

전력변환장치의 고조파 영향 및 연구동향

조성준, 김태완, 우명호, 서광덕
현대중공업(주) 기전연구소

Harmonic Effects and Consideration in Power Converter and Component

Sung-Joon Cho, Tae-Wan Kim, Myung-Ho Woo, Kwang-Duk Seo
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

Power electronic converters generate the harmonic voltage and current, and these harmonics have the harmful effects on the various components. For example, passive components such as capacitor and inductor, transformer, motor and other components are mainly affected in the power electronic system. Thus, the design and manufacturing of the power converters, which have the harmonic-free or mitigation strategies, are required. In particular, the lifetime and durability of these components are main requirement for enhancing the overall stability of the system. So, in this paper, the harmonics-related problems to the neighbouring components and mitigation research trends are presented.

1. 서론

최근 전력변환장치의 사용이 급증하면서 그 사용의 유용함에 반하여 문제점으로 두각되고 있는 것이 바로 전력변환장치로부터 발생하는 고조파에 의한 영향이다. 전력변환장치의 고조파에 의한 영향으로서 입력과 관계하는 계통이나 주변기기에 영향을 주는 것도 문제가 되지만, 전력변환장치 내부 또는 부하, 즉 캐패시터, 인덕터, 변압기, 전동기, 그 외 기타 소자 또는 기기 등에도 상당한 영향을 준다^[1]. 고조파 발생의 원인은 전력변환장치의 비선형적인 동작이 주원인이 되고 있으며, 이러한 비선형적인 동작은 다양한 주파수 성분의 고조파를 만들어 낸다. 주로 저차의 고조파가 계통에 영향을 주며, 고차의 고조파는 필터를 통해 제거하는 것이 일반적이다. 하지만 그 필터 역시 고조파에 의하여 영향을 받는 대상이 되는 것은 피할 수 없다. 본

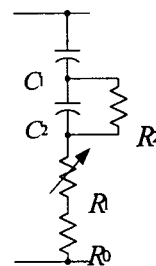
논문에서는 주로 전력변환기기 자체와 전력변환기기의 사용대상인 부하 또는 기기가 받는 고조파의 영향과, 현재 산업현장에서 발생되고 있는 현상과 대처방안 그리고 연구동향을 간략히 다룰 것이다.

2. 고조파의 영향

2.1 캐패시터

캐패시터(콘덴서)는 주로 DC평활용과 AC 라인 필터용 그리고 정현파 필터용 등으로 사용되고 있다. 다이오드 또는 싸이리스터 정류기 등과 같은 장치에서는 주로 120Hz, 360Hz 등의 리플 저감용으로 사용되고 있으며, 컨버터와 인버터사이에는 고조파 리플제거 및 decoupling용으로 사용된다. 또한 정현파 전압을 공급하는 경우에는 인덕터와 함께 저역통과(lowpass)필터로써 사용되며, 인버터 출력의 dv/dt 억제용 등으로도 사용되고 있다. 이의 전력변환장치에는 다양한 용도로 캐패시터가 사용되고 있으며 그 종류도 매우 다양하다. 현재 전력변환장치에 많이 사용되는 캐패시터는 주로 알미늄 전해 캐패시터(aluminum electrolytic capacitor)와 필름 콘덴서 등이 쓰이고 있다. 이중 알미늄 전해 캐패시터는 다음과 같은 단점이 있다^[2].

- 1) 온도 및 주파수 특성이 좋지않다.



Where,

R_0 : Resistance of Foil, Tabs, and Terminals

R_1 : Resistance of Electrolyte

R_2 : Dielectric Loss Resistance

C_1 : Terminal Capacitance

C_2 : Dielectric Loss Capacitance

그림 1 캐패시터의 등가 회로

Fig. 1 The equivalent circuit of capacitor

- 2) 고온에서 수명이 현저히 감소한다.
- 3) 손실이 높고 리플전류 제한이 심하다.
- 4) 전해액 증기가 분출하여 폭발의 위험이 있다.
- 5) 가연성재료가 사용된다.

이는 전력변환장치에 적용시 매우 큰 단점으로 작용하기 때문에 이에 대한 고려가 반드시 필요하다.

