

실측치에 의한 전기아크로 고조파 해석 모델 개발

*오동환, **장길수, ***이강완
 *포항종합제철(주), **고려대학교, ***대화기술단

Development of Electric Arc Furnace Model for Harmonic Analysis Using Measuring Data

*Dong Whan Oh, **Gil Soo Jang, ***Kang Wan Lee
 *Pohang Iron & Steel Co.,Ltd., **Korea University, ***DAEHWHA Engineering & Consultants

Abstract - This paper describes development of electric arc furnace model for harmonic analysis, which is based on field data. The proposed model is used to analyze harmonics in actual power system, and the results illustrate the model's capabilities.

1. 서 론

제철소 전기아크로는 비교적 많은 양의 불특정고조파(Non-characteristic harmonics)를 발생하는 복잡한 대형전력 설비이다. 그림1은 전기아크로 개념도 이다. 전기아크로에서 발생된 고조파는 전력케이블, 변압기 및 전력콘덴서 등을 열화 시키고 개폐장치의 고장을 유발하는 등 매우 심각한 전기적 장애를 일으키게 된다.

본 논문은 이와 같이 심각한 전기적 장애를 일으키는 전기아크로 전력시스템에 대한 고조파 해석 및 분석을 위해 실제 측정 고조파 자료를 토대로 전기아크로 고조파 해석 모델을 결정하고 해당 전기아크로 전력계통의 고조파 해석을 실시하여 이의 실용성을 검토한다.

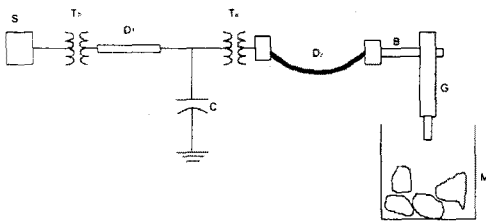


그림1 전기아크로 개념도

2. 전기아크로

그림2는 제철소 전기아크로 전력계통을 나타낸 것이다. 변압기 TR01은 아크로 전력계통 전용 변압기로서 아크로, 필터 및 TCR 용량을 수용할 수 있어야 한다. 아크로에서 발생하는 고조파는 아크로 운전상태에 따라 다르지만 일반적으로 2, 3, 4, 5 및 7 고조파가 대부분을 차지하게 된다. 아크로 조업시 발생하는 고조파의 필터링 및 역률보상을 위하여 수동형 고조파 필터를 설치하고 상불평형 보완 및 아크로에서 발생하는 전기적 동특성 즉 급격한 역률 변화에 의한 전압변동(플리커) 방지용으로 TCR(Thyristor Controlled Reactor)를 갖는 SVC(Static Var Compensator)를 설치하여 운

용한다.

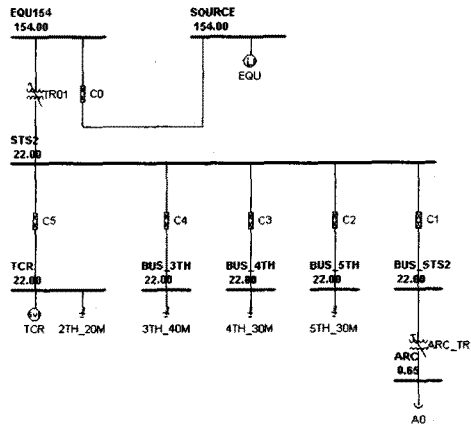


그림2 전기아크로 전력계통도

3. 전기아크로 고조파측정

전기아크로 운전으로 나타나는 전류는 아크점호 지연(Ignition delay) 및 아크의 비선형성저항(Nonlinear resistance) 특성 등으로 인하여 파형이 찌그러지고 또한 매우 불규칙하게 변하는 불평형(Unbalance) 전류이다. 이와 같이 불규칙하게 변동 및 왜곡되는 정도는 음해 초기 단계에 매우 심하고 음해가 진행되어 정련(Refining) 상태가 되면서 비교적 안정된 특성을 나타내게 된다. 따라서 전기아크로 특성을 분석 및 해석하기 위해 전기적 요소를 측정할 경우 아크로 운전 상태를 고려하여 측정하는 것이 바람직하다.

