

전기 아크로 운전 상태에 따른 고조파 해석

(Harmonics Analysis for Electric Arc Furnace According to the Operation Condition)

김재철* · 박경호 · 박현택 · 문종필 · 임상국 · 손학식

(Jae-Chul Kim · Kyung-Ho Park · Hyun-Teak Park · Jong-Fil Moon · Sang-Kug Im · Hag-Sig Son)

요 약

철강 소비가 늘어나고, 전기아크로 운영기술의 발전에 따라 아크로의 사용이 증가하고 있다. 그러나 전기아크로의 사용이 늘어날수록 계통에는 악영향을 미치게 된다. 즉, 전력품질 문제인 전압 및 전류 고조파, 상 불평형, 역률 저하, 전압 플리커 등의 문제가 발생하고 있다. 여기서는 시변 특성과 비선형 특성을 갖는 고조파에 대하여 해석하였다. 우선 전기 아크로가 포함된 전력계통 모델을 만들고, 전기 아크로의 다양한 운전 조건에 따라 발생된 고조파가 계통에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 고조파 저감 대책으로 고조파 필터를 설계하여 그 영향을 검토하였다.

Abstract

The use of electric arc furnace has been increasing as the steel consumption is increasing and the operation technique of electric arc furnace are developing. But as the use of electric arc furnace is increased, the furnace have produced the adverse effects of power quality: voltage and current harmonics, voltage and current imbalances, low power factor, and voltage flicker. One of the power quality problems, the harmonic have the characteristics of the time-varying and non-linear. This paper analyzed the harmonics for the various operation conditions of electric arc furnace. The power system model with electric arc furnace have been made, and the harmonic's effects on the power system has been analyzed according to the various operating conditions, first melting, second melting, so on. Also, the filter reducing the harmonic components have been designed and its effects on the power system have been examined.

Key Words : Harmonics, Electric arc furnace, harmonic filter

1. 서 론

전기 아크로는 전극사이에서 발생하는 아크열을

이용한 일종의 전기로이다. 교류 아크로는 3상 교류 전원이 3개의 전극봉에 의해 아크를 만들며, 직류 아크로는 3상 교류 전원을 전력용반도체에 의해 단상으로 정류된 직류 전원에 의해 아크를 만든다. 이로 인해 전력계통에 큰 전압변동을 야기하고 동일한 계통에서 수전하는 수용가의 조명기구나 TV수상기에 플리커 장애를 일으킨다. 또한 전기 아크로의 비선형, 시변 특성으로 인하여 동일한 계통에 접속되어

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 교수
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780

E-mail : jckim@ee.ssu.ac.kr

접수일자 : 2004년 4월 28일

1차심사 : 2004년 5월 3일, 2차심사 : 2004년 6월 9일

심사완료 : 2004년 6월 30일

있는 인접한 부하에 고조파 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 전기 아크로 운전시 나타나는 고조파가 전력계통에 미치는 영향을 전기 아크로의 운전 상태에 따라 분석하였다. 이를 위하여 전기 아크로가 운전 중인 실제 전력계통을 이용하여 모델 계통을 구성하였으며, 전기 아크로를 고조파원으로 모델링하여 분석하였다. 또한, 전기 아크로의 고조파 대책으로 고조파 필터를 설계 및 설치 후 계통에의 영향을 분석하여 필터 저감효과를 분석하였다.

2. 전기 아크로 시스템

그림 1은 일반적인 교류 전기 아크로 부하가 있는 계통 시스템을 나타내고 있다[2]. 일반적으로 교류 전기 아크로 시스템이 원활한 동작을 위해 아크로 입력전압의 크기를 조절하고 있으며, 대부분이 탭 조절이 가능한 변압기를 이용하고 있다.