캐패시터의 고조파에 대한 영향은 대부분이 열 발생을 초래한다는 것이며, 그 발열은 바로 수명에 직접적으로 영향을 미친다. 즉 주변온도 10°C 상승은 캐패시터의 수명을 반감시킨다고 말할 수 있을 정도로 그 영향은 상당하다. 고조파와 캐패시터의 관계에 있어서 많은 연구가 진행되었으며, 그 중 캐패시터의 ESR(Equivalent Series Resistance)에 대한 고조파 및 발열과의 관계가 많은 논문에서 발표되었다^[3]. 그림 1에 캐패시터의 등가회로를 나타내었으며 수식 (1)에 ESR을 나타내었다.

$$ESR = \frac{R_2}{1 + (2\pi f)^2 C^2 R^2} + R_1 + R_0 \quad (1)$$

그 결과에 따르면 알미늄 전해 캐패시터의 경우는 리플전류의 주파수가 증가함에 따라 ESR이 줄어들며 1kHz정도 이상에서는 그 변화가 매우 적은 것으로 드러나고 있다. 그림 2에 ESR과 주파수의 관계를 나타내었다. 물론 캐패시터 종류에 따라 그 특성은 다르지만 ESR의 추이는 비슷하다. 리플전류의 영향은 유전체의 열화를 촉진시키며 전해질을 변질시키고 전도도를 저하시킨다. 이는 ESR을 증대시키며 결국 온도상승으로 이어진다. 서지 전압의 반복은 유전체에 지속적인 스트레스를 주기 때문에 유전체가 파괴되기 쉬워지고 절연저항도 감소된다.

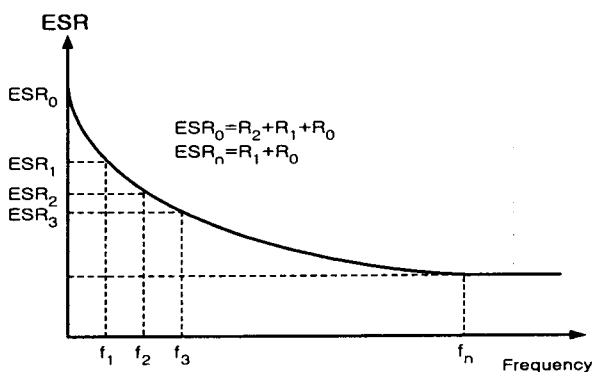


그림 2 주파수에 대한 전해 캐패시터 ESR의 추이
Fig. 2 The variation of electrolytic capacitor ESR with frequency

최근 캐패시터 제조사들은 알미늄 전해 캐패시터의 여러 가지 단점들로 인해 리플에 강한 증착필름 캐패시터를 개발하여 판매하고 있다. 현재 알미늄 전해 캐패시터에 비해 가격이 높지만 리플전류에 대해 가장 안정된 캐패시터로 입증되어 지속적인 기술개발이 진행되고 있으며 추후 전해 캐패시터를 대체할 것으로 예상된다. 이에 부가하여 리플전류를 최소화하는 스위칭 기법이나 제어방식, 그리고 Active filter 등이 개발, 또는 진행중에 있다.

2.2 인덕터와 변압기

인덕터(inductor)는 DC에 대해서는 단락이지만 교류에 대해서는 그 주파수에 비례하여 임피던스를 가지게 된다. 이런 특성은 전력변환장치에서 발생하는 고조파를 제거하는데 매우 적절하다. 변압기의 경우도 인덕터와 유사한 임피던스를 가지며 전력변환장치에서 입출력을 위해 자주 사용되고 있다. 또한 스위칭주파수의 증대로 고주파수 변압기의 사용과 변압기에 인덕터를 함께 제작한 고 임피던스 변압기의 사용이 증가하고 있는 추세다.

