

수요관리를 위한 아크로 운전 상태에 따른 고조파 연구

박경호\*, 김재철\*, 박현택\*, 임상국\*\*, 오동환\*\*\*  
 \*송실대학교 전기공학과, \*\*에너지관리공단, \*\*\*LEMSCO

A Study of Harmonics by Arc Furnace Operating for Demand Side Management

Kyung-Ho Park\*, Jae-Chul Kim\*, Hyun-Teak Park\*, Sang KuG Im\*\*, Dong-WHan Oh\*\*\*  
 \*Soongsil Univ, \*\*KEMCO, \*\*\*LEMSCO

**Abstract** - Electric arc furnace has consumed plenty of power. Hence electric arc furnace can be expected to use for demand side management. When electric arc furnace use for demand side management, electric arc furnace frequently occur a starting and a stop. Electric arc furnace irregularity change consumption of power. Due to character of time-varying and non-linear, electric arc furnace has a problem with voltage quality (flicker, harmonics). Producted harmonic in electric arc furnace is different any harmonic source because of electric arc furnace peculiar operating. Accordingly, analysis for generated harmonic in electric arc furnace operating is demanded. This paper analyze effect of harmonic by arc furnace operating.

1. 서 론

산업의 고도화와 생활수준의 향상으로 국내 전력수요는 지속적으로 성장하여 미래의 전력수요에 대한 전원의 적기공급에 대해 자금의 투입 여력, 전원입지 확보, 환경 규제문제 등으로 전력공급 측면에서 어려움을 겪고 있다. 전기로는 단위 전력사용량이 크고, 전력을 다소비하는 설비이어서 수요관리대상이 될 가능성이 있는 것으로 예상된다.

그러나 전기 아크로는 비선형, 시변특성을 가지고 있어서, PCC(Point of Common Coupling)에 접속되어 있는 인접한 부하에 고조파에 대한 영향을 미치게 된다. 전기 아크로에서 발생하는 고조파의 특징은 아크로 고유 의 동작 특성으로 인해서 일반적인 고조파원과는 다른 차이점을 나타낸다.[2]

전기 아크로의 수요관리시 빈번한 기동과 정지가 발생한다. 전기 아크로의 운전 상황에 따라서 전기 아크로에서 발생하는 고조파에 대한 영향을 분석할 필요성이 요구되어 진다. 전기 아크로가 전력계통에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 논문에서는 전기 아크로가 운전중인 전력계통도를 이용하여 모의 전력계통도를 구성하였다. 또한 전기 아크로를 고조파전류원으로 모의할 때 고조파 전류 측정 데이터를 이용하여서 모의 전력계통을 시뮬레이션 하였다.

2. 본 론

2.1 전기 아크로

전력을 공급하여 물체를 가열하는 로(Furnace)를 총칭하여 "전기로"라 한다. 전기로는 연료를 사용하는 연소로와 비교하면 로에 있어서 설비비나 전력료가 비싼 경우도 있으나 일반적으로 높은 온도를 얻을 수 있고, 제품에 불순물의 혼입을 제거시킬 수 있으며, 온도의 조절이 정확하고 정밀하게 되며, 효율이 좋은 특징이 있다.

전기 아크로는 전극사이에서 발생하는 아크열을 이용한 일종의 전기로이다. 아크가열방식에는 저압아크를 사

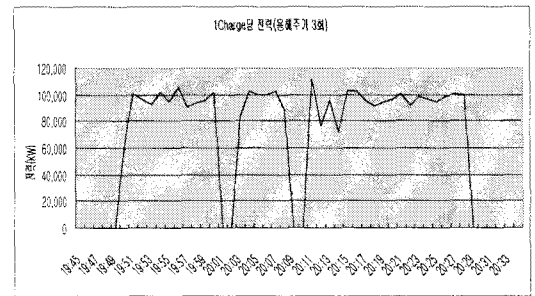
용하는 것과 고압아크를 사용하는 것이 있으며 가열방식에 따라 직접식 아크로와 간접식 아크로로 분류된다.

국내 전기 아크로는 주로 대기업 철강회사에 설치되어 사용되고 있다. 지역적으로는 남부지역이나 해안지방에 집중되어 있어 집중 부하의 성격을 가지고 있다. [표 1]에는 지역별로 아크로의 부하용량을 나타내었다.

[표 1] 지역별 전기 아크로 부하용량

지역별	부하용량(MW)
부산	75.05
인천	264.82
울산	6.17
강원	50.71
충남	83.8
전북	35.28
전남	94.19
경북	261.93
경남	164.8
합 계	1,036.75

전기 아크로의 전력 소비 패턴은 비교적 일정하다. [그림 1]에는 교류 아크로의 1 charge 의 전력수요패턴을 나타내고 있다.