그림3은 제철소 스테인레스 전기아크로에 대하여 음해 초기 단계의 매우 심각한 불평형 및 과도한 고조파가 예상되는 시점에서 전류를 측정한 결과이다. 즉, 그림2 전기아크로 계통에서 C1 선로에 나타난 전류를 측정한 것이다. A상과 C상은 대칭형태로 변화되고 있으나 B상은 매우 불규칙하게 변동하여 다량의 고조파를 함유한 상태이다. 이는 각상별 전극봉과의 스크랩간의 간격이 일정치 아니하여 불평형전류가 흐르거나 용융도중 순간적인 접촉봉과 접촉으로 2상 또는 3상단락에 의한 불평형 단락전류가 흘러 발생한 것이다.

Event waveform/detail

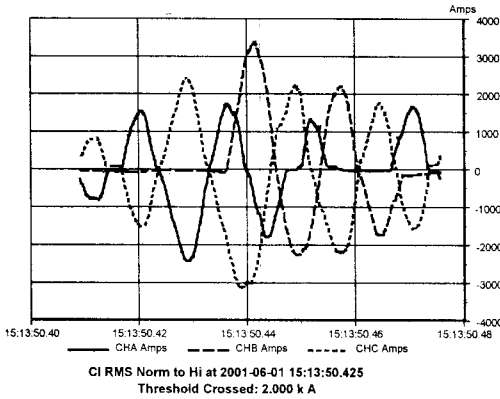


그림3 스테인레스 전기아크로 인해 초기단계 측정 전류

그림3과 같이 측정된 3상 파형을 상별로 푸리에 급수로 전개하면 A상, B상 및 C상 전류는 각각 그림 4, 그림 5 및 그림6과 같다.

Event waveform/detail

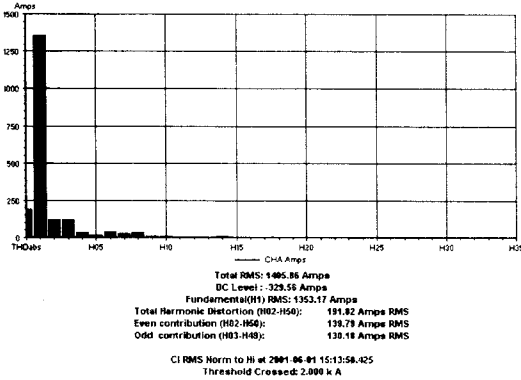


그림4 A상 전류 스펙트럼

Event waveform/detail

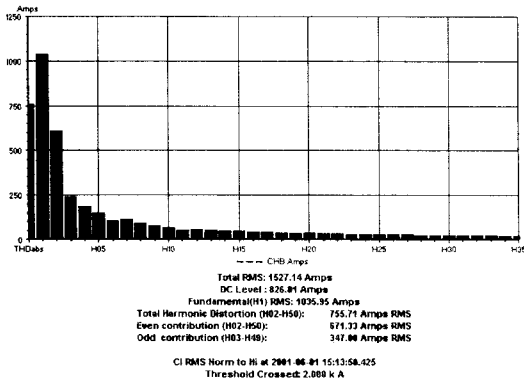


그림5 B상 전류 스펙트럼

Event waveform/detail

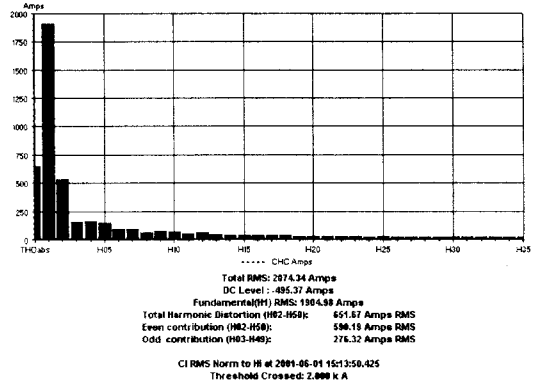


그림6 C상 전류 스펙트럼

4. 전기아크로 고조파 해석 모델

전력계통의 고조파 해석은 전력계통 운전 조건하에서 일반 전류계산과 발생 가능한 조파별 조류계산으로 이루어진다. 따라서 고조파 해석은 대상 전력계통에서 발생 가능한 고조파 범위에 대한 다중 해석이다.