전력변환장치에 적용되는 인덕터나 변압기에서 고조파에 의한 영향으로 대표적인 것 또한 발열의 증가이다. 즉 표피효과와 근접효과에 의한 저항손의 증가는 열발생에 직접적으로 영향을 주게 된다. 이는 인덕터나 변압기에 국한되는 것은 아니며, 전력 케이블 및 모터의 권선에도 같은 영향을 주게 된다. 전류 고조파는 동손(copper loss)과 표유 자속 손실(stray flux loss)을, 전압 고조파는 철손을 증가시킨다. 이는 주파수에 비례하여 증가하고 열발생의 직접적인 원인이 된다. 특히 권선이나 코어등에서 발생하는 표유 자속 손실의 결과, 즉 eddy-current loss에 의한 발열은 전류의 제곱과 주파수의 제곱에 비례하여 증가한다. 다시 말하면 고조파가 발생하는 전력변환장치에서 기존 인덕터나 변압기를 적용시키기 위해서는 그 부피가 매우 커져야 하는 것이다. 하지만 소형화가 필수적인 현재의 추세에서는 그에 적절한 연구와 설계가 이루어져야 한다. 또한 권선이나 코어의 재질 개발도 동시에 이루어져야 할 것이다. 현재 현장 적용된 전력변환장치의 인덕터나 변압기는 매우 고온에서 사용되고 있으며, 그로 인한 열화로 수명이 감소되고 있을 뿐만 아니라 절연저항의 감소로 소손되는 경우도 종종 발생하고 있다. 또한 고조파는 코일의 해당 주파수의 진동을 일으켜서 소음을 증가시키는 환경적인 문제를 일으킨다. 현재 전력변환장치에 있어서 인덕터나 변압기는 다소 큰 중량과 부피를 차지하고 있기 때문에 소형화를 위한 많은 연구와 노력이 필요하다.

2.3 전동기

전동기의 경우도 인덕터나 변압기의 경우와 유사하여 고조파에 의한 철손 및 동손으로 발열량이 증가하는 것이 큰 문제점으로 대두되고 있다. 또한 고조파는 모터의 효율을 감소시킬 뿐만 아니라 토크(torque)에도 영향을 준다.

최근 인버터를 이용한 전동기 구동장치가 상용화되어 현장에 적용됨에 따라서 고조파와 관련된 연구가 더욱 활발해지고 있다. 그 이유는 인버터의 사용으로 발생하는 고조파로 인하여 기존 전동기의 수명감소 및 소손을 불러오고 있으며 운전의 문제점도 일으키고 있기 때문이다. 인버터를 사용한 전동기 구동에 있어서 고조파로 인한 주된 문제는 다음과 같다.

- 1) 전동기의 과열
- 2) 맥동토크 발생
- 3) 서지성 전압의 반복으로 인한 전동기의 소손
- 4) 커먼모드(common mode)전압에 의한 전동기 누설전류 발생 및 절연파괴

5차와 7차, 11차와 13차 등과 같은 한 쌍의 고조파 성분은 기본 주파수의 자속성분과 상호작용하여 6차, 12차 등의 맥동토크를 발생시키며 이는 기계적인 공진을 유발시키는 요소로 작용한다. 이 뿐만 아니라 고조파 성분은 고정자 권선의 발열을 증가시켜 열화를 발생시키고 절연저항을 감소시킨다.

인버터의 입력은 주로 정류기 또는 컨버터가 주로 사용되며, 특히 단상전원을 사용하는 경우 전원 전압의 2배 주파수로 DC링크전압이 맥동을 하게 된다. 이때 인버터 운전주파수가 증가하여 맥동 성분과 유사한 주파수로 운전하는 경우 인버터 주파수와 맥동성분 주파수의 차이에 해당하는 저주파 공진과 큰 저주파 전류를 발생시킨다. 이러한 Beating현상은 저주파 맥동토크의 원인이 되고 전동기의 고정자 권선에 큰 전류를 발생시켜 전동기의 수명을 단축시킨다. 물론 이와 관련된 제어방법이 연구되어 왔으며 일부에서 적용되고 있다^[4].

표 1 일본 및 미국의 전동기 입력전압 크기와 전압상승시간 규제

Table 1 The standard of peak voltage at motor terminals in Japan and USA.

일본 전기공업회 적용지침	미국 NEMA MG1 part-30 (범용 전동기)	미국 NEMA MG1 part-31 (인버터 용 전동기)
Vmotor<850V (단 440V이하 인버터)	1) 600V이하 전동기 Vpeak<1000V rise time>2us 2) 600V이상 전동기 Vpeak<2.5p.u rise time>2us	1) 600V이하 전동기 Vpeak<1600V rise time>0.1us 2) 600V이상 전동기 Vpeak<2.5p.u rise time>0.1us