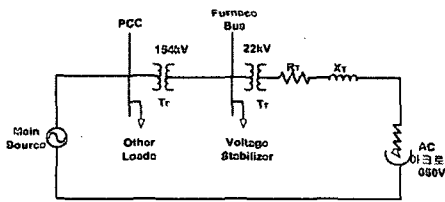


그림 1. 교류 전기 아크로 시스템
Fig. 1. AC electric arc furnace system

교류 전기 아크로는 용해(melting) 또는 정련(refining)시에 따라 다른 특성을 나타내고, 로변압기의 탭 조절에 의한 전극봉 제어와 전기 아크로 동작시 아크 길이의 변화로 인해서 전기 아크로의 전압 및 전류는 각각 비선형, 시변 특성을 갖는다[1].

3. 전력계통의 고조파

3.1 고조파의 정의

고조파는 기본파에 대하여 그의 정수배를 갖는 주파수 성분을 말하는 것으로, 통상 왜형파는 그림 2와 같이 기본파와 고조파로 분해해서 생각할 수 있다. 왜형파의 질을 나타내는 수치는 종합 전압 왜형을 및 고조파 함유율이 있다.

고조파 전류는 보통 비선형 부하에서 발생되며, 교류 전기 아크로는 비선형·시변특성을 가지고 있는 대표적인 비선형 부하이다. 교류 전기 아크로에 의해 발생하는 고조파의 특징은 짝수와 3의 배수 고조파가 존재하고, 저차 고조파가 우세하며, 비정수형 고조파도 존재하고 있다[2]. 여기에서 짝수 고조파와 3의 배수 고조파의 경우 3상 교류 전기 아크로의 불평형 운전 및 로변압기의 초기 유입전류(inrush current)에 기인한 것으로, 일반적인 고조파원의 홀수 고조파에 비해 저차수가 되기 때문에 큰 문제가 되고 있다. 또한 교류 전기 아크로의 고차 고조파는 그 값이 매우 작기 때문에 무시할 수 있으며, 대부분이 10차 이하의 저차 고조파로 구성되어 있다.

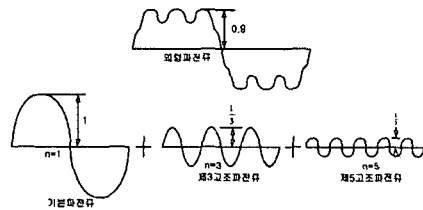


그림 2. 기본파와 고조파의 파형
Fig. 2. Fundamental wave and harmonic waveform

3.2 고조파 해석 방법

전력 계통에서 고조파 해석은 대부분 정상상태 선형 해석으로 이루어진다. 비선형 요소인 고조파원은 선형 계통모델에 주입된 것으로 취급한다. 고조파 해석은 대상 전력계통에서 발생 가능한 고조파 범위의 다중해석이다. 전력계통의 고조파 해석 순서를 나타내면 그림 3과 같다.

각 고조파에 대한 계통의 모든 구성요소의 어드미턴스 값을 식 (1)을 이용하여 구한다. 이 어드미턴스 값을 이용하여 모션 어드미턴스 행렬을 구한다.

$$[I(n)] = [Y(n)][V(n)] \quad (1)$$

고조파 전류 $I(n)$ 이 주어졌을 경우 식 (1)을 정리하여 고조파 전압을 구하면 식(2)과 같다.

$$[V(n)] = [Y(n)]^{-1}[I(n)] = [Z(n)][I(n)] \quad (2)$$

전기 아크로 운전 상태에 따른 고조파 해석

따라서 k개의 모선중 p모선과 q모선에 연결된 고조파 전류 $I_p(n)$ 과 $I_q(n)$ 을 알고 있는 경우, 일반적으로 고조파 전압 $V_i(n)$ 은 다음 식 (3)과 같으며, i 모선과 j 모선에 연결된 선로의 고조파 전류는 식(4)과 같다.

