상 전압고조파는 3상 전압간에 (3)과 같은 위상차를 가지게 된다.

$$\begin{cases} V_a(m, n) = V_{mn} \cos(\omega_{mn} t + m\theta_c) \\ V_b(m, n) = V_{mn} \cos(\omega_{mn} t + m\theta_c - 2n\pi/3) \\ V_c(m, n) = V_{mn} \cos(\omega_{mn} t + m\theta_c + 2n\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

3상 전압간의 위상 차이를 고려하였을 때, 0이 아닌 정수 k 에 대해 $n = 3k$ 일 경우 해당 주파수의 전압 고조파는 영상분, $n = 3k + 1$ 일 경우 정상분, $n = 3k + 2$ 일 경우 역상분으로 분류할 수 있다.

2.3 삼중 델타 전원이 저감하는 전압 고조파

참고문헌 [1]의 방법에서 컨버터 2와 컨버터 3의 캐리어는 컨버터 1에 비해 각각 $-2\pi/3, 2\pi/3$ 의 위상차가 된다. 인터리빙에 의한 위상차이를 고려하였을 때, [1]에서 제안된 결선 방법에 의해 f_c 주파수의 역상분 전압에 대해 (5)가 성립한다.

$$\begin{cases} V_{a1} = V_{as1} - V_{bs2} = V_{h,n} \cos(\omega_{h,n}t) - V_{h,n} \cos(\omega_{h,n}t) = 0 \\ V_{b1} = V_{bs2} - V_{cs3} = V_{h,n} \cos(\omega_{h,n}t) - V_{h,n} \cos(\omega_{h,n}t) = 0 \\ V_{c1} = V_{cs3} - V_{as1} = V_{h,n} \cos(\omega_{h,n}t) - V_{h,n} \cos(\omega_{h,n}t) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

따라서 [1]에서 제안된 결선 방식을 통해 f_c 주파수에서 역상분 고조파 전류를 제거할 수 있다.

3. 새로운 결선 방법의 커먼-모드 필터

2.3절에서 알아보았듯이 [1]은 전압고조파의 위상이 동일하다는 원리를 이용하여, f_c 주파수에서 권선 전압의 역상분 전압 고조파를 제거할 수 있었다. 전압 고조파의 위상이 동일하다는 원리를 이용하므로 커먼 모드 필터를 이용하여도 동일한 고조파 전류들을 저감할 수 있다. f_c 주파수 대역에서 정상분 고조파를 저감하는 커먼 모드 필터 구조를 그림 2와 같이 생각할 수 있다. 커먼 모드 필터의 결선을 그림 2와 같이 연결함으로써 기본과 성분에 대해서는 작은 임피던스를 제공하고 f_c 주파수 대역에서는 효과적으로 정상분 고조파를 저감할 수 있다.

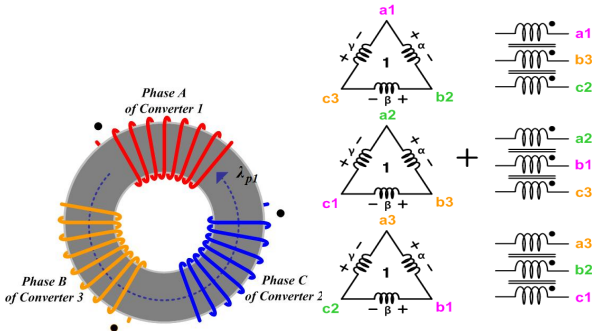


그림 2 제안된 커먼 모드 필터

그림 3 제안된 커먼 모드 필터의 연결 방법

그림 3과 같이 나머지 2개의 커먼 모드 필터에는 각각 컨버터 2의 A상, 컨버터 1의 B상, 컨버터 3의 C상과 컨버터 3의 A상, 컨버터 2의 B상, 컨버터 3의 C상이 연결된다. 참고문헌 [1]에서 제안된 삼중 델타 전원과 그림 3과 같은 커먼 모드 필터를 통해 f_c 주파수 대역에서 정상분 고조파 전류와 역상분 고조파 전류를 모두 저감할 수 있다.