전력계통의 각 요소들은 해당 고조파 어드미턴스를 표현하여 네트워크를 구성토록 하고 고조파 전류원을 삽입하여 해당 조파별 조류계산을 행하여 고조파 전력상태를 해석한다.

각 조파별, 임피던스 매트릭스의 각 행(row)이 계산되고, 단위 전류가 주입되면

$$I(f) = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (1)$$

벡터 $V(f)$ 가 계산된다.

$$Y(f)V(f) = I(f) \quad (2)$$

모선 k에서 테브난 등가 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{zz}(f) = V_k(f) \quad (3)$$

모선 k와 j 간의 전달 임피던스는

$$Z_{ki}(f) = V_j(f) \quad (4)$$

전전류는 다음과 같다.

$$I_k(f) = [Y](V_k - V_j)^t \quad (5)$$

여기서 $[Y]$ 는 노드 j와 k간의 어드미턴스 매트릭스

전기아크로 고조파 해석 모델은 조파별 전류 크기를 나타낸 것이다. 그림 3과 같이 전기아크로에서 측정된 결과로부터 각상의 전류 스펙트럼을 분류해 내면 표1과 같은 다중주파수전류원(Multiple-frequency current source)이 된다.

표1 전기아크로 측정 고조파전류

고조파	A상 전류		B상 전류		C상 전류	
	Amp	%	Amp	%	Amp	%
기본파	1353	100.0	1036	100.0	1905	100.0
2고조파	123	9.1	610	58.9	535	28.1
3고조파	124	9.2	242	23.4	151	7.9
4고조파	35	2.6	187	18.1	166	8.7
5고조파	19	1.4	150	14.5	150	7.9
7고조파	27	2.0	116	11.2	89	4.7
TOTAL RMS	1406		1527		2074	
MVA	53.6		58.2		79.0	

5. 전기아크로 전력계통 고조파 해석

그림7에서 그림14까지는 고조파 해석 결과 고조파가 가장 많이 함유되어 있는 B상에 대한 154kV 및 22kV 모션 전압 및 각전력 설비에 흐르는 전류 상태이다. 여기에 나타난 것과 같이 상전류의 경우 해당 고조파전류가 필터에 다량 유입되고 있으며, 이와 같은 고조파필터 및 TCR 영향으로 인하여 전기아크로 상위 단인 154kV 계통에는 고조파 함유가 적은 것으로 나타나고 있다.