$$V_i(n) = Z_{ip}(n) \cdot I_p(n) + Z_{iq}(n) \cdot I_q(n) \quad (3)$$

$$I_{ij}(n) = \frac{V_i(n) - V_j(n)}{Z_{ij}(n)} \quad (4)$$

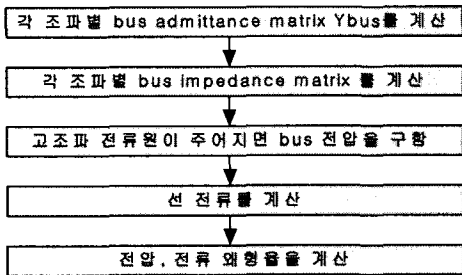


그림 3. 고조파 해석 알고리즘
Fig. 3. Harmonics analysis algorithm

3.3 고조파 필터 설계

수동 필터는 L-C 필터라고도 부르고 그림 4와 같이 나타낸다. L-C 필터의 기본적인 원리는 L과 C의 공진현상을 이용한 것으로 원하는 n차 고조파 전류는 대부분 필터에 흡수되고, 유출전류를 저감시킬 수 있다. L-C필터의 각 분로는 고조파 차수에 직렬 공진시키는 인덕턴스와 커패시턴스를 선정하고 있으므로 각 고조파 차수에 대해 저임피던스가 되므로 부하에서 발생한 고조파 전류는 임피던스비에 의해

분류되어 전원측으로 분류는 적어지고 L-C필터에 많이 흡수하여 고조파를 억제하게 된다.

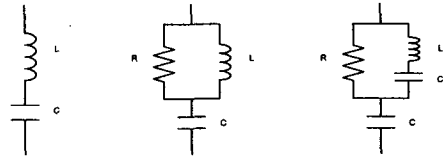


그림 4. 수동 필터의 종류
Fig. 4. A class of passive filter

h_n 고조파를 제거하기 위한 수동 필터 설계 과정은 그림 5와 같다[9].

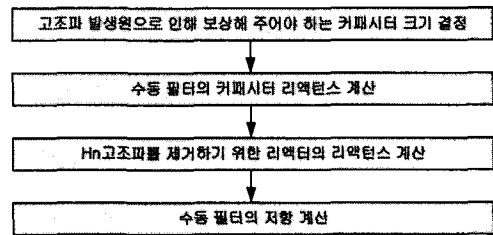


그림 5. 수동 필터의 설계 과정
Fig. 5. Design of passive filter

4. 전기 아크로 운전 상태별 고조파 분석

4.1 시뮬레이션 개요

본 논문은 전기로의 가동에 따른 전기 아크로에서 발생하는 고조파가 전력계통에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해서 분석하였다. 이를 위한 모델로 전기 아크로 두 대와 정련로 두 대가 연결되어 있는 모

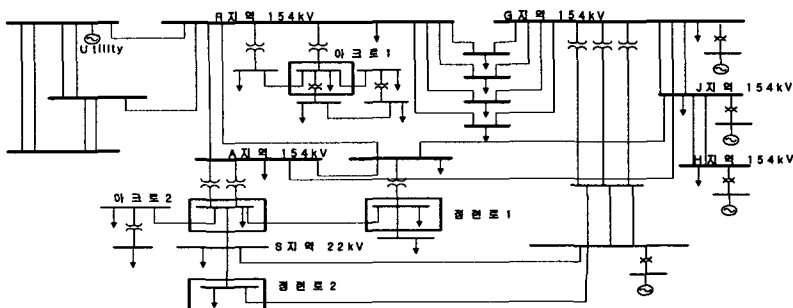


그림 6. 전기 아크로가 연결된 모의 전력계통도
Fig. 6. Power system model with electric arc furnaces

표 3. 전기 아크로 운전 상태별 주요 선로의 종합 전류 왜형도

Table 3. Current total harmonic distortion of electric arc furnace operation

선로명	아크로 전원 투입시 THD [%]	1차용해시 THD [%]	2차용해시 THD [%]	정련시 THD [%]
A-S 22kV 선로	13.13	16.45	10.59	5.46
A지역 22kV 선로-1	2.04	3.76	1.87	1.17
A지역 22kV 선로-2	30.22	23.61	14.25	8.75
A지역 22kV 선로-3	1.82	3.33	1.67	1.02
R지역 22kV 선로-1	21.02	19.24	11.67	6.2
R지역 22kV 선로-2	6.59	10.81	4.92	3.15
R지역 3.3kV 선로-3	8.99	16.29	7	4.67
S지역 22kV 선로-1	4.57	5.69	3.73	1.98
S지역 22kV 선로-2	20.83	26.2	16.73	8.98
S지역 22kV 선로-3	7.56	9.42	6.11	3.26

