

점점 개방시 직류 접촉기의 아크 형성과 소호 시간 예측법

조현길*, 이은웅**, 김준호*
 LG산전*, 충남대**

Time Estimation of Forming and Extinguishing Arc
 in the dc Contactor at Opening Contacts

HYun-Kil Cho*, Eun-Woong Lee**, Jun-Ho Kim*,
 LGIS*, Chungnam Nat'l. Univ.**

Abstract - This paper describes the phenomenon of the molten metal bridge theory of the arc discharge at opening contacts. And we analyze the magnetic force and drag force acting on the arc column in the DC magnetic contactor. Arc cooling time by the force convection is calculated in the thermal dynamic equation using mean temperature method. Since arc gas lost conduction characteristics below a such temperature, it verify that the process of forming and extinguishing arc is able to analyze in terms of temperature characteristic by simulation and experiments of the 3 types arc extinction unit. It propose the practical simulation method to improve the electrical endurance of dc contactor.

1. 서 론

상용 스위칭 소자의 특성은 소형화, 경량화, 고신뢰성화와 장수명으로 정의된다. 신뢰성 향상과 장수명 연장은 아크 시간동안 발생된 열을 신속히 방출시킬 수 있는 아크 소호부 능력에 의하여 실현될 수 있다. 아크 정유 시간은 스위칭 소자의 부하 조건과 운전 조건에 의하여 크게 영향을 받는다. 스위칭 소자의 운전 조건과 아크 거동은 전기적 스트레스(Electrical stress), 자기력(Electromagnetic force), 정전력(Electrostatic force), 기계적 스트레스와 점점의 바운싱(Bounce)으로서 스위칭 소자에 영향을 미친다. 점점 바운싱은 점점 소재 탄성력과 전자력에 의한 점점의 운동 속도에 의하여 구조적으로 발생한다. 스위칭 소자를 폐로하는 초기에 큰 전류가 흐른다면 점점 바운싱은 새로운 스위칭 동작을 하는 것과 같은 결과를 초래하여 점점의 많은 소모를 가져온다. 그러므로, 점점의 수명 연장을 위하여 T.S Davies씨는 가동점점을 움직이는 가동자 여자코일에 의한 자속을 제어함으로써 점점의 바운싱을 감소하는 방법을 제시하였다.[1][2]

또한, 점점 개방 속도 1m/s 이하인 차단기의 자계에 의한 가스 dynamic force와 아크근(root)이동 경로를 조사하여 회로의 단락고장시 아크 배출과 자기력의 관계를 조사하므로써 차단 성능을 높일 수 있는 방안 제시하였다. [3]

점점 재질은 녹는 점과 전도율을 결정하는 중요 요인으로 접촉 신뢰성과 수명에 직접적으로 영향을 끼친다. 점점의 재질, 접촉 압력과 바운싱에 의하여 점점 erosion의 변화를 조사함으로써 신뢰성을 증대하기 위한 재질 선정법이 제시되었다.[4]

직류 아크를 차단하는 접촉기의 접촉저항의 안정성과 수명에 향상하기 위하여 아크 차단 특성에 관한 연구가 제안되고, 실험에 의하여 점점의 재질에 따라 아크의 온도

가 다르게 됨이 제시되었다.[5] 은 계열의 점점 성분으로 재질은 달라도 아크 분포 형태는 점점의 동일하게 변화하는 것이 제안되었다.

본 고는 직류 스위칭 소자의 소형화, 경량화, 신뢰성 향상과 수명향상을 위하여 직류회로의 차단하는 순간 신속히 아크를 소호하기 위하여 아크 소호부의 구조를 제안하고자 한다. 아크 발생 수순을 이론적으로 정립하고, 아크 소호 원리 인자로서 자기력이 미치는 영향을 이론적으로 정립하고자 한다.

2. 아크 형성과 소멸

2.1 점점점 에너지

짧은 아크에 있어서 아크 에너지의 대부분이 접촉점으로 부터 방출되고 많은 에너지가 전극에 전달된다.

점점 개방시 방출되는 에너지는 아크를 형성하고, 점점 비산은 아크 가스 엔탈피 변화에 중요한 파라미터이다. Ag 합금 구성은 Ag 함유량에 비하여 첨가 성분의 함유량이 현저히 작으므로 열운동 관점에서 순수 은(Ag)과 동일한 거동을 가지는 것으로 가정한다. 점점이 비산 할 때 가지는 엔탈피 변화 과정은 다음과 같은 7단계로 가정한다.[2][5]

Stage 1. 금속이 용점까지 가열 과정

그림 1과 같은 구조를 가지는 접촉구조에서 점점을 개방하는 순간 contact spring의 하중은 감소하고, 접촉 저항은 증가한다. 전류가 증가하는 접촉 저항을 통과하여 점점의 온도는 증가하게 된다. 점점온도의 함수로 고체 금속 비열(C_{ps})은 식(1)과 같이 표현된다.[5]

$$C_{ps} = A + BT + CT^2 + DT^{-2} \quad (1)$$

Ag는 $A = 21.30J \text{ mol}^{-1}k^{-1}$,
 $B = 8.54 \times 10^{-3}J \text{ mol}^{-1}$, $C = 0$,
 $D = 1.51 \times 10^5 J \text{ mol}^{-1}k$ 이다.

Ag용점(T_m)은 1234K, 용점에서 $C_{ps} = 295J \text{ kg/K}$, 최초 상온(T_s)는 293K이다.

