

Development of a Fault Diagnosis Algorithm on a High Current Cable of Arc Furnace

張 惟 進^{*} · 金 相 禹^{*}
(Yu Jin Jang · Sang Woo Kim)

Abstract - In the steel industry, a steel melting electric arc furnace is used to produce both carbon and alloy steels. Steel scrap which is charged into the furnace is heated by means of electric arc between graphite electrodes and the scrap. In this melting process, current is supplied to the furnace through HCC(high current cable) which connect the furnace and transformer. Four HCCs are assigned to each phase in our system to divide the current. Since a sudden cable breaking result in the shutdown of melting process, an aging detection of HCC is very important for both an improvement of productivity and cost reduction. In this paper, the aging of the HCC is estimated by using the current ratio between four HCCs.

Key Words : Arc Furnace, HCC, Diagnosis, Current Ratio

1. 서 론

철강산업에서 상당부분의 철 생산을 담당하는 전기로는 원료로 들어온 고철과 흑연 전극봉 사이에 아크를 발생시켜 높은 온도로 철을 녹이는 설비이다.[1] 이러한 아크를 발생시키기 위해 전기로에 노용 변압기를 연결하여 높은 전류를 공급하고 있으며 대전류 케이블(High Current Cable, 이하 HCC)은 이 둘 사이의 연결을 담당하는 수냉식 케이블이다. 이 HCC는 수백 가닥의 소선들로 이루어져 있으며 열화, 케이블의 물리적인 흔들림 등의 요인으로 서서히 끊어지기 시작한다. 갑작스런 HCC의 단선은 전기로 조업 중단으로 이어져 상당한 손실이 발생한다. 따라서 높은 생산성과 원가절감을 위해 HCC의 교체시기를 정확히 예측하는 것은 매우 중요한 일이다. 현재 POSCO에서는 HCC의 유입/유출 냉각수 온도 추이를 관찰하다가 그 차가 일정수준 이상이 되면 HCC에 심각한 손상이 발생했다 여기고 HCC를 교체하는 방법을 채택하고 있다. 또한 3상 전원의 각 상마다 4개의 HCC를 할당하여 전기로로 공급되는 전류를 나누고 있으며 냉각수는 HCC를 2개씩 묶어 공급하고 있다. 이러한 구조적인 문제로 인해 HCC의 심각한 손상에 대해 냉각수의 온도가 일정수준 이상 올라갔을 때 손상된 HCC를 정확히 골라낼 수가 없으며, 교체 이력을 참고하여 현장에서의 육안관찰에 의해 손상된 HCC를 골라내고 있다. 또한 이러한 방법은 HCC에 손상이 서서히 생기는 상황에서는 이상 징후를 발견할 수 없는

단점이 있다. 즉, HCC에 심각한 손상이 발생한 상태에서만 이상 징후가 발견되기 때문에 이에 대처할 시간적 여유가 부족하게 된다.

이러한 필요에 따라 본 논문에서는 각 상에 배치된 4개의 HCC에 흐르는 전류 정보를 이용해서 HCC들의 상대적인 노화 정도를 예측해 볼 수 있는 알고리즘을 제안한다.

2. 시스템 구조

2.1 AC 아크 전기로 구조

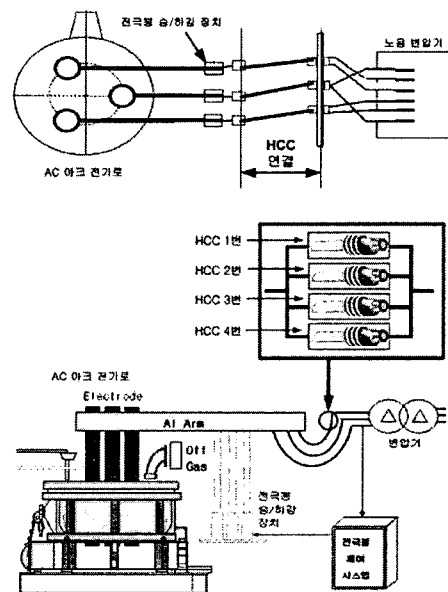


그림 1. AC 아크 전기로 구조
Fig. 1 Structure of an AC arc furnace

* 교신저자, 正會員 : 東國大學 情報通信工學科 助教授 · 工博
E-mail : season@dongguk.ac.kr

* 正會員 : 浦項工科大学 電氣電子工學科 部教授 · 工博
接受日字 : 2005年 11月 30日
最終完了 : 2006年 2月 8日

표 1. 전기로 HCC 설치현황

Table 1 Specification of several HCCs

구 분	POSCO			INI(포항)			
	STS1	STS2	STS3				
변압기 (MVA)	70	85	85	45/54	65	95	120
2차전류 (KA)	65	70	70	43	34	45	60
사용수명 (년)	0.8	1	0.8	5	5	8	10