표 4. 전기 아크로 조업현 주요 모선의 종합 전압 왜형도

Table 4. Voltage total harmonic distortion of electric arc furnace operation

모선명	아크로 전원 투입시 THD [%]	1차용해시 THD [%]	2차용해시 THD [%]	정련시 THD [%]
A지역 22kV 모선-1	1.52	2.9	1.4	0.87
A지역 22kV 모선-2	1.38	2.58	1.27	0.8
A지역 22kV 모선-3	1.38	2.58	1.27	0.8
A지역 22kV 모선-4	1.52	2.89	1.4	0.87
A지역 3.3 kV 모선	1.52	2.89	1.4	0.87
R지역 22kV 모선-1	2.56	4.07	1.92	1.2
R지역 22kV 모선-2	3.33	5.27	2.45	1.54
R지역 22kV 모선-3	3.33	5.27	2.45	1.54
R지역 3.3 kV 모선-1	3.33	5.27	2.45	1.54
R지역 3.3 kV 모선-2	3.34	5.28	2.46	1.55
S지역 22kV 모선-1	1	1.9	0.93	0.58
S지역 22kV 모선-2	0.83	1.58	0.77	0.48
S지역 22kV 모선-3	0.75	1.39	0.68	0.42
S지역 22kV 모선-4	0.67	1.27	0.62	0.38

표 5. 전기 아크로1에 적용한 필터 데이터

Table 5. Filter data of electric arc furnace 1

	2차		3차		4차		5차	
	Q=30	Q=100	Q=30	Q=100	Q=30	Q=100	Q=30	Q=100
R [Ω]	0.8391	0.25174	0.506	0.1517	2.3708	0.7112	0.3083	0.0925
L [mH]	33.4		13.42		47.2		4.9097	
C [μF]	52.711		58.3		9.328		57.372	

표 6. 전기 아크로2에 적용한 필터 데이터

Table 6. Filter data of electric arc furnace 2

	2차		3차		4차		5차	
	Q=30	Q=100	Q=30	Q=100	Q=30	Q=100	Q=30	Q=100
R [Ω]	0.7338	0.22016	0.4422	0.1326	2.0732	0.6219	0.2696	0.0809
L [mH]	29.21		11.737		41.267		4.294	
C [μF]	60.272		66.671		10.667		65.602	

전기 아크로 운전 상태에 따른 고조파 해석

표 7. 아크로 전원 투입시 및 1차 용해시 필터 적용 후 종합 전류 왜형률

Table 7. Current total harmonic distortion of starting and of first melting after filter installs

I_{THD} [%]	아크로 전원 투입시			1차 용해시		
	필터 없음	필터 적용 Q=30	필터 적용 Q=100	필터 없음	필터 적용 Q=30	필터 적용 Q=100
A-S 22kV 선로	13.13	9.4	6.01	16.45	7.3	3.97
A지역 22kV 선로-1	2.04	0.98	0.61	3.76	1.47	1.04
A지역 22kV 선로-2	30.22	24.98	14.65	23.61	11.34	8.6
A지역 22kV 선로-3	1.82	0.97	0.62	3.33	1.35	0.97
R지역 22kV 선로-1	21.02	14.86	6.22	19.24	6.42	3.43
R지역 22kV 선로-2	6.59	3.69	1.41	10.81	3.65	2.87
R지역 3.3kV 선로-3	8.99	4.94	1.9	16.29	5.46	4.5
S지역 22kV 선로-1	4.57	3.37	2.2	5.69	2.65	1.43
S지역 22kV 선로-2	20.83	14.62	9.45	26.2	12.07	6.69
S지역 22kV 선로-3	7.56	5.44	3.53	9.42	4.37	2.39

표 8. 아크로 전원 투입시 및 1차 용해시 필터 적용 후 종합 전압 왜형률

Table 8. Voltage total harmonic distortion of starting and of first melting after filter installs

