

## 교류 전기 아크로 시스템의 고조파 해석

\*민준기, \*이상훈, \*김재식, \*최재호, \*\*박태준, \*\*이왕하  
 (\*충북대학교, \*\*산업과학 기술 연구소)

### Harmonic Analysis in AC Electric Arc Furnace

\*Joonki Min, \*Sanghoon Lee, \*Jaesik Kim, \*Jaeho Choi, \*\*Taejoon Park, \*\*Wangha Lee  
 (\*Chungbuk National University, \*\*RIST)

**Abstract** - This paper discussed for harmonic analysis in AC electric arc furnace. The arc furnace system is designed by a harmonic current source with considering voltage stabilizer. In this paper, an adequate example is shown for the IEEE harmonic limits when a tuned filter is installed. The simulation established by HI\_WAVE of SKM.

치하는 경우가 많이 있으며, 고조파 해석을 할 때 이에 대해서도 고려해야 한다.

본 논문은 SKM사의 시뮬레이션 패키지 HI-WAVE를 이용하여 AC EAF 시스템의 고조파 해석을 수행하였다. 전압 안정기로서 TCR(Thyristor Controlled Reactor)을 포함 시켜 모델링을 하였으며, 이를 통해 참고문헌 [2]에서 제시된 고조파 규제에 대해 비교·검토하였다.

## 1. 서 론

AC EAF(Electric Arc Furnace)는 비선형·시변특성을 가지고 있는 가장 대표적인 전기부하이며, 이러한 특성으로 인해 PCC(Point of Common Coupling)에 접속되어 있는 인접한 부하에 악영향을 미치게 된다. 더욱이 현재 세계적인 철 소비량이 증가 추세에 있기 때문에 그 피해 정도 또한 계속해서 증가하고 있다.

AC EAF에 있어서 고조파와 플리커(Flicker)는 매우 중요한 문제점들이며, 이 중 고조파는 아크로 고유의 동작 특성으로 인해 일반적인 고조파원(harmonic source)과는 상당한 차이점을 가지고 있다. AC EAF에 의해 발생하는 고조파의 특징은 크게 다음과 같다.

- ① 짝수 고조파 존재
- ② 3의 배수 고조파 존재
- ③ 저차 고조파의 우세
- ④ Inter-harmonic 존재

여기서 ①번과 ②번의 경우 3상 AC EAF의 불평형 운전 및 퍼니스 변압기의 초기 유입전류(inrush current)에 기인한 것으로, 일반적인 고조파원의 홀수 고조파(예를 들어 5차, 7차)에 비해 저차수가 되기 때문에 큰 문제가 되고 있다.<sup>[1]</sup> 또한 AC EAF의 고차 고조파는 그 값이 매우 작기 때문에 무시할 수 있으며, 대부분이 10차 이하의 저차 고조파로 구성되어 있다.<sup>[2]</sup> ④번의 inter-harmonic은 비정수형 고조파(non-integer harmonic)를 의미하며, 주로 플리커에 의해 기존 고조파 주파수대의 측면고조파(sideband harmonics)로 나타나게 된다.<sup>[3]</sup>

따라서 이러한 고조파를 보상하기 위해서 적절한 보상을 설치해야 하며, 경제적인 문제로 인해 대부분이 수동필터를 사용하고 있다. 일반적으로 수동필터는 정지형 커패시터(Fixed Capacitor:FC)와 리액터의 직렬 연결된 간단한 구조를 가지고 있으며, 고조파의 보상 뿐만 아니라 무효전력의 보상도 가능하다. 그러나 수동필터의 경우 시스템과의 공진문제로 인해 오히려 고조파가 증폭되어 시스템의 손실 증가, 장비의 과열, 민감한 부하의 tripping과 같은 악영향을 미칠 수 있기 때문에 적용시 주의를 요한다.<sup>[4]</sup>

AC EAF 시스템에서 전압 안정기(Voltage Stabilizer)에 의해 또 다른 고조파가 발생 할 수 있다. 위에서 언급한 플리커의 보상을 위해 전력변환장치를 설

## 2. 본 론

### 2.1 아크로 시스템 모델링

그림 1에 일반적인 AC EAF 시스템의 등가회로도가 그려져 있다.