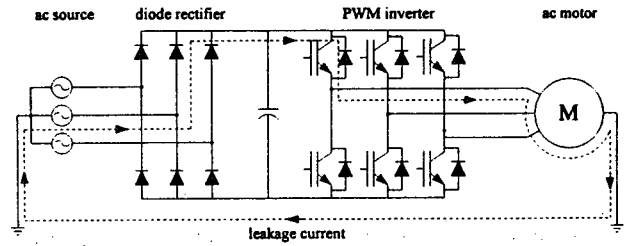


그림 3 전동기의 누설전류 경로

Fig. 3 The leakage current path of motor drive system

인버터출력과 전동기가 직접 연결되는 경우에 있어서 스위칭에 의한 서지성 전압, 즉 과도한 dv/dt의 발생은 전동기의 절연파괴를 초래한다. 이는 스위칭소자가 고속의 스위칭을 할수록 그리고 인버터와 전동기사이의 케이블 길이가 길수록 전압반사 현상에 의한 dv/dt가 크게 나타나며 최대 인가전압의 2배까지 나타날 수 있다. 표 1에 일본 및 미국의 관련 규제사항을 나타내었다. 이러한 경우에는 서지전압 억제용 필터를 사용하거나 dv/dt를 줄이기 위한 필터를 적용하는 방법이 있으며, 스위칭시 출력전압 상승시간을 제한하는 등의 스위칭 방법도 연구되어 있다^{[5][6][7]}.

이외에 최근 들어 연구가 활발히 진행되고 있는 분야는 전동기의 커먼모드 전압에 의한 전동기 축전압 및 베어링전류의 발생과 전동기 절연파괴 현상 그리고 그로 인한 전자파장에 관련분야이다^[8]. 전동기의 커먼모드 전압은 고정자 권선의 중성점과 접지점 사이의 전압차를 말한다. PWM컨버터와 인버터를 사용할 경우 두 장치의 스위칭 주파수와 제어 주기에 따라 최대 DC링크전압이 커먼모드 전압으로 나타날 수 있다. 커먼모드 전압은 전동기의 축전압 및 베어링 전류를 발생시켜 베어링을 손상시킬 뿐만 아니라 입력전원과 전동기 사이에 누설 전류를 발생시킨다. 그림 3에 전동기 누설전류 경로를 나타내었다. 또한 주변기기에 전자파 장애를 일으킬 수 있으며 제어기의 오동작을 유발하기도 한다. 이러한 커먼모드 전압과 누설전류를 저감시키기 위해 전동기 중성점과 입력 전원의 중성점, 전동기 축등을 접지시키는 방법이 연구되어 왔다^[9]. 또한 커먼모드 전압의 발생 자체를 억제하기 위해 컨버터와 인버터의 스위칭 주파수와 제어 주기를 일치시키는 방법과 PWM 스위칭 알고리즘에 의해 커먼 모드 전압의 크기를 줄이는 방법등이 연구되어 왔다^{[10][11]}.

위에서 언급한 대부분의 문제들은 전동기의 열화와 절연파괴의 직접적인 원인으로 작용하고 있고 현장에서 실제 나타나고 있으며, 이와 관련한 전동기 설계 및 각종 대책에 대한 연구가 진행되고 있

다.

2.4 그 외 기기 및 소자

위에서 언급한 소자나 기기 이외에도 전력변환장치에서 고조파의 영향을 받는 기기와 부품으로는 측정용 기기와 장비, 그리고 각종 계전기와 차단기 등을 들 수 있으며, 부스바(busbar)와 같이 악영향을 줄 수 있는 부품도 있다. 부스바의 기생 인덕턴스(Stray Inductance)는 스위칭시 높은 서지전압을 발생시켜 스위칭 소자 및 캐패시터 등에 악영향을 미칠 뿐만 아니라, 스위칭 소자의 열을 DC링크 캐패시터에 전달하여 캐패시터의 단자에 열을 증가시키기도 한다.

측정기기에 있어서는 기존 가동철편 방식의 전압 및 전류계 등에 고조파가 입력되면 측정값이 정확하지 못할 뿐만 아니라 코일에 발열을 증가시키기도 한다. 디지털 멀티미터와 같은 기타 측정장비 역시 고조파에 의해 정확한 측정이 이루어지지 않기 때문에 그에 적절한 장비나 측정방법을 사용하여야 한다.