V_{THD} [%]	아크로 전원 투입시			1차 용해시		
	필터 없음	필터 적용 Q=30	필터 적용 Q=100	필터 없음	필터 적용 Q=30	필터 적용 Q=100
A지역 22kV 모선-1	1.52	0.81	0.51	2.9	1.16	0.86
A지역 22kV 모선-2	1.38	0.66	0.42	2.58	1.01	0.72
A지역 22kV 모선-3	1.38	0.66	0.42	2.58	1.01	0.72
A지역 22kV 모선-4	1.52	0.81	0.51	2.89	1.16	0.86
A지역 3.3kV 모선	1.52	0.81	0.51	2.89	1.16	0.85
R지역 22kV 모선-1	2.56	1.39	0.53	4.07	1.39	1.05
R지역 22kV 모선-2	3.33	1.88	0.72	5.27	1.78	1.37
R지역 22kV 모선-3	3.33	1.88	0.72	5.27	1.78	1.37
R지역 3.3kV 모선-1	3.33	1.88	0.72	5.27	1.78	1.37
R지역 3.3kV 모선-2	3.34	1.88	0.72	5.28	1.79	1.38
S지역 22kV 모선-1	1	0.48	0.3	1.9	0.74	0.53
S지역 22kV 모선-2	0.83	0.38	0.23	1.58	0.6	0.43
S지역 22kV 모선-3	0.75	0.31	0.16	1.39	0.52	0.37
S지역 22kV 모선-4	0.67	0.29	0.16	1.27	0.47	0.34

표 9. 2차 용해시 및 정련시 필터 적용 후 종합 전류 왜형률

Table 9. Current total harmonic distortion of second melting and of refining after filter installs

I_{THD} [%]	2차 용해시			정련시		
	필터 없음	필터 적용 Q=30	필터 적용 Q=100	필터 없음	필터 적용 Q=30	필터 적용 Q=100
A-S 22kV 선로	10.59	5.76	2.78	5.46	2.64	1.3
A지역 22kV 선로-1	1.87	0.93	0.51	1.17	0.49	0.28
A지역 22kV 선로-2	14.25	9.31	7.2	8.75	6.45	6.45
A지역 22kV 선로-3	1.67	0.84	0.47	1.02	0.42	0.22
R지역 22kV 선로-1	11.67	5.25	1.9	6.2	2.4	0.89
R지역 22kV 선로-2	4.92	2.18	1.24	3.15	1.05	0.6
R지역 3.3kV 선로-3	7	3.04	1.87	4.67	1.48	0.91
S지역 22kV 선로-1	3.73	2.1	1.05	1.98	1.05	0.54
S지역 22kV 선로-2	16.73	9.43	4.72	8.98	4.69	2.42
S지역 22kV 선로-3	6.11	3.45	1.72	3.26	1.72	0.89

표 10. 2차 용해시 및 정련시 필터 적용 후 종합 전압 왜형도

Table 10. Voltage total harmonic distortion of second melting and of refining after filter installs

V _{THD} [%]	아크로 전원 투입시			1차 용해시		
	필터 없음	필터 적용 Q=30	필터 적용 Q=100	필터 없음	필터 적용 Q=30	필터 적용 Q=100
A지역 22kV 모선-1	1.4	0.69	0.4	0.87	0.35	0.19
A지역 22kV 모선-2	1.27	0.63	0.35	0.8	0.33	0.19
A지역 22kV 모선-3	1.27	0.63	0.35	0.8	0.33	0.19
A지역 22kV 모선-4	1.4	0.69	0.4	0.87	0.35	0.19
A지역 3.3kV 모선	1.4	0.69	0.4	0.87	0.35	0.19
R지역 22kV 모선-1	1.92	0.87	0.47	1.2	0.42	0.23
R지역 22kV 모선-2	2.45	1.1	0.6	1.54	0.52	0.29
R지역 22kV 모선-3	2.45	1.1	0.6	1.54	0.52	0.29
R지역 3.3kV 모선-1	2.45	1.1	0.6	1.54	0.52	0.29
R지역 3.3kV 모선-2	2.46	1.1	0.6	1.55	0.53	0.29
S지역 22kV 모선-1	0.93	0.45	0.25	0.58	0.23	0.12
S지역 22kV 모선-2	0.77	0.37	0.2	0.48	0.19	0.1
S지역 22kV 모선-3	0.68	0.33	0.17	0.42	0.16	0.08
S지역 22kV 모선-4	0.62	0.3	0.16	0.38	0.15	0.08