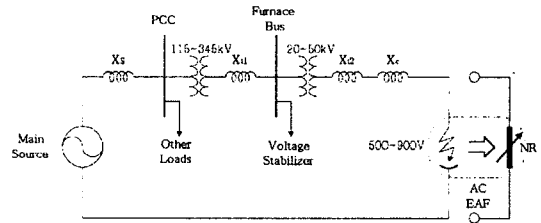


그림 1 일반적인 교류 아크로 시스템

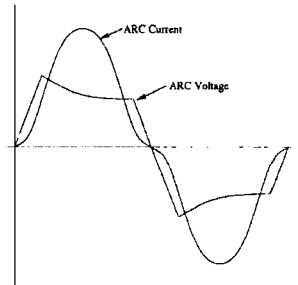


그림 2 교류 아크로의 전압·전류 파형

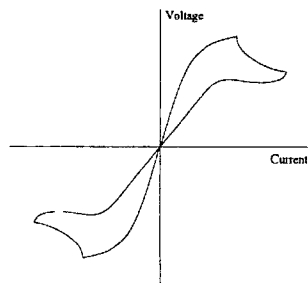


그림 3 교류 아크로의 전압·전류 특성

여기서  $X_S$ 는 전원의 등가 임피던스이며,  $X_{d1}$ ,  $X_{d2}$ 와 그리고  $X_C$ 는 각각 전원측 변압기와 아크로 변압기의 임피던스와 케이블 임피던스를 의미한다.<sup>[6]</sup> 그림에서 보는 바와 같이 아크로 동작시 발생하는 고조파 및 플리커 등에 인접한 부하도 영향을 받게 되므로 대부분의 퍼니스 버스(Furnace bus)에는 직렬 리액터나 TCR과 같은 보상기가 설치되어 있다.

그림 2와 3은 AC EAF에서 전압 전류의 순시 파형과, V-I 특성에 대한 전형적인 하나의 예를 보여주고 있으며, 아크 점화와 소호할 때의 특성을 알 수 있다. 그림과 같이 AC EAF의 전압 및 전류는 각각 비선형·시변 특성을 가지고 있기 때문에 정확한 모델링 매우 어렵다. AC EAF에서 이러한 특성이 나타나는 이유는 크게 3가지를 들 수 있다.

- ① 동작 조건(melting 또는 refining)에 따라 다른 특성을 가진다.
- ② 퍼니스 변압기의 탭 조절에 의한 전극봉 제어
- ③ 동작시 아크 길이의 변화

이러한 원인중 세 번째의 경우는 매우 불규칙적인 특성을 지니고 있기 때문에 이를 정확하게 구현한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 대부분의 기존 연구들은 그림 1의 우측 부분과 같이 아크로를 하나의 비선형 저항(Nonlinear Resistor:NR)으로 등가화 시켜 시스템 모델링을 구현하고 있으며, 이를 구하는 방법에 따라 다시 시간영역(Time Domain:TD)과 주파수 영역(Frequency Domain:FD)으로 구분 할 수 있다.<sup>[3],[5]</sup>

TD와 FD의 모델링은 각각의 장단점을 가지고 있기 때문에 시뮬레이션 목적에 따라 적절한 방법을 선택해야 한다. AC EAF의 고조파 해석은 주로 고조파 보상 및 그에 의한 무효전력 보상장치를 설치하기 위해 수행한다. 따라서 고조파 해석시 필요한 아크로의 모델링은 주파수 영역에서의 해석만으로도 충분하며, 이를 통해 하나의 고조파 전류원으로써 생각할 수 있다.

이러한 방법을 정확하게 수행하기 위해서는 장시간 실험된 자료를 기반으로 통계학적인 처리를 통해 고조파 표본을 정해야 하지만, 이는 산업체와의 유기적인 관계가 필요하며 실험 및 자료 처리 과정 또한 상당한 기술력이 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 IEEE Std에서 제시하고 있는 EAF의 고조파 모델을 사용하였으며, 그림 4에 전류 고조파 성분과 파형을 보이고 있다.<sup>[2]</sup> 서론에서 언급한 바와 같이 2차 고조파가 가장 우세하며, 3의 배수 고조파도 포함되어 있다.

그림 5는 일반적으로 AC EAF 시스템에서 전압 안정을 위해 설치하고 있는 TCR에 대한 모델이다.

