

전력기기의 고조파 발생원인과 영향 및 특성 ①

글/ 김 응 상 한국전기연구원



목 차

- 1. 서론
- 2. 고조파
 - 2.1 고조파 발생 원인
 - 2.1.1 컨버터
 - 2.1.2 아크로
 - 2.2 고조파에 의한 영향
 - 2.2.1 개요
 - 2.2.2 전동기와 발전기
- 2.3 고조파 측정
 - 2.2.1 측정
 - 2.2.2 측정기준
- 3. 결론

1. 서론

지금까지의 전력공급은 전력회사의 확실적인 품질과 요금체제로 수용가에 공급되어 왔으며, 신뢰도 또한 30분 평균치의 개념으로 적용되어 왔으며 전기사용의 변화 및 사회환경의 변화로 인해 전기품질의 변동에 따른 영향이 과거와는 다른 양상을 보이고 있다. 즉, 극히 짧은 시간 동안의 전기품질 저하에도 전기사용 기기가 민감하게 작용하여 공장의 생산활동 장애, 정보통신 기기의 장애로 인한 정보흐름의 단절 등으로 기회비용이 막대하게 증가하고 있으며, 이러한 비용은 앞으로도 계속 증가 할 것으로 예상되고 있다.

이처럼 전기품질의 저하현상은 오늘날의 사회·경제활동에 막대한 지장을 초래하여 수년 전부터 선진국들은 이를 극복하기 위한 첨단 전력 기기 개발과 아울러 이를 수용가에 가장 인접해 있는 배전계통에 도입하여 배전계통을 새롭게 구성함으로써 신뢰성이 높은 전력공급 체제를 구축하고 이를 통해 고품질의 전력을 수용가에 공급하고자 하는 노력을 계속해오고 있다. 여기에 수용가가 요구하는 전기품질의 우선 순위도 업종에 따라 정전, 전압, 고조파, 플리커, 요금 등등으로 다양하게 변화되고 있어 전기 품질을 차등화 하여 공급할 수 있는 체제를 요구하기에 이르렀다. 또한 전력산업의 구조개편이 완료되면 전력은 품질과 양 모두가 상품으로서 가치를 가지게 될 것이며, 이러한 시점에서 본

고에서는 산업현장에서 빈번히 발생될 수 있고 정확한 측정에 의한 실측데이터는 충분히 확보되지는 않았지만 많은 악영향을 미치고 있다고 하는 고조파에 대해 발생원인, 미치는 영향 및 측정방법에 대한 국내외의 관련 자료를 조사하고 분석하여 보고함으로써 이 분야 더욱더 관심을 고조시키고 문제해결에 조금이나마 보탬이 되고자 관련자료 수집, 분석 및 대응책을 제안하고자 한다.

2. 고조파

2.1 고조파 발생 원인

● IEEE Std. 519-1992

IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems

2.1.1 Converters

“이상적(ideal)”이란 말은 AC 시스템에 영향을 주는 인덕턴스를 무시함으로써 회로를 간략화 함을 의미한다.

(1) 이상적인 전압 파형

그림 5는 브리지 정류기에 전원을 공급하는 3상 전원 시스템을 나타낸다. 이때 인덕턴스를 무시하고 무부하 상태를 가정한다면 직류부하 회로에는 그림 6에 보여지는 것과 같이 브리지 정류회로의 출력전압인 최대 순간 전압이 나타나게 된다.

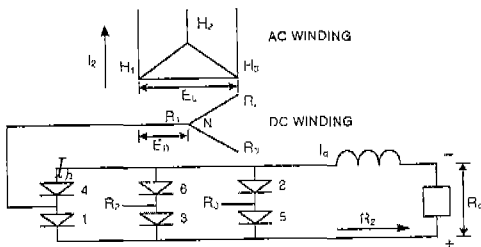


그림 5 3상 브리지 정류 회로

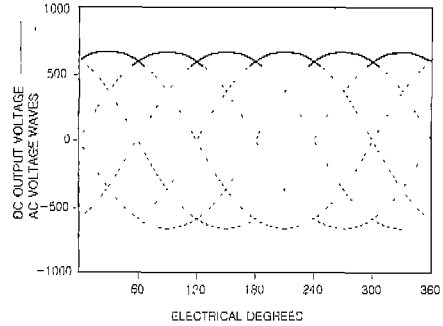


그림 6 이상적인 정류기 출력 파형

(2) 이상적인 전류 파형

그림 7은 브리지 정류기의 이상적인 AC 전류 파형을 보여준다. 이러한 형태는 직류전류는 유도성 부하가 없다는 가정 하에 리플이 없고, 직류전류가 한 상에서 다른 상으로 전달될 때 들어오는 상의 순간적인 전압이 나가는 쪽 상의 전압보다는 크다는 가정 하에 나타난다. AC 전류 파형의 고조파 전류성분은 아래와 같다.