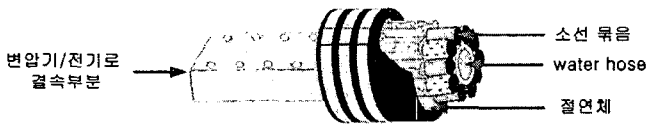


그림 2. HCC 구조
Fig. 2 Structure of HCC

그림 1은 POSCO 스테인레스 1제강 공장 전기로(STS1)의 전체적인 구성을 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 전기로와 노용 변압기 사이를 수냉식 HCC를 이용해 연결하고 있으며 전기로로 공급되는 전류는 각 상별로 그림과 같이 배치된 4개의 HCC를 통해 나뉘고 있다. 본 논문에서는 이 전기로의 HCC 전류 데이터를 수집해 HCC들의 상대적 손상 정도를 예측하는데 사용한다.

2.2 HCC 구조

아크 발생을 위한 전류량은 전기로의 용량에 따라 수십 KA에 이르므로 이러한 대 전류를 전송하기 위한 케이블은 도체에 의한 발열을 억제하며 유연하여야 하므로 수냉식 케이블을 사용한다. 이러한 수냉식 HCC는 그림 2와 같이 절연체 내부에 유연성 확보를 위한 여러 소선들과 냉각을 위한 water hose로 구성되어지며 이 케이블은 변압기 2차 버스 와 전기로 전극봉 전단 2차 도체 양단에 접속된다. [2]

현재 이 HCC의 수명은 표 1과 같이 전기로 사양에 따라 상이하지만 통상 일반 전력케이블의 설계 예상수명이 30년인데 비해 HCC는 길게는 10년이며 대부분 1년 안팎이다. 따라서 대 전류를 흘리기 위한 HCC의 적절한 교체시기 설정이 제품 생산성 향상 및 원가절감에 중요한 요소로 작용한다.

3. HCC 전류 데이터 수집

현재 HCC에 연결된 센서와 데이터 표시장치 사이의 관계는 그림 3과 같다. HCC에 흐르는 전류의 양을 파악하기 위해 HCC 주변에 로그스키코일 전류센서를 사용하였다. 전류 센서에서 나오는 출력은 1~10V의 AC 전압이며 이 전압이 AC/DC 컨버터를 거쳐 DC 전압으로 바뀐다. 이 DC 전압을 4~20mA의 DC 전류로 변환시켜 데이터 수집 장치의 입력으로 보내게 된다. 이 전류는 데이터 수집 장치 내부에 설치되어있는 저항을 거치게 되며 이 저항 양단에 나타나는 전압을 디지털 신호로 변환하여 PC에서 수집하게 된다. 이때 1KHz 간격으로 데이터를 샘플링하고 매 1000개의 데이터마

다 RMS 값을 계산해서 PC에 저장했다.

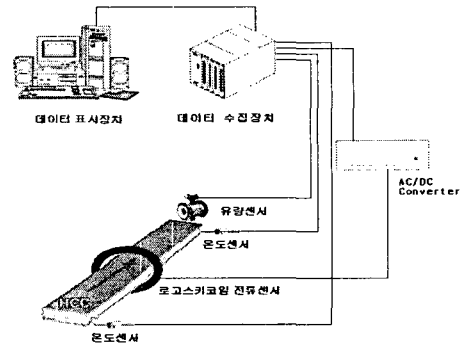


그림 3. 데이터 수집 시스템 구성도
Fig. 3 Data collection system

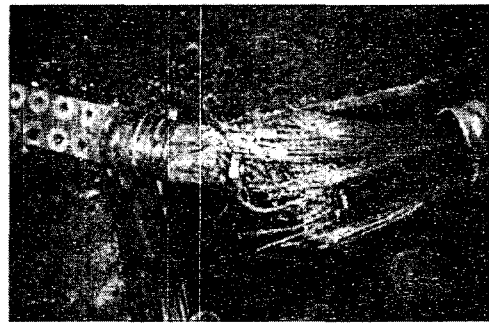


그림 4. 손상된 HCC
Fig. 4 Damaged HCC

4. 고장진단 알고리즘

4.1 HCC의 소선 손상에 따른 상태변화

도체의 저항은 도체의 길이가 일정할 때 그 단면적에 반비례한다. [3]

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{1}$$

(ρ : 고유저항, A : 단면적, l : 길이)

HCC의 유효 단면적은 수백 가닥의 소선들의 단면적의 합으로 이루어져 있는데 전기로 운전을 반복함에 따라 HCC의 소선이 조금씩 끊어지기 시작한다. 그림 4는 이러한 손상이 누적되어 심한 손상을 입은 HCC의 사진이다. 식 (1)에 의해서 같은 개수의 소선이 끊어질 때 HCC의 저항 증가량은 현재 HCC의 손상 정도에 따라 달라짐을 알 수 있다. 즉, HCC의 손상이 심할수록 같은 개수의 소선이 끊어 졌을 때 저항 증가량이 크다.