### 2.3 아크로의 고조파 해석

AC EAF 시스템은 아크 임피던스가 매주기마다 불규칙적이기 때문에 저차 고조파들이 매우 우세하며, 불평형 동작으로 인해 짝수 및 3의 배수 고조파가 크게 나타난다. 따라서 정상상태에서 정상분만 취급하는 대부분의 고조파 연구와는 달리 역상분 및 영상분 고조파 성분을 고려해야만 한다.

IEEE에서 규제하고 있는 고조파 제한에 관한 사항을 표 1에 보이고 있다. 표에서  $I_L$ 와  $I_{SC}$ 는 각각 부하의 정격전류와 단락전류(short circuit current)를 의미한다. 이 표는 1992년 개정된 것으로 기존의 제한에 비해 짝수 고조파에 대한 규제가 강화되었다는 점이 가장 큰 특징으로, 짝수 고조파를 흡수 고조파의 25% 이하로 규제함으로써 계통으로 고조파 전류가 유입되지 않도록 하고 있다.

일반적으로 계통으로 원하지 않는 고조파 전류의 유입은 아래 둘 중 한가지 방법을 이용하여 막을 수 있다.

- 높은 직렬 임피던스를 사용한다.
- 낮은 임피던스의 shunt path를 설정하여 그들을 유도한다.

직렬 필터들은 정격 부하전류를 흘릴 수 있어야 하고 정격 선간 전압에 대한 절연을 확보하여야 한다. shunt 필터는 직렬 필터에 비해 소량의 전류만 흘릴 수 있으면 된다. 직렬 필터는 높은 비용을 요구하고 shunt 필터는 기본 주파수의 무효전력만 공급하면 된다. 따라서 대부분 실제적인 접근은 보통 shunt 필터를 사용한다.

대부분 일반적인 shunt 필터들은 single tuned filter와 HPF(High Pass Filter) 형태가 있다. 이러한 두 종류의 필터는 설계가 간단하고 적은 비용으로 적용이 가능하다. 그러나 이러한 shunt 필터들을 계통에 연결시 source 임피던스와 병렬로 연결되어 병렬 공진이 야기된다. 따라서 shunt 필터 설계후 필터의 성능뿐만 아닌 source와의 병렬 공진을 고려하여야 한다.

### 3. 시뮬레이션

그림 6에 시뮬레이션을 위한 단선도가 그려져 있다. 주 변압기는 154kV-22.9kV의 변압비를 가지며, 퍼니스 변압기는 22.9kV-700V의 변압비를 가진다. 아크 퍼니스와 TCR의 용량은 10MVA이며,  $I_{sc}/I_L$ 는 약 37 정도가 되도록 하였다.

표 1 IEEE에서 규정한 배전 시스템에서의 전류 왜형 제한

120V THROUGH 69,000V						
Individual Harmonic order (Odd Harmonics)						
$I_{sc}/I_L$	<11	<17	<23	<35	35<	THD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	5.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above

Harmonic order	Magnitude (%)
1	100
2	7.7
3	5.8
4	2.5
5	4.2
6	0.0
7	3.1
8	0.0



그림 4 아크로의 전류 고조파 모델

Harmonic order	Magnitude (%)
1	100
5	5.05
7	2.59
11	1.05
13	0.75
17	0.44
19	0.35
23	0.24