의 계통도를 구성하였다. 전기 아크로에는 아크로 전용 변압기가 있고 22[kV]를 사용한다. 아크로의 용량은 각각 70[MVA], 85[MVA]로 설정하였다.

시뮬레이션은 고조파 해석 프로그램인 PSFA-Harmonics 프로그램을 이용하였고, 종합 전압 왜형율과 종합 전류 왜형율을 이용하여 모의 결과를 나타내었다.

4.2 모의 계량도

전기 아크로의 운전시의 고조파를 분석하기 위하여 철강회사의 계통도를 참고하여, 그림 6과 같이 모의 전력계통도를 구성하였다[7]. 모의 전력계통도에서 J, H, S지역에서 발전을 하여서 R, A지역에 있는 부하들에 전력을 공급하고 있다. 모의 계통도 구성은 모선이 31개, 발전기 4대, 가공선로 6개, 케이블 22개, 고정 탭 변압기 7개, 전압 조정 변압기 8개로 구성되어 있다. 전기 아크로 부하와 정련로 부하는 사각형 부분으로 나타난 부하이다. R지역 22[kV] 모선에 아크로 한 대가 설치되어 있고, A지역 22[kV] 모선에 아크로 한 대가 있다. 정련로는 A지역 22[kV] 모선과 S지역 22[kV] 모선에 설치되어 있다.

4.3 전기 아크로 고조파 모델링 및 입력 데이터

전기 아크로와 정련로에서 발생하는 고조파 차수별 데이터는 대표적으로 발생하는 데이터를 사용하

였다. 이 데이터는 전기 아크로 운전시 측정된 고조파 데이터이다. 고조파 시뮬레이션에 사용된 정련로와 전기 아크로의 입력 고조파 차수별 데이터를 표 1, 2에 나타내었다.

표 1. 고조파 입력 데이터

Table 1. Harmonic input data

고조파 차수	정련로 고조파 크기[%]	아크로 전원 투입시 고조파 크기[%]
2	1.2	22
3	3.3	7
4	1.1	5
5	0.9	3
7	0.9	-

표 2. 아크로 조업 상태별 고조파 입력 데이터

Table 2. Harmonic input data of electric arc furnace operation

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

4.4 시뮬레이션 결과 및 분석

PSFA-Harmonics 프로그램을 사용하여 전기 아

전기 아크로 운전 상태에 따른 고조파 해석

크로가 연결된 모의 전력계통도에서 발생하는 종합 전압 왜형률과 종합 전류 왜형률을 시뮬레이션을 통해서 구하였다[8, 9]. 전기 아크로는 아크로 전원 투입 시, 1차 용해시, 2차 용해시, 정련시로 나누어서 전기 아크로의 운전 상태별로 시뮬레이션 하였다.

정련로는 환원기 시기로 설정하였으며, 전기 아크로와 정련로가 연결되어 있는 22[kV] 모선의 종합 전압 왜형률과 22[kV] 선로의 종합 전류 왜형률을 검토하여 전기아크로와 정련로의 운전시 발생하는 고조파가 전력계통에 미치는 영향을 분석하였다[4].

표 3과 표 4는 전기 아크로의 운전 상태별로 주요 선로의 종합 전류 왜형률과 종합 전압 왜형률을 나타내었다.