4.2 고장진단 알고리즘

전기로 조업 시 아크와 고철 사이의 거리가 불규칙하게 변함으로 인해 HCC에 흐르는 전류가 불규칙하게 변한다. [1] 또한 같은 상에 배치된 4개의 HCC의 소선이 점차적으로 끊어지기 시작하면서 HCC에 흐르는 전류는 더욱 복잡한 양상으로 변화한다. 그러나 각 상에 할당된 4개의 HCC에 흐르는

표 2. HCC 저항 변화

Table 2 Variation of resistance of HCC

구 분	시각: t	시각: $t+1$
HCC 1번 저항	R_1	$R_1 + \Delta R_1$
HCC 2번 저항	R_2	$R_2 + \Delta R_2$
HCC 3번 저항	R_3	$R_3 + \Delta R_3$
HCC 4번 저항	R_4	$R_4 + \Delta R_4$

전류의 비율 변화는 각 HCC들의 상대적 손상에 대한 정보를 줄 수 있다. 이를 이용하여 어떤 HCC의 노후화가 빠르게 진행되고 있으며 가장 먼저 끊어지는 HCC가 어떤 것이 될지 예측할 수 있다.

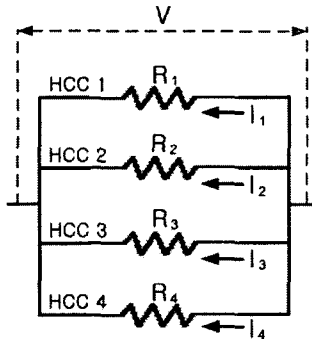


그림 5. HCC 저항 모델

Fig. 5 Simple HCC model with resistance

각 상에 할당된 4개의 HCC를 그림 5와 같이 저항을 이용해서 나타내자. 여기서 HCC 양단에 걸리는 전압 V 는 시간에 따라 변하지만 4개의 HCC에는 동일한 전압이 인가된다. 따라서 각 HCC에 흐르는 전류 I_n , ($n=1, 2, 3, 4$)은 다음과 같이 계산된다.

$$I_n = \frac{V}{R_n}, \quad (n=1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

식 (2)에서 V 와 R_n 의 크기를 모르기 때문에 측정된 I_n 의 크기는 별다른 의미를 주지 못하며 다만 측정된 전류의 크기가 작은 순서로 HCC의 저항이 크다는 정보만을 제공해 준다. 또한 전혀 손상을 입지 않은 HCC들이라 할지라도 각각의 저항이 이상적으로 동일할 수는 없다. 따라서 측정 전류의 크기만으로는 어떤 HCC의 손상이 빨리 진행되고 있는지 파악할 수 없다. 그러나 각 HCC에 흐르는 전류의 비율과 그 비율의 변화량에 대한 정보를 이용하면 HCC들의 시간에 따른 상대적인 손상 정도를 파악할 수 있다.

표 2와 같이 시각 t 에서 $t+1$ 로 변할 때 각 HCC의 저항이 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ 만큼 변했다고 가정하자. 그러면 시각 t 에서의 전류비는 다음과 같이 표현된다.

$$I_1 : I_2 : I_3 : I_4 = 1 : \frac{R_1}{R_2} : \frac{R_1}{R_3} : \frac{R_1}{R_4} \quad (3)$$

또한 시각 $t+1$ 에서의 전류비는 다음과 같이 표현된다.

$$I_1 : I_2 : I_3 : I_4 = 1 : \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 + \Delta R_2} : \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_3 + \Delta R_3} : \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_4 + \Delta R_4} \quad (4)$$

따라서 전류 비율의 변화량 $\Delta(I_n/I_m)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\left(\frac{I_n}{I_m}\right) = \left(\frac{I_n}{I_m}\right)_{at(t+1)} - \left(\frac{I_n}{I_m}\right)_{at(t)} = \frac{R_n \Delta R_m - R_m \Delta R_n}{R_n(R_n + \Delta R_n)} \quad (5)$$

$$(m, n = 1, 2, 3, 4, m \neq n)$$

식 (5)에서 $\Delta(I_n/I_m) > 0$ 이면 다음 식을 만족한다.