$$h = kq \pm 1 \quad (4.1)$$

$$I_h = \frac{I_h}{h} \quad (4.2)$$

여기서, h : 고조파의 차수

k : 양의 정수

q : 정류회로의 펄스 수

I_h : h 차 고조파 전류의 크기

I_1 : 기본파 전류의 크기

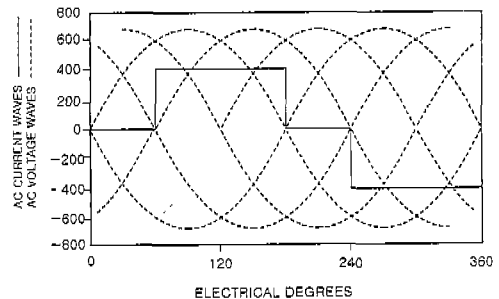


그림 7 이상적인 AC 전류 파형

2.1.2 아크로(Arc Furnaces)

철을 생산하기 위해 사용되는 아크로에 의해 발생하는 고조파는 가공하는 철의 종류에 따라

아크의 사이클 변화가 발생하므로 그것을 예측하기가 매우 어렵다. 이러한 아크전류는 비 주기성을 띄며, 그것을 분석해 보면 정수 및 비 정수 차수의 고조파 주파수를 가진 연속적인 스펙트럼을 발견할 수 있다. 그러나, 고조파 측정은 비 정수 차수의 고조파 보다 훨씬 지배적인 정수 차수의 고조파, 그 중에서도 특히 낮은 차수인 2차에서 시작하여 7차 고조파를 측정하여 왔으며, 그 크기에 있어서는 차수에 따라 줄어듦을 보여왔다. 금속 주조방식의 로(furnaces)의 발달은 아크를 더욱 안정된 상태를 가져오며, 전류는 기준 축(zero-axis)을 중심으로 대칭을 이룸으로써 짝수 차수와 비 정수 차수의 고조파는 제거된다.

2.1.3 정지형 무효전력 보상기 (Static Var Compensator)

TCR(Thyristor Controlled Reactor)은 배전계통의 전기 아크로를 위한 정지형 병렬 보상기(Static shunt Compensator)뿐만 아니라 전압강하 보상을 통한 전압레벨의 유지 및 플리커의 저감, 역률 개선, 상 불평형의 개선, 전력시스템의 안정도 향상과 같은 다양한 분야에 광범위하게 사용되고 있다.

그림 5는 전형적인 TCR의 개략적인 회로도이며 리액터에 흐르는 전류는 전압에 비해 약 90° 정도 뒤진다. 전파전류(full conduction current)는 정현파로 나타나지만 사이리스터의 게이트 동작의 지연은 전류의 크기를 감소할 뿐 아니라 파형을 변화시킨다. 부분적인 전도에 의해 발생하는 고조파 전류는 만약 게이트의 점화각이 쌍을 이루는 두 개의 사이리스터에 의해 균형을 이룬다면 모두 홀수 차수로 나타나며 각 고조파의 실효치는 4.3식과 같다.

$$I_h = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V}{X} \left[\frac{\sin(h+1)\alpha}{2(h+1)} + \frac{\sin(h-1)\alpha}{2(h-1)} + \cos\alpha \frac{\sinh \alpha}{h} \right] \quad (4.3)$$

여기서, $h=3, 5, 7, \dots$

V =line-to-line fundamental

voltage

X =total inductive reactance of reactors each phase

α =advance angel

2.1.4 Inverters for Dispersed Generation

최근 재생에너지 및 대체에너지원의 출현은 전력시스템에 연계운전을 위한 인버터나 Power conditioner와 같은 새로운 형태의 설비를 사용하게 되었으며, 이러한 인버터 설비들은 단상 및 3상에서의 적용이 가능하다. 그러나, 이런 형태의 새로운 설비들의 출력은 역률 1에 가까운 정현파 일수도 있지만 전력계통에서 부적합한 전력품질을 초래하거나 전력계통의 제어 및 보호계전을 방해할 수 있는 다양한 특성(characteristic)뿐 아니라 비 특성(non-characteristic) 고조파를 포함할 수도 있다.