시뮬레이션 결과 154[kV] 모선과 선로에는 큰 영향이 나타나지 않았다. 이것은 전압 계통이 크기 때문에 상대적으로 영향을 받지 않은 것으로 판단된다. 발전기와 가까운 지역보다 부하가 많은 지역이 종합 전압 왜형률과 종합 전류 왜형률이 더 크게 나타났다. 아크로 부하가 있는 지역인 R지역이 종합 전압 왜형률이 높게 나타났고, A지역을 연결하는 선로는 종합 전류 왜형률이 다른 지역 선로보다 높게 나타났다. 이것은 전기 아크로 부하와 정련로 부하가 연결된 모선을 연결하는 선로여서 영향을 미치는 것으로 판단된다.

전기 아크로 조업별 시뮬레이션 결과 A지역 22[kV] 선로-2가 종합 전류 왜형률이 가장 높게 나타났다. 이것은 아크로 부하 모선과 정련로 부하 모선을 연결하는 선로여서 아크로와 정련로에 대한 영향 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 선로의 종합 전압 왜형률은 R지역에 있는 3.3[kV] 모선(R3BB)이 가장 높게 나타났다. 이것은 3.3[kV] 모선의 전압이 다른 모선(154[kV], 22[kV])과 비교해서 전압이 낮기 때문에 종합 전압 왜형률에 민감하게 반응한 것으로 판단된다. 또한 R지역이 발전소에서 가장 멀리 떨어져 있고, R지역에 있는 아크로의 영향 때문이라고 사료된다.

4.5 고조파 필터 적용 후 시뮬레이션 결과

본 논문은 고조파 발생원에 수동필터를 적용하여 고조파의 저감효과를 시뮬레이션 하였다. 전기 아크

로에서 발생하는 고조파는 저차 고조파가 우세한 것으로 나타났다.

또한, 다른 고조파원과는 다르게 짝수 고조파도 존재하였다. 이에 대한 대책으로 특정 고조파를 제거할 수 있는 수동필터를 설계하였다[3]. 전기 아크로에서 발생하는 고조파를 제거하기 위해 2~5차의 수동필터를 설계하였다[5]. 여기서 필터의 설계시 필터의 첨예도(Q: the quality factor)를 30과 100으로 각각 적용하여 시뮬레이션 하여 첨예도의 차이를 살펴보았다[10]. 표 5와 표 6은 수동필터 설계 과정으로 계산된 값이며, 표의 값을 사용한 필터를 적용하여 시뮬레이션 하였다.

표 5와 표 6의 수동필터 데이터를 이용하여 고조파 발생원인 아크로 1과 아크로 2에 수동필터를 적용하여 아크로 운전상태별로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 한 결과 필터를 적용하였을 때에 종합 전류 왜형률과 종합 전압 왜형률이 감소하는 것을 확인하였다. 또한 필터의 첨예도를 나타내는 Q값이 크면 필터의 고조파 저감 효과가 큰 것을 확인하였다. 표 7에서 표 10에는 고조파 필터를 적용하여 전기 아크로 운전상태에 따른 고조파 저감 효과를 나타내었다.

아크로 전원 투입시 및 1차 용해시 필터 적용 후의 결과를 표 7과 표 8에 나타내었다. 선택도가 30인 필터와 100인 필터는 각각 종합 전류 왜형률을 최대 6.16[%], 15.57[%]를 감소시켰고, 종합 전압 왜형률은 최대 1.45[%], 2.62[%]를 감소시켰다.

1차 용해시는 고조파 발생량이 커서 필터의 효과가 다른 운전시기 보다 크게 나타났다. 즉, 선택도가 30, 100인 필터는 각각 종합 전류 왜형률을 최대 14.13[%], 19.51[%]를 감소시켰고, 종합 전압 왜형률은 최대 3.49[%], 3.9[%]를 감소시켰다.

2차 용해시 및 정련시 필터 적용 후 결과는 표 9와 표 10에 나타나 있다. 선택도가 30, 100인 필터는 각각 종합 전류 왜형률을 최대 6.42[%], 12.01[%]를 감소시켰고, 종합 전압 왜형률은 최대 1.35[%], 1.86[%]를 감소시켰다.