$$\Delta R_m > \frac{R_m}{R_n} \Delta R_n \quad (6)$$

식 (6)에서 $R_m/R_n \geq 1$ 이면 $\Delta R_m > \Delta R_n$ 임을 알 수 있다. $R_m/R_n < 1$ 인 경우에는 ΔR_m 과 ΔR_n 의 크기를 비교할 수 없지만 $(R_m + \Delta R_m)/(R_n + \Delta R_n) \geq 1$ 을 만족할 때 $\Delta R_m > \Delta R_n$ 임을 알 수 있다. 그 외의 경우에는 ΔR_m 과 ΔR_n 중 어느 것의 크기가 큰지 알 수 없다. $\Delta(I_n/I_m) = 0$ 인 경우, $R_m/R_n = 1$ 이면 $\Delta R_m = \Delta R_n$ 이고, $R_m/R_n > 1$ 이면 $\Delta R_m > \Delta R_n$ 이고, $R_m/R_n < 1$ 이면 $\Delta R_m < \Delta R_n$ 이다. 또한 $\Delta(I_n/I_m) > 0$ 이면 $\Delta(I_m/I_n) < 0$ 이며 이것은 식 (6)과 동일한 조건이다. 따라서 ΔR_m 과 ΔR_n 의 상대적인 크기를 비교하기 위하여 $\Delta(I_n/I_m) \geq 0$ 인 경우만 살펴보면 된다.

위의 방법을 적용하면 다음과 같은 경우가 발생한다.

- case ① 4개의 저항 증가량($\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$)중 가장 큰 것을 정할 수 있는 경우
- case ② 4개의 저항 증가량 중 크기가 작은 하위 2개를 정할 수 있으나 상위 2개의 크기 순서가 판별 불가능하거나 같은 경우
- case ③ 4개의 저항 증가량 중 가장 작은 것을 정할 수 있으나 상위 3개의 크기 순서가 판별 불가능하거나 같은 경우
- case ④ 그 외의 경우

HCC n 번의 상대적 노화 정도를 나타내는 변수를 HCC_n_Cost , ($n=1, 2, 3, 4$)라 정의하고 표 3에 나타낸 기준을 적용해서 이 변수를 갱신하자. 일정 기간 동안 누적된 HCC_n_Cost 값이 클수록 HCC n 번이 상대적으로 노화가 많이 진행되고 있다고 판단할 수 있다. 표 3과 같은 기준을 적용하면 상태가 나쁜 2개의 HCC를 쉽게 구별할 수 있다.

4.3 실험결과

POSCO 스테인레스 1제강 공장 전기로에서 05년 11월 말 첫번째 상에 할당된 4개의 HCC중 3번 HCC가 조업 중 단선될 때까지 약 44일간의 데이터를 수집하였다. 전술한 바와 같이 각 HCC에 흐르는 전류는 4~20mA의 DC 전류로 변환

표 3. HCC_n_Cost 갱신 기준

Table 3 Update rule of HCC_n_Cost

구 분	갱신 기준
case ①	가장 큰 저항 증가량을 보이는 HCC의 변수만 1 증가시킴 단, 모든 저항 증가량이 동일하면 모든 HCC의 변수를 1 증가시킴
case ②	저항 증가량이 큰 상위 2개 HCC의 변수들만 0.5 증가시킴
case ③ case ④	모든 HCC의 변수를 증가 시키지 않음