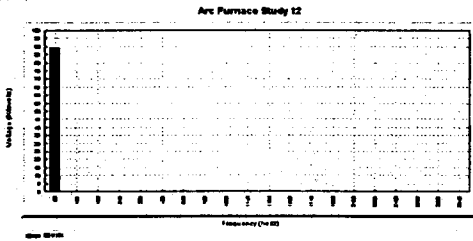


그림7 B상 154kV 모션전압

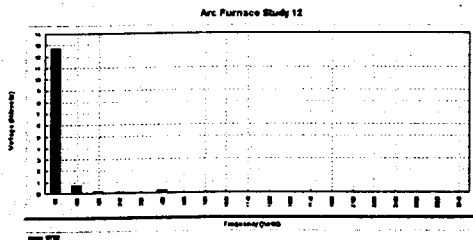


그림8 B상 22kV 모션전압

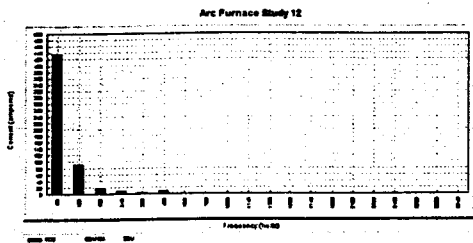


그림9 B상 C0(154kV) 상전류

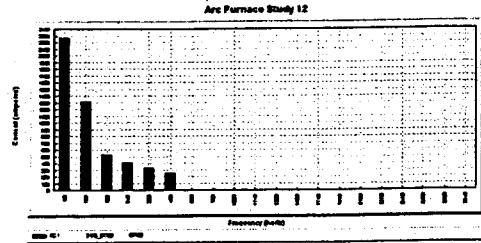


그림10 B상 C1(22kV) 상전류

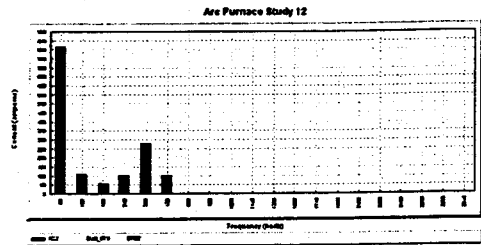


그림11 B상 C2(5고조파필터) 상전류

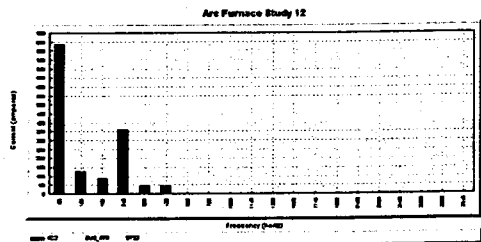


그림12 B상 C3(4고조파필터) 상전류

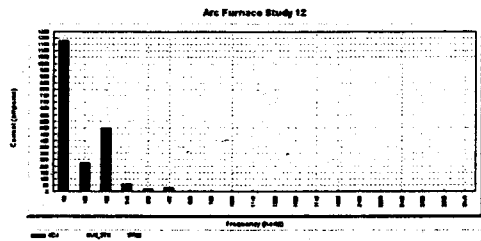


그림13 B상 C4(3고조파필터) 상전류

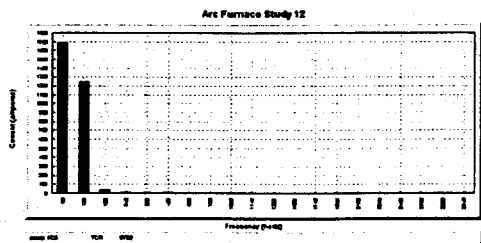


그림14 B상 C5(TCR 및 2고조파필터) 상전류

총고조파왜형(Total Harmonic Distortion)은 전력 계통의 고조파 함유 정도를 나타내는 것으로 다음과 같이 계산된다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1}$$

여기서

M_1 : 기본파 rms 값

M_h : h차 고조파 rms 값

다음 표2는 그림2의 전기아크로 전력계통 고조파 해석 결과로 계산된 전압 및 전류 총고조파왜형(THD)을 나타낸 것이다.

표2 모선전압 THD (단위 : %)

구분	모선명	A상	B상	C상
22kV 모선	STS2	1.77	10.68	5.07
154kV 모선	EQU154	0.0	0.02	0.01

전압의 경우 고조파필터 및 TCR 영향으로 아크로 전 단계인 154kV 모선전압이 정현파에 근접되어 있음을 나타내고 있다.

다음 표3은 고조파 해석 결과 전류 THD를 나타낸 것이다. 아크로에서 발생된 고조파전류가 고조파필터 및 TCR 영향으로 감소되고 있음을 보여준다.

표3 상전류 THD (단위 : %)

구분	선로명	A상	B상	C상
154kV 인출	C0	6.07	38.32	18.23
아크로	C1	13.29	67.72	31.50
5차필터	C2	8.17	43.93	22.81
4차필터	C3	8.14	49.69	23.63
3차필터	C4	16.33	51.71	20.80
TCR 및 2차필터	C5	11.30	69.69	33.39

표4부터 표7까지는 고조파 해석 결과 각 고조파필터 전력 상태를 나타낸 것이다.