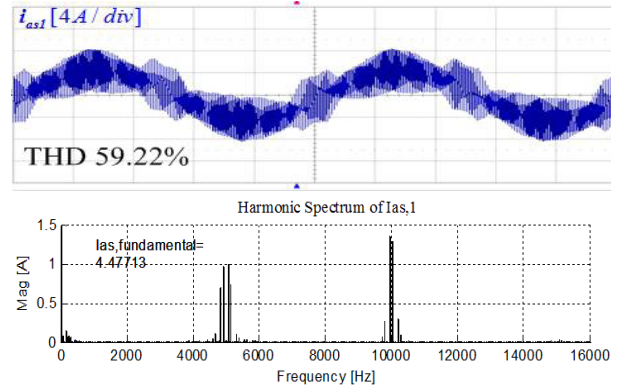
4. 실험 결과

분석의 유효성을 확인하기 위해 3개의 고정자 권선을 가지는 영구자석 동기전동기를 이용하여 실험을 하였다. 실험 조건은 표 1과 같다. 컨버터 2와 3의 캐리어는 컨버터 1에 비해 각각 $-2\pi/3, 2\pi/3$ 위상 차이가 되었다.

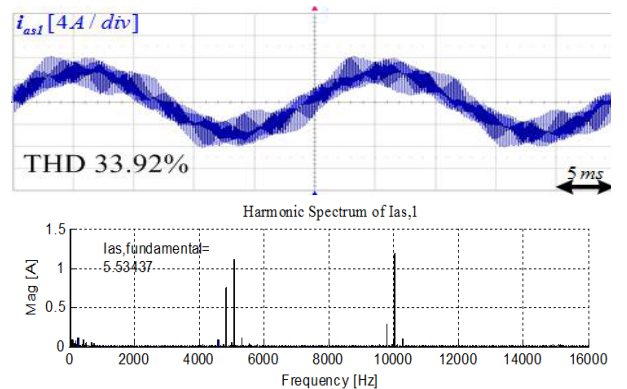
제작된 커먼 모드 필터의 상호 인덕턴스(L_{CM})의 값은 $1mH$, 모터의 인덕턴스(L_s)는 $2.15mH$, 캐리어 주파수(f_c)는 $5kHz$, 전기각주파수는($2\pi f_o$)는 $2\pi 40rad/s$ 이다. q 축 전류 지령 $5A$ 조건에서 실험하였다. 전동기 전류 제어를 위한 PWM 방법으로 SVPWM을 적용하였다.

각각의 경우에 대한 컨버터 측 전류와 그 FFT결과는 다음과 같다. THD는 [1]의 결선방법의 경우 43% 감소하였다. FFT로부터 특정 고조파 성분이 완전히 사라진 것을 알 수 있다. 제안된 커먼모드 필터까지 추가된 경우 FFT상에서 나머지 고조파성분도 저감되어 THD가 93% 감소한다.

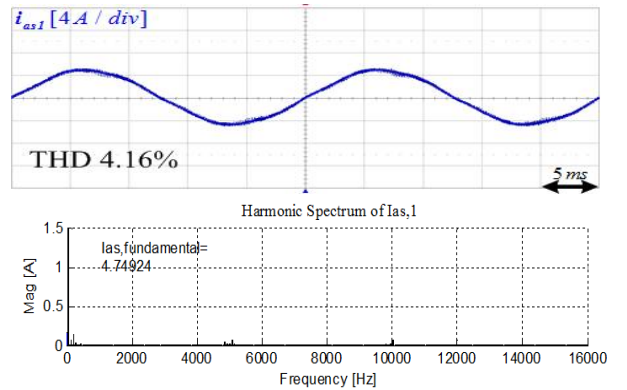
4.1 일반적인 결선



4.2 삼중 델타 결선



4.3 삼중 델타 결선과 제안된 커먼-모드 필터 결선



5. 결론

본 논문에서는 [1]에서 제안된 삼중 델타 전원 연결이 저감하는 전압고조파를 분석하였다. PWM이 만드는 전압 고조파 성분에 정상분, 역상분, 영상분이 있음을 보이고, [1]의 방법이 반송파 주파수 대역에서 역상분 전압고조파를 상쇄할 수 있음을 보였다. 이를 토대로 반송파 주파수 대역에서 정상분 전압 고조파를 저감할 수 있는 커먼 모드 필터를 제안하였다. 실험을 통해 제안된 필터의 유효성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 온성재, 박용순, 설승기, "멀티레벨 운전을 위한 4권선 변압기의 삼중 델타 전원 연결", 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집, 2014.11, 48~49p
- [2] D. G. Holmes and T. A. Lipo, "PulseWidth Modulation for Power Converters: principles and practice" New Jersey, U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 99 104.