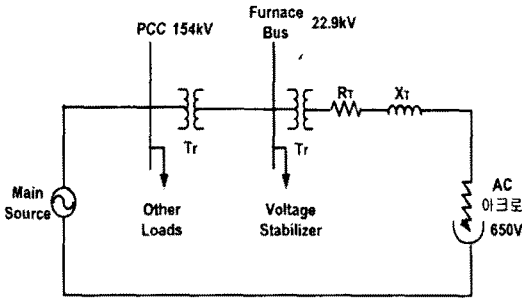
[그림 1] 교류 아크로의 1 charge의 전력수요패턴

2.2 교류 전기 아크로 시스템

국내의 일반적인 교류 전기 아크로의 전압은 154kV를 직접 수전받아서 변압기를 통해서 22kV로 강압한다. 강압한 22kV 전압을 아크로 전용 변압기를 통해서 650V로 강압하여 교류 아크로에 공급하고 있다. 그림 2에 일반적인 교류 전기 아크로 시스템이 나타내고 있다.

일반적으로 AC 전기 아크로 시스템이 원활한 동작을 위해 아크로 입력전압의 크기를 조절하고 있으며, 대부분이 탭 조절이 가능한 변압기를 이용하고 있다. 이러한 AC 전기 아크로 동작시 발생하는 고조파 및 플리커등에 의해 PCC(Point of Common Coupling)에 접속되어 있는 인접한 부하가 영향을 받게 되고, 따라서 이를 방지하기

위하여 퍼니스 버스(Furnace bus)에는 직렬 리액터나 TCR과 같은 전압 안정기(Voltage Stabilizer)가 설치된다.



[그림 2] 교류 전기 아크로 시스템

### 2.3 전기 아크로의 고조파

교류 전기 아크로에서 발생하는 고조파는 아크로 고유의 동작 특성으로 인해 일반적인 고조파원과는 상당한 차이점을 가지고 있다. 교류 전기 아크로에 의해 발생하는 고조파의 특징은 짝수 고조파 존재, 3의 배수 고조파 존재, 저차 홀수 고조파의 우세, 비정수형 고조파 존재이다.[2]

교류 전기 아크로의 전압 및 전류는 각각 비선형, 시변 특성을 가지고 있다. 이러한 특성이 나타나는 이유는 크게 3가지를 들 수 있다.

첫째는, 동작 조건(melting 또는 refining)에 따라 다른 특성을 가진다.

둘째는, 퍼니스 변압기의 탭 조절에 의한 전극봉(electrode arm)제어 때문이다.

셋째는, 동작시 아크 길이의 변화 때문이다.

전기 아크로의 운전 상태 중에서 용해기 조업은 고철을 용해하여 원하는 용량성분과 온도를 얻는 공정이다. 아크전류를 증가시키면 회로 입력 및 아크전력은 증가하고, 전기 효율과 역률 및 아크전압은 감소한다. 아크전류는 고철의 상황에 따라 변동하므로 전극의 위치를 항상 조정하여 아크전류를 가능한 일정한 값으로 유지하는 제어가 필요하다. 아크전류를 일정한 값으로 유지하여도 고철의 상황에 따라 아크전류의 대폭적인 변동이 생겨서 같은 전원에 연결된 수용가에 고조파와 플리커를 발생시킨다. 정련시 조업은 용해시 조업보다 사용하는 전력이 적고, 조업 시간도 짧다. 또한 전기 아크로 전류는 정련 상태가 되면서 비교적 안정된 특성을 나타낸다.

전기 아크로 운전을 통해서 발생하는 장애는 다음과 같다.[5]

1. 전기 아크로의 비선형적인 특성으로 전기 아크로는 고조파와 비정수형 고조파를 발생한다. 이러한 고조파는 공급 시스템으로 전파된다. 공진을 일으킬 수 있는 공급 시스템과 고조파에 민감한 전기적인 장비는 손상을 입는다.
2. 과도 장애는 녹이는 물질의 순차적인 이동으로 관측된다. 전기적인 아크의 특성으로 인해서 아크로로 물질을 녹이는 과정에서 시작된다. 이러한 과도장애는 전압 파형에 영향을 주고, 과전압이 문제가 된다.
3. 삼상 전극의 부식 작용과 전기 아크의 불규칙한 특성으로 삼상 전류와 전압이 불형평이 된다. 심지어 자동조정기로 정적인 전류를 유지한다해도 불규칙하고 빠른 negative sequence 전류의 동요는 공급 네트워크로 영향을 준다.
4. 전류 변동은 빠른 아크의 길이의 변화로 발생된다. 이 변동으로 형광등과 백열 전구에 플리커가 발생된다.

또는 민감한 전기 장비에 장애를 일으킨다.

전체적으로 전기 아크로 부하는 전력 품질에 심각한 결과를 가져온다.