이러한 인버터는 전력계통에 연계된 전류원이거나 직렬임피던스와 함께 전압원으로 동작할 수 있으며 인버터의 전력계통 연계시 인버터와 전력계통 사이의 전류를 제한하기 위해 보통 인덕턴스와 같은 직렬임피던스를 삽입하여 사용한다. 전력계통에 연계 운전되는 인버터는 그 동작특성에 따라 다양한 형태로 나타날 수 있으며, 다음은 그러한 인버터의 몇 가지 형태를 나타낸다.

- ▶ Line commutated
- ▶ Pulse with modulated
- ▶ Self-commutated high-frequency link
- ▶ Self-commutated programmed pulse switching amplifier

(1) 단상 인버터(Single-Phase Inverters)

분산형 전원을 위한 단상 인버터의 정격은 보통 10(kW)이하이며, 그 수가 적을 경우에 전력계통에 큰 문제를 일으키지 않는다. 그러나 인버터의 사용이 증가함에 따라 같은 피더에 다

수의 인버터가 연계된다면 인버터에 의한 고조파의 증가에 의해 여러 가지 문제가 발생할 후 있으므로 이에 대한 대책이 필요하다.

(2) 3상 인버터(Three-Phase Inverters)

분산형 전원을 위한 3상 인버터의 정격은 일반적으로 10[kW]에서 1[MW]정도이며, 만약 인버터의 출력 파형에 많은 고조파가 함유되어 있다면 인버터가 설치된 근방에서는 전력계통에 부적합한 파형을 초래할 수 있다. 3상 인버터는 단상 인버터와 같이 line-commutated와 self-commutated 형태가 있으며, 또한 단상 인버터와 같이 출력 고조파는 많은 변수들에 의해 좌우된다. 인버터를 위한 DC 동작 전압레벨은 최근 재생에너지원을 위해 넓은 범위까지 변화하고 있으며, 이러한 변화는 날씨, 낮 시간, 온도, tracking algorithm, collector의 노화 뿐 아니라 다른 여러 가지 제어하기 힘든 요소들에 의해 좌우된다. 또한 AC 전력계통은 인버터의 출력에 바람직하지 않은 영향을 줄 수 있으면 전력계통의 고조파, 전압의 불평형, 불균등한 상의 분리, AC전압의 과전압과 저전압, 선로 임피던스와 같은 변수들은 인버터의 출력 고조파에 영향을 주는 몇몇 변수들에 속한다.

2.1.5 Electronic Phase Control

부하에 공급되는 전력의 제어를 위해 사용되는 사이리스터의 위상제어는 고조파 전류를 발생시킨다. 앞에서 논의된 TCR의 경우는 역률이 0일 때 전자제어의 한 특별한 경우이다. 100%에 가까운 역률을 갖는 열 부하들은 가끔씩 사이리스터의 위상제어에 의해 제어되며 파형과 크기는 0% 역률의 경우와 다르지만, 홀수 차수의 고조파는 여전히 발생한다. TCR의 적용을 제외하고는 일반적으로 부하는 순수한 인덕턴스 성분도 아니고 순수한 저항성분도 아니다. 따라서 일반적인 부하들은 0%나 100%가 아닌 그 사이의 역률 값을 가지며, 고조파의 최대 값도 또한 이러한 순수한 경우의 값 사이에 놓일 것이다.

2.1.6 Cyclo-converter Harmonics

Cyclo-converter Harmonics에 의한 고조파 전류는 Cyclo-converter의 주파수 비의 함수로 나타나므로 그 표현은 매우 복잡하게 나타난다. 4.4식은 고조파의 주파수를 나타내며, 첫 번째 항은 6-Pulse converter를 나타내고, 두 번째 항은 컨버터의 Sideband 특성 주파수를 나타낸다.

$$f_h = f_b(kq \pm 1) \pm 6nf_0 \quad (4.4)$$

여기서, f_h : the harmonic frequency imposed on the ac system

k, n : integers

f_0 : the output frequency of the cyclo-converter

2.1.7 Switch Mode Power Supplies

최근 전자설비들은 전력설비에 전압을 공급하기 위한 switch mode power supply를 사용한다. 이것은 전력시스템의 작은 전압변동에 영향을 받지 않는 경제적인 전원 공급방식으로 전자 회로에 전압을 공급하기 위해 캐패시터가 들어 있다. 전력시스템에서 보았을 때 부하는 캐패시터이므로, 전원공급장치의 전류는 반주기에서만 전류가 흐르는 불연속 형태의 전류가 흐른다.