각종차단기나 계전기 등에서도 고조파는 내부 코일에 발열을 증가시키며 정상상태 전류정격을 감소시키고 부품의 열화로 수명을 감소시킨다. 또한 보호계전기의 오동작을 유발시킬 수 있다. 그러므로 고조파를 포함한 전압 및 전류를 고려한 용량산정이 필요하며, 고조파 필터의 사용도 충분히 검토하여야 한다. 최근에는 전력변환장치의 제어가 디지털화됨에 따라 각종 측정기기를 대치하고 있으나 고조파를 고려한 측정방법을 사용하지 않으면 Aliasing 오차와 같은 샘플링 오차를 발생시켜 측정오차가 생길 뿐만 아니라 제어의 안정성도 저하시키며 공진을 유발하기도 한다.

이 외에도 많은 부품과 기기들이 고조파에 의한 영향을 받을 수 있으며 예측하지 못한 다양한 문제를 일으킬 수 있기 때문에 다양한 분야에서의 연구가 필요할 것이다.

3. 결 론

본 논문은 전력변환장치에서 발생하는 고조파가 장치내의 수동소자 및 그 외 기기 등에 미치는 영향에 대해서 간략히 다루었다. 이외에도 전력변환장치의 비선형적인 동작에 의한 다수의 문제점이 대두되고 있으며 고조파의 영향과 함께 병행하여 연구가 진행되고 있다. 현재 고조파와 관련된 연구가 매우 활발히 진행되고 있으며 다수의 연구결과가 발표되고 있지만, 현장의 인식부족 및 적용의 한계 그리고 관련 소재개발 및 제조기술의 부족과 가격적인 문제로 인하여 그 연구결과가 연구 자체

만으로 그치는 경우도 있다. 그러므로 고조파와 관련된 지속적인 연구 및 지원뿐만 아니라 현장과의 접목으로 앞으로의 전력변환장치의 소형화와 신뢰성 향상에 노력하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems," IEEE Std. 519-1992.
- [2] Nichicon Corporation, "Technical Notes on Aluminum Electrolytic Capacitor," Kyoto, Japan, 1993.
- [3] K. Harada, A. Katsuki, and M. Fujiwara, "Use of ESR for Deterioration Diagnosis of Electrolytic Capacitor," IEEE *Trans. Power Electronics*, Vol. 8, No. 4, Oct. 1993.
- [4] Z. Salam, C.J. Goodman, "Compensation of Fluctuating DC Link Voltage for Traction Inverter Drive", IEE *Power Electronics and Variable Speed Drives*, pp. 390~395, 1996.
- [5] Annette von Jouanne, D.A. Rendusara, "Filtering Techniques to Minimize the Effect of Long Motor Leads on PWM Inverter-Fed AC Motor Drive Systems", IEEE *Trans. Industry Applications*, Vol. 32, No. 4, pp. 919~926, 1996.
- [6] Paul T. Finlayson, "Output Filters for PWM Drives with Induction Motors," IEEE *Industry Applications Magazine*, Jan/Feb, pp.46-52, 1998.
- [7] S. Ogasawara, H. Ayano, and H. Akagi, "An Active Circuit for Cancellation Common-Mode Voltage Generated by a PWM Inverter," IEEE *Trans. Power Electronics*, Vol. 13, No. 5, Sep. pp. 835~841, 1998.
- [8] G. Oriti, A. L. Julian, and T. A. Lipo, "An Inverter/Motor Drive with Common Mode Voltage Elimination," IEEE *IAS Annual Meeting*, pp. 587~592, 1997.
- [9] Fei Wang, "Motor Shaft Voltages and Bearing Currents and Their Reduction in Multilevel Medium-Voltage PWM Voltage-Source-Inverter Drive Applications", IEEE *Trans. Industry Applications*, Vol. 36, No. 5, pp. 1336~1341, 2000.
- [10] M. Cacciato, A. Consoli, G. Scacella, and A. Testa, "Reduction of Common-Mode Currents in PWM Inverter Motor Drives," IEEE *Trans. Industry Applications*, Vol. 35, No. 2, pp. 469~476, Mar./Apr. 1999.
- [11] D. Rendusara and P. Enjeti, "An Improved Output Filter Configuration Reduces Common and Differential Mode dv/dt at the Motor Terminals in PWM Drive Systems," IEEE *Power Electronics*, Vol. 13, No. 6, pp. 1135~1143, Nov. 1998.