이와 같은 고조파 해석결과는 아크로 내부의 순간적인 단락현상이 발생하는 등 매우 불안정한 상태에서 매우 짧은 시간동안의 전류를 대상으로 고조파를 측정하여 입력데이터로 사용한 것이므로 고조파필터용 리액터 및 콘덴서 규격 및 과도시 정격(Transient rating)을 검토할 경우는 아크로가 갖는 특성을 고려하여 저감률(Derating Factor) 등을 적용할 필요가 있다.

표4 2고조파필터 전력상태

구분	정격	A상	B상	C상
kVAR	6666.7	12134.9	25960.5	15021.9
I_{rms} (A)	524.9	718.0	1287.7	868.4
V_{rms} (kV)	12.7	17.0	21.4	18.0
V_{peak} (kV)	18.0	26.9	42.7	32.9

표5 3고조파필터 전력상태

구분	정격	A상	B상	C상
kVAR	13333.3	17003.6	18649.7	17158.2
I_{rms} (A)	1049.7	1195.6	1328.4	1205.2
V_{rms} (kV)	12.7	14.3	14.6	14.3
V_{peak} (kV)	18.0	21.8	26.6	22.9

표6 4고조파필터 전력상태

구분	정격	A상	B상	C상
kVAR	10000.0	11391.2	12261.6	11568.3
I_{rms} (A)	787.3	842.1	937.3	862.5
V_{rms} (kV)	12.7	13.4	13.7	13.6
V_{peak} (kV)	18.0	20.1	24.6	21.7

표7 5고조파필터 전력상태

구분	정격	A상	B상	C상
kVAR	10000.0	10845.7	11431.3	10981.2
I_{rms} (A)	787.3	821.9	894.8	840.2
V_{rms} (kV)	12.7	13.2	13.3	13.2
V_{peak} (kV)	18.0	19.6	23.4	21.0

6. 결 론

제철소 철 생산에 사용되는 전기아크로에서 발생하는 고조파는 가공하는 철의 종류에 따라 그리고 용해 정도에 따라 형태와 크기가 다르게 불특정하게 나타난다. 이와 같은 고조파는 전기아크로 전력계통은 물론 인접 전력계통에 심각한 전기적 장애를 일으킨다.

전기아크로 전력계통 및 인접 전력계통에 장애가 발생하면 고조파 해석을 통하여 장애 현상을 분석하고 장애 해결 방안을 모의하여 대책을 수립하게 된다. 특히 전기아크로에 의해서 전기적 영향을 받을 것으로 예상되는 전력설비 신설, 증설 및 변경시에는 사전에 고조파 해석을 수행하여 고조파 장애 발생 가능성 분석은 물론 필요한 경우 고조파에 의한 장애를 배제하기 위해 대책 수립이 필요하다. 본 논문에서는 주어진 전력계통에서 전기아크로 인출점의 고조파를 측정하여 이를 해석 모델로 사용하여 고조파를 해석하고 이미 설치되어 운전되고 있는 고조파필터 들의 전기적 내력을 분석한 사례를 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Gilsoo Jang, Weiguo Wang, G.T.Heydt, S.S.Venkata, Byongjun Lee "Development of Enhanced Electric Arc Furnace Models for Transient Analysis", Electric Machines and Power Systems, accepted for publication in Nov. 2001
- [2] 이강완 "전력계통 해석" 전력기술인, 전력기술인협회, 통권218회, P37-40, 2000년 10월호
- [3] "PSAF for Windows User's Guide and Reference Manual" CYME International Inc., March 2001
- [4] S.Ashmore "Power Compensation of AC & DC EAF" Electric Furnace Conference Proceedings 1993
- [5] Richard F. Dudley "Special Design Consideration for Filter Banks in Arc Furnace Installtions" IEEE Trans.ind.Applicat.vol33 no.1 1997