2.1.8 Pulse width Modulated(PWM) Drive

DC link를 위한 PWM 방식은 다이오드 정류기만큼의 높은 역률을 갖는 점에서 다른 정지형 컨버터(Static Power Converter Circuit)와 다르다. 그러나 이것은 DC시스템과의 연계를 위해 전압을 조정하는 큰 캐패시터를 포함한다. 따라서 경 부하 시(30%-50%)전류는 단지 다이오드 정류기의 출력전압이 캐패시터의 전압보다 클 때만 흐르게 된다. 경 부하 시 AC회로의 전류는 불연속이며 그림 8은 이러한 파형을 나타낸다. 드라이브의 부하가 증가함에 따라 전류는 연속적으로 변화하며 전류가 불연속이 되는 점은 DC Link 인덕턴스의 크기에 의해 결정된다.

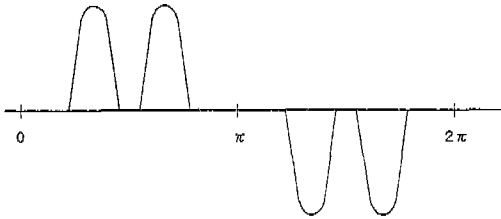


그림 8 경 부하 시 PWM 6-Pulse Power Supply의 전류 파형

2.2 고조파에 의한 영향

● IEEE Std. 519-1992

IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems

2.2.1 개요

어느 정도의 고조파까지 허용될 수 있는지는 부하(또는 전원)의 민감도(susceptibility)에 의해 결정된다. 가장 덜 민감한 설비의 종류는 오븐이나 용광로처럼 열을 내는 것이 주 기능인 것이다. 이 경우, 일반적으로 고조파 energy가 이용되고, 그러므로, 아주 완전하게 허용될 수 있다. 가장 민감한 설비의 종류는 완벽한 정현파를 기본 입력으로 하는 방식으로 설계되거나 구성된 것으로 통신설비나 데이터 처리 설비 등이 이 범주에 속한다. 전동기 부하의 고조파에 대한 민감도는 위의 두 극단적인 경우의 중간정

도이며 상대적으로 고조파에 대해 허용 범위가 크다고 할 수 있다.

그러나 가장 덜 민감한 설비의 경우라도, 고조파에 악영향을 받을 수 있다. 예를 들어, oven의 경우 고조파에 의해 전기적 절연체의 조기 노화의 원인인 dielectric thermal or voltage stress가 발생할 수 있다.

2.2.2 전동기와 발전기

고조파 전압 및 전류가 회전기(유도기와 동기기)에 미치는 영향의 대부분은 고조파 주파수에서 철손과 동손으로 인해 열이 증가된다는 것이다. 이렇게 고조파 성분은 기기의 효율을 떨어뜨리고 토크를 발생시킨다. 전동기에서는 고조파 전류로 인해 정현파 여자(sinusoidal excitation)와 비교해서 더 큰 소음이 발생할 수 있다. 또한 고조파로 인해 cogging(부드럽게 시작하는 것을 거부)이나 유도 전동기에서 crawling으로 부르는 현상이 발생할 수 있다.

제5차와 제7차의 고조파와 같은, 고조파 쌍들은 터빈-발전기 조합 또는 전동기-부하 시 기계적 진동을 일으킬 소지가 있다. 이러한 기계적 진동은 고조파 전류와 기본 주파수 자계(magnetic field) 사이의 상호작용에 의해 발생하는 진동 토크가 기계 공진 주파수를 여기할 때 발생한다.

아래 표는 6-pulse 컨버터로부터 유도된 특성 고조파 차수들을 정의하고, 회전기 단자에 적용될 때의 영향을 암시한다. 제 5차, 7차, 11차, 등의 각 고조파 전압은 기계의 고정자에서 상응하는 고조파 전류를 유발할 것이다. 이들 각 고조파는 총 전류의 정상 또는 영상 대칭 성분이다. 이 전류들은 고정자의 권선에서 추가적인 열을 유발하여 기본 전류에 의한 온도 상승에 추가되어 진다.

Harmonic Order	Frequency Hz	Sequence Network	Stator Harmonic	Harmonic Rotation	Rotor Harmonic
1	60	+	1	Forward	-
5	300	-	5	Backward	6
7	420	+	7	Forward	6
11	660	-	11	Backward	12
13	780	+	13	Forward	12
17	1020	-	17	Backward	18
19	1140	+	19	Forward	18
23	1380	-	23	Backward	24
25	1500	+	25	Forward	24

다음호에 계속됩니다