### 2.4 전기 아크로 및 정련로 고조파 모델링 입력 데이터

전기 아크로는 운전 상태에 따라 고조파 발생 형태가 다르게 나타난다. 본 논문은 아크로의 전원 투입시, 1차 용해시, 2차 용해시, 정련시의 발생하는 고조파 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 정련로는 전기 아크로에 비해서 용량이 작고, 운전 상태도 일정한 패턴으로 운전된다. 전기 아크로와 정련로에서 발생하는 고조파 차수별 데이터는 대표적으로 발생하는 값을 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 전기 아크로와 정련로의 입력 고조파 차수별 데이터를 [표 2]에서 [표 4]에 나타내었다.

[표 2] 정련로 고조파 입력 데이터

고조파 차수	크기[%]
2	1.2
3	3.3
4	1.1
5	0.9
7	0.9

[표 3] 아크로 전원 투입 시 고조파 입력 데이터

고조파 차수	크기[%]
2	22
3	7
4	5
5	3

[표 4] 아크로 조업 상태별 고조파 입력 데이터

고조파 차수	크기[%]		
	1차 용해시	2차 용해시	정련시
2	11.3	11.0	5.0
3	12.5	5.6	2.8
4	2.0	2.1	1.0
5	12.3	3.7	3.8
6	4.2	1.3	0.7
7	3.5	1.7	0.9
8	2.9	0.6	0.2
9	0.9	0.6	0.2

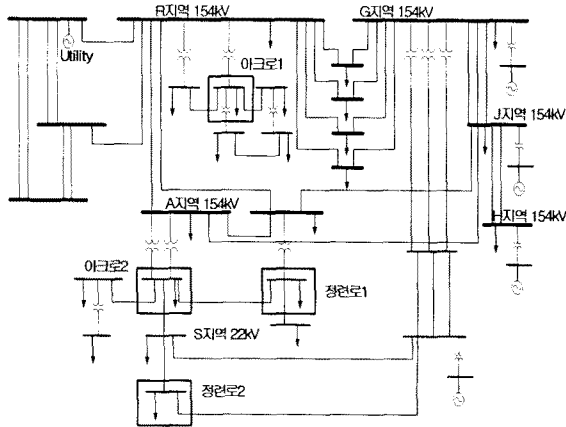
### 2.5 고조파 시뮬레이션

전기로 가동에 따른 고조파를 검토하기 위해서 전기 아크로 두 대와 정련로 두 대가 연결되어 있는 모의 계통도를 구성하였다. 정련로는 일종의 정련 전기 아크로이며 전기 아크로보다 용량이 적다.

전기 아크로에는 아크로 전용 변압기가 있고 22kV로 수전 받는다. 아크로의 용량은 각각 70[MVA], 85[MVA]로 설정하였다. 정련로도 전기 아크로와 같이 22kV로 수전 받는다. 정련로의 용량은 각각 31.05[MVA], 13.77[MVA]로 설정하였다.

[그림 3]은 본 연구를 위하여 구성한 모의 전력계통도이다. 모의 전력계통도에서 굵은 모선은 154kV 이고, 변압기를 통해서 각각 22kV, 3.3kV로 강압하여 사용하고 있다. 모의 계통도 구성은 모선이 31개, 발전기 4대, 가동선로 6개, 케이블 22개, 고정 탭 변압기 7개, 전압 조정 변압기 8개로 구성되어 있다. 전기 아크로 부하와 정련로 부하는 네모진 부분으로 나타낸 부하이다.

PSAF-Harmonics 프로그램을 사용하여 전기 아크로가 연결된 모의 전력계통도에서 발생하는 종합 전압 왜형률과 종합 전류 왜형률을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 구하였다. 전기 아크로는 아크로 전원 투입 시, 1차 용해시, 2차 용해시, 정련시로 나누어서 전기 아크로의 운전 상태별로 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 정련로는 환원기 시기로 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 전기 아크로와 정련로가 연결되어 있는 22kV 모선의 종합 전압 왜형률과 22kV 선로의 종합 전류 왜형률을 검토하여 전기아크로와 정련로의 운전시 발생하는 고조파가 전력계통에 미치는 영향을 분석하였다.



[그림 3] 전기 아크로가 연결된 모의 전력계통도

### 2.6 고조파 시뮬레이션 결과

전기 아크로 조업별 중에서는 1차 용해시가 다른 조업 상태보다 종합 전류 왜형률과 종합 전압 왜형률이 높게 나타났다. 이것은 아크전류가 불규칙하게 변동되고 왜곡되는 정도가 용해 초기 단계에서 심하고 용해가 진행되어 정련 상태가 되면서 비교적 안정된 특성을 나타내기 때문이라고 판단된다.