정련시에는 선택도가 30, 100인 필터는 각각 종합 전류 왜형률을 최대 4.29[%], 6.47[%]를 감소시켰고, 종합 전압 왜형률은 최대 1.02[%], 1.26[%]를 감소시켰다.

5. 결 론

본 논문은 전기 아크로에서 발생하는 고조파를 아크로 운전 상태별로 모의하여 고조파 발생량을 검토하였다.

고조파 해석은 정상상태 선형 해석으로 하였다. 즉, 비선형 요소인 고조파원을 선형 계통모델에 각각 주입하였다. 아크로의 고조파원 모델링시 쓰인 데이터는 실제 전기 아크로에서 측정된 데이터를 사용하였다. 전기 아크로 운전 상태에 따른 고조파를 검토하기 위하여 아크로 전원 투입시, 1차 용해시, 2차 용해시, 정련시로 나누어 시뮬레이션 하였다.

또한 고조파를 저감시키기 위하여 고조파 필터를 설계하여 시뮬레이션 하였다. 전기 아크로에서 발생하는 고조파는 고조파가 우세하였으며, 또한 다른 고조파원과는 다르게 짝수 고조파도 존재하였다. 그러므로 고조파 필터를 설계할 때에도 전기 아크로에서 발생하는 고조파의 특성에 맞도록 2차에서 5차까지의 수동필터를 설계하였다. 설계된 수동필터를 이용하여 전기 아크로 운전 상태에 따른 고조파를 실시하여, 필터를 적용하지 않았을 경우와 필터를 적용한 경우를 비교 검토하였다.

종합적으로, 고조파는 전기 아크로 운전 상태별로 다르게 나타났고, 그 중 1차 용해시가 가장 높은 고조파를 발생시키는 것으로 나타났다. 또한 필터를 적용하였을 경우 종합 전류 왜형율과 종합 전압 왜형율을 감소시키는 것을 확인 할 수 있었다.

본 논문은 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-474) 주관으로 수행된 연구임.

References

- (1) 오동환, 이강원, "철강산업에서 전력계통 고조파 해석", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp. 20-25, 2001년 11월.
- (2) 민준기, 이상훈, 김재식, 최재호, 박태준, 이왕하, "교류 전기 아크로 시스템의 고조파 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1239-1241, 2000년 7월.
- (3) 유상봉, "전기설비에서의 고조파 대책 기술", 한국조명·전기설비학회지, 제 13권, 4호, pp. 40-52, 1999년 12월.
- (4) 한국전력연구원, "제철수용기 전기품질(플리커, 고조파) 측정 및 분석 보고서", 1999년 11월.

- (5) Elham B. Makram, E. V. Subramaniam "Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data" IEEE transactions on industry applications, Vol. 29, No. 6. pp. 1176-1183, Nov./Dec. 1993.
- (6) D. Andrews, M. T. Bishop, J. F. Witte, "Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, pp. 617-624. May/June 1996.
- (7) CYME International Inc. "PSAF for Windows User's Guide and Reference Manual" Mar. 2001.
- (8) Enrique Acha, Manuel Madrigal, "Power Systems Harmonics(Computer Modelling and Analysis)", WILEY, 2001.
- (9) George J. Wakileh, "Power Sustersms Harmonics (Fundamentals, Analysis and Filter Design)", Springer, 2001.
- (10) Yacarnini, "Power Systems Harmonics_Part1 Harmonic sources", Tutorial, Power Engineering Journal, Vol. 8. No. 4. pp. 193-198. 1994.

◇ 저자소개 ◇

김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기제어시스템공학부 교수.

박경호 (朴京浩)

1978년 5월 5일생. 2002년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2004년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).

박현택 (朴現澤)

1977년 9월 2일생. 2003년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

문종필 (文鍾鎔)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2002년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동대학원 박사수료. 현재 기초전력연구원 전력시스템연구실 전임연구원.

임상국 (任相國)

1970년 10월 13일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업(학사). 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사과정. 에너지관리공단 수요관리처 대리.

손학식 (孫學植)

1955년 5월 5일생. 2003년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 에너지관리공단 수요관리처장 및 숭실대학교 겸임교수.