그림 5 TCR의 전류 고조파 모델

시뮬레이션은 SKM사의 HI\_WAVE를 이용하였으며, 아크로와 TCR은 그림 4.5에서 제시된 모델을 사용하였다. 그림 7은 필터가 없을 경우의 PCC에서의 전류와 전압의 고조파 스펙트럼이다. 전압의 경우 IEEE 조건을 어느 정도 만족하고 있지만, 전류의 경우는 홀수 고조파와 짝수 고조파 모두 표 1에 제시한 값을 초과하고 있다. 그림 8은 2차 고조파에 튜닝된 필터를 설치한 경우의 전류 및 전압 고조파 스펙트럼을 보이고 있다. 2차 고조파가 현저하게 줄어 표 1의 짝수 고조파에 대한 조건은 만족하고 있지만, 여전히 홀수 고조파에 대한 조건은 만족하지 않고 있다. 따라서 이 시스템의 경우 그림 9와 같이 2차 및 5차 고조파를 제거하기 위한 2개의 동조필터가 필요하다. 이 경우 전압 및 전류 모두 IEEE 고조파 제한에 들어가지 않는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전압 안정기를 가지고 있는 AC EAF 시스템에 대해 SKM사의 HI-WAVE를 이용하여 고조파 해석을 수행하였다. 이를 통해 일반적인 고조파 보상 방법인 수동필터 적용에 관해 논의하였고, IEEE 519-1992에서 규정하고 있는 제한치와 비교·검토하였다. 실측한 자료를 통해 AC EAF의 고조파 모델링을 구현하면 좀 더 구체적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] D. Andrews et al., "Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility", *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 32, No. 3, pp.617~624, May/June, 1996
- [2] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems"
- [3] G. C. Montanari et al., "Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9, No. 4, pp.2026~2036, October, 1994
- [4] M. Baier, "The New IEEE Standard #519 and Its Implication on the Design of Harmonic Filters for arc Furnace Installations", *Canadian Electricity Forum on Power Quality*, 1994
- [5] J. G. Mayordomo, "A New Frequency Domain Arc Furnace Model for Iterative harmonic Analysis", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 12, No. 4, pp. 1771~1778, October, 1997
- [6] T.J.E. Miller, "Reactive Power Control in Electric Systems", *John Wiley & Sons*, pp.299~330, 1982

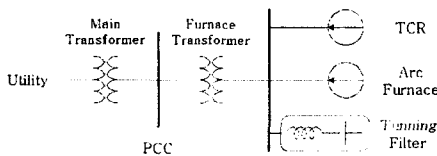
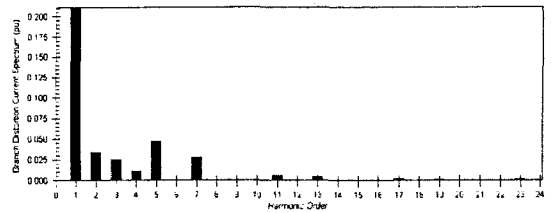
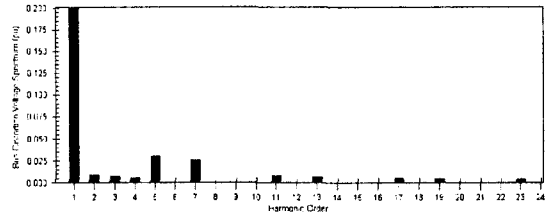


그림 6 시뮬레이션을 위한 단선도

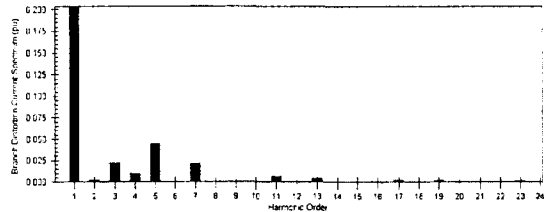


(a) 전류

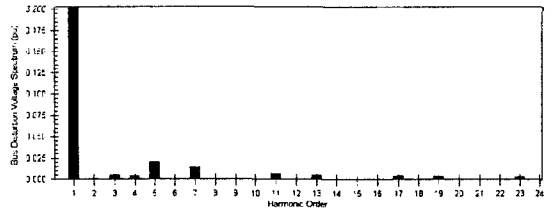


(b) 전압

그림 7 동조필터가 없을 경우의 고조파 스펙트럼

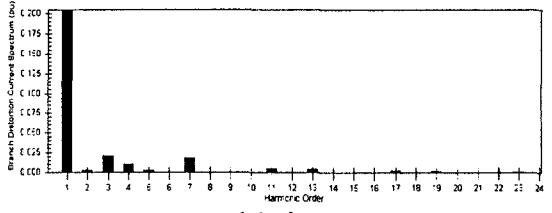


(a) 전류

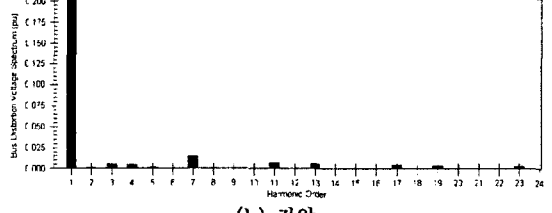


(b) 전압

그림 8 2차 동조필터가 있을 경우의 고조파 스펙트럼



(a) 전류



(b) 전압

그림 9 2차,5차 동조필터가 있을 경우의 고조파 스펙트럼