[표 5]와 [표 6]에 전기 아크로 조업별 주요 선로의 종합 전류 왜형률과 전기 아크로 조업별 주요 모선의 종합 전압 왜형률을 나타내었다.

[표 5] 전기 아크로 조업별 주요 선로의 종합 전류 왜형률

선로명	아크로 전원 투입시 [%]	1차 용해시 [%]	2차 용해시 [%]	정련시 [%]
A-S 22kV 선로	5.42	6.81	4.37	2.27
A지역 22kV 선로-1	0.94	1.61	0.85	0.57
A지역 22kV 선로-2	13.42	10.45	7.47	5.8
A지역 22kV 선로-3	0.79	1.4	0.71	0.45
R지역 22kV 선로-1	8.53	8.02	4.87	2.59
R지역 22kV 선로-2	2.72	4.52	2.06	1.34
R지역 3.3kV 선로	3.71	6.81	2.94	1.98
S지역 22kV 선로-1	1.99	2.46	1.64	0.97
S지역 22kV 선로-2	9.04	11.27	7.31	4.33
S지역 22kV 선로-3	3.28	4.06	2.68	1.58

[표 6] 전기 아크로 조업별 주요 모선의 종합 전압 왜형률

모선	아크로 전원 투입시 [%]	1차 용해시 [%]	2차 용해시 [%]	정련시 [%]
A지역 22kV 모선-1	0.64	1.1	0.57	0.39
A지역 22kV 모선-2	0.64	1.1	0.57	0.39
A지역 22kV 모선-3	0.66	1.22	0.6	0.39
A지역 22kV 모선-4	0.66	1.22	0.6	0.39
A지역 3.3kV 모선-1	0.66	1.21	0.6	0.39
R지역 22kV 모선-1	1.06	1.7	0.81	0.51
R지역 22kV 모선-2	1.37	2.2	1.03	0.65
R지역 22kV 모선-3	1.37	2.2	1.03	0.65
R지역 3.3kV 모선-4	1.37	2.2	1.03	0.65
R지역 3.3kV 모선	1.38	2.21	1.03	0.66
S지역 22kV 모선-1	0.3	0.53	0.27	0.17
S지역 22kV 모선-2	0.37	0.67	0.34	0.22
S지역 22kV 모선-3	0.33	0.58	0.29	0.19
S지역 22kV 모선-4	0.45	0.8	0.41	0.27

전기 아크로 조업별 시뮬레이션 결과 A지역에 22kV 선로가 종합 전류 왜형률이 가장 높게 나타났다. 이것은 아크로와 정련로가 있는 모선을 연결하는 선로여서 아크로와 정련로에 대한 영향 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 선로의 종합 전압 왜형률은 R지역에 있는 3.3kV 모선이 종합 전압 왜형률에 민감하게 반응한 것으로 판단된다. R지역이 발전소에서 가장 멀리 떨어져 있고, 수전 지역에 있는 아크로의 영향 때문이라고 사료된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 전기 아크로의 전력 수요관리를 실시하기 위한 기초 자료로서 전기 아크로에서 발생하는 고조파를 전기 아크로 운전상태별로 시뮬레이션 하여 고조파 발생량을 검토하였다. 전기 아크로에서 발생하는 고조파를 검토하기 위해서 전기 아크로가 연결된 모의 전력계통을 구성하였고, 전기 아크로에서 발생하는 고조파원을 모의하여 시뮬레이션 하였다. 전기 아크로 운전 상태별로 아크로 전원 투입시, 1차 용해시, 2차 용해시, 정련시로 나누어 시뮬레이션 하였다. 전기 아크로의 조업별 상태별 시뮬레이션 결과 전기 아크로 조업 상태별로 고조파가 다르게 나타났고 전기 아크로 조업 상태 중, 1차 용해시가 가장 높은 고조파를 발생 시키는 것으로 나타났다. 전기 아크로 운전 상태별로 고조파를 검토하였으므로 전기 아크로 수요관리를 위한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 이강완 외, "철강산업에서 전력계통 고조파 해석", 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, pp. 20-25, 2001년. 11월.
- [2] 민준기 외, "교류 전기 아크로 시스템의 고조파 해석", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 B권, pp. 1239-1241, 2000년. 7월.
- [3] 유상봉, "전기설비에서의 고조파 대책 기술", 조명·전기설비학회지, pp. 40-52, 1999년. 12월.
- [4] 김종겸 외, "선형 및 비선형 부하량에 따른 고조파 성분의 변화", 전기학회논문지 51권 8호, pp. 441-448, 2002년 8월.
- [5] Enrique Acha, Manuel Madrigal, "Power Systems Harmonics (Computer Modelling and Analysis)", WILEY, 2001년.
- [6] "PSAF for Windows User's Guide and Reference Manual" CYME International Inc. March 2001.