되어 데이터 수집 장치로 보내지며, 그림 6에서는 단선 전/후 각 HCC에 흐르는 전류에 대응되는 DC 전류를 그래프로 나타내었다. 이 그림에서 3번 HCC가 단선되면서 해당 HCC의 전류가 급격히 떨어지고 나머지 HCC들의 전류가 증가하는 보편적으로 예상되는 현상을 관찰 할 수 있다. 본 논문에서 제안한 알고리즘을 3번 HCC가 단선되기 전까지 수집된 데이터에 적용하여 표 4와 같은 결과를 얻었다. HCC 4번, 3번, 2번, 1번의 순서로 HCC_n_Cost의 값이 크게 나타났으며 HCC 1번과 2번에 비해 3번과 4번의 값이 상당히 큼을 알 수 있다. 이 값이 큰 순서로 노후화가 빨리 진행되고 있다고 예상 할 수 있으며, 그 결과 4번 HCC가 먼저 단선되리라 예상되었지만 실제로는 3번 HCC가 단선되었다. 그림 6을 살펴보면 단선되기 직전까지 4번 HCC에 흐르는 전류가 평균적으로 가장 낮음을 알 수 있으며 이는 4번 HCC의 상태가 가장 나쁨을 알려준다. 한편 HCC는 전기로 조업시 기계적인 움직임을 반복하기 때문에 거의 대부분의 단선이 HCC 연결 부분에서 발생한다. 3번 HCC의 단선은 노후화가 많이 진행된 3번과 4번 HCC 중 3번 HCC가 전기로 조업시 발생하는 HCC의 기계적인 움직임에 의하여 갑자기 단선되었다고 추정할 수 있다. 그림 7은 단선 발생 후 4개의 HCC를 해체한 사진을 보여주고 있다. 3번 HCC는 단선되었으며, 4번 HCC는 육안 관찰로 대략 30% 이상 손상을 입었으며, 1번과 2번 HCC는 3번과 4번 HCC에 비해 손상이 미미함을 알 수 있었다. 제안된 알고리즘으로 이러한 갑작스러운 단선을 예측할 수는 없지만 3번과 4번 HCC가 1번과 2번 HCC에 비해 상당히 빠

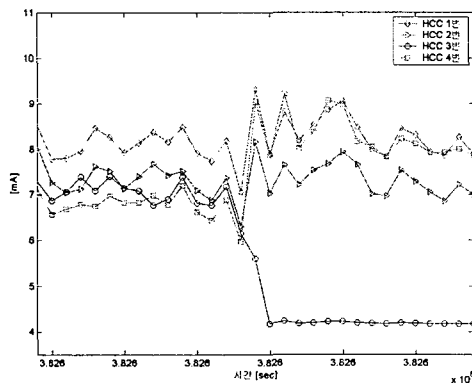


그림 6. 단선 발생시 전기로 HCC 전류 데이터
Fig. 6 Current data when HCC is snapped

른 노후화의 징후를 보임을 알려줄 수 있다. HCC의 냉각수 온도 상승은 그림 6과 같은 단선 발생 후 상당 시간이 흘러야 나타나지만 전류 레벨을 관찰하면 보다 빨리 단선된 HCC와 단선 시점을 정확히 알 수 있다. 또한 제안된 알고리즘을 이용하면 전류 레벨을 이용한 판별법에 앞서 미리 단선 가능성이 높은 2개의 HCC를 제시 할 수 있으며 단선 상황에 대비할 수 있는 시간적 여유를 제공할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 HCC에 흐르는 전류량의 비를 이용하여 HCC들의 상대적인 손상정도를 파악할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 현재 제강 공장에서는 HCC가 손상됨에 따라 조업 중 증가하는 케이블의 냉각수 온도로 교체시기를 예측하고 있다. 이러한 방법에 전류 레벨을 이용한 관찰과 제안된 알고리즘을 추가로 적용하면 보다 향상된 케이블 교체시기 예측을 할 수 있을 것이다. 보다 다양한 상황에서의 제안된 알고리즘의 검증을 위한 데이터 수집이 POSCO 스테인레스 1제강, 3제강 공장에서 계속 진행 중이다.

표 4. 실험결과

Table 4 Result

HCC_1_Cost	HCC_2_Cost	HCC_3_Cost	HCC_4_Cost
0.0070×10^5	0.7029×10^5	3.8435×10^5	9.1211×10^5

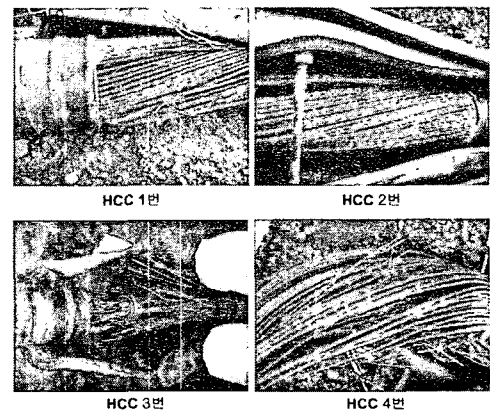


그림 7. HCC 해체 사진
Fig. 7 Dismantled HCCs

감사의 글

본 연구는 동국대학교 논문게재 장려금 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

[1] 南條敏夫,川端純一,山田降光,深谷智章, "아크로의 전력 유효 이용과 생산성 향상(2)", 工業加熱, 日本工業爐協會, Vol 34, No.3, pp. 11-24, 1997.

[2] High Current Cables, Flohe GmbH & Co. Catalogue No. 4. 1998.

[3] David Halliday and Robert Resnick, "Fundamentals of Physics", John Wiley & Sons, p. 647, 1988.