최초 온도에서 용점까지 금속 가열의 엔탈피 변화는 식(2)와 같다.

$$\Delta h = \int_{T_s}^{T_m} C_{ps} dT \quad (2)$$

Stage 2 : 점점의 용융 상태

Ag의 용해 엔탈피는 $102.315 \times 10^3 J \text{ kg}$ 이다.

Stage 3 : 금속의 용융 상태

온도(T) 함수로 용해 금속의 비열 C_{pl} 은 식(3)과 같다.

$$C_{pl} = A + B + CT^2 + DT^{-2} \quad (3)$$

$A = 30.55 J \text{ mol/K}$, $B = 0$, $C = 0$, $D = 0$ 이다.

Ag 금속의 끓는점 온도(T_b)는 2400K이고, 끓는점에서 Ag의 비열은 $283 J \text{ kg/K}$ 이다. 금속에 열을 가하여 끓는 점에 도달할 때까지 엔탈피 변화는 식(4)와 같다.

$$\Delta h = \int_{T_m}^{T_b} C_{pl} dT \quad (4)$$

Stage 4 : 금속의 기화 현상

점점 비산시 엔탈피는 $2362 \times 10^3 \text{ J/kg}$ 이다.

Stage 5 : 가스 가열

일반적으로 아크 온도는 $10,000\text{--}20,000\text{K}$ 의 영역으로 측정되고 아크 소호부를 통과하는 가스의 흐름은 $3000\text{--}4000\text{K}$ 정도인 것으로 파악된다.[8]

이 온도에서 이온화 준위는 상대적으로 낮고 엔탈피에 대한 기여는 무시된다. 완전한 가스 거동을 가정하면 엔탈피 변화는 식(5)와 같다.

$$\Delta h = C_v \Delta T + PV \quad (5)$$

$$\Delta h = C_v \Delta T + R \Delta T$$

여기서, C_v :비열/체적, P: 압력, V:체적, R: 이상 기체 상수(Ag의 경우, 76.98kg/K), $\gamma = C_p/C_v$ (Ag의 경우, 5.98×10^{-3}), $C_v = 47.29\text{kJ/kg/K}$ 이다.

점점을 개방하는 순간 접촉부에 집중되는 에너지는 모두 아크 형성에 소요되는 것으로 가정하면 아크 발생 에너지는 식(6)과 같다.

$$P_{arc}(t) = I(t) \cdot V(t) \quad (6)$$

여기서, $V(t)$ 는 점점 사이에 개방 순간의 전압강하이다. 식(6)의 아크 에너지는 점점을 개방하는 순간 점점을 녹이는데 아크를 생성하고 점점의 가열하는데 소요되는 것으로 가정하고 식(6)과 식(7)을 등식으로 하면 초기 가스의 온도 추정이 가능하다.

$$P_{arc}(t) = \frac{dh}{dt} = \left(\int_{t_1}^{t_m} C_{ps} dT + \Delta h(\text{melting}) + \int_{t_m}^{t_n} C_{pd} dT + \Delta h(\text{boiling}) + \int_{t_n}^{T_c} C_p dt \right) \cdot \frac{dm}{dt} \quad (7)$$

여기서, $\frac{dm}{dt}$ 는 가스의 질량 변화비이다.

Ag 가스 밀도는 식(8)과 같이 정의된다.

$$\frac{P}{\rho_{Ag}} = R_{Ag} \cdot T \quad (8)$$

여기서, R_{Ag} 는 Ag가스의 이상기체 상수이다. 가스의 시간당 체적 변화는 식(9)와 같다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\rho_{Ag}} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (9)$$

점점의 개방 속도와 접촉 단면적 S_{cont} 를 가정하면 식(10)이 성립한다.

$$u_z = \frac{1}{S_{cont}} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

점점의 개방속도 u_z 는 전자 흡인력과 스프링 상수의 운동 방정식을 계산하여 얻는 것과 실측에 의하여 구할 수 있다.

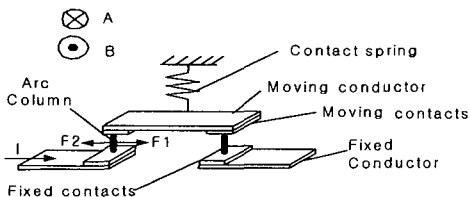


그림 1 점점의 접촉 압력과 아크 방전

2.2 아크 주의 운동

아크 전류에 의하여 발생하는 자속 밀도를 B_{ya} , 영구 자석의 자속밀도를 B_{yp} 라고 하면 아크 전류에 미치는 로

렌즈 힘은 식 (11)과 같다.

$$F_e = \int_{V_a} \{ \bar{J}_a \times (\bar{B}_{ya} + \bar{B}_{yp}) \} dV_a \quad (11)$$

여기서, V_a 는 아크 영역의 체적, \bar{J}_a 는 아크 전류밀도이다. 힘 F_e 에 의하여 아크는 구동되고, 유체의 운동에 반항하는 Drag force가 식(12)와 같이 작용한다.

$$F_d = \frac{1}{2} C_D \rho D U^2 \quad (12)$$

u 는 아크의 이동 속도, ρ 는 가스 밀도, D는 아크의 직경이다. 여기에서 $C_D = 0.62 * \left(\frac{1}{D} \right)^{0.12}$ 는 Drag 계수이다.

아크 운동방정식은 아크 구동력과 Drag Force가 같게 되는 식(13)으로 나타낸다.

$$F_e = F_d \quad (13)$$

식(11), (12)로 되는 식 (13)에서 속도 U를 구할 수 있다.

2.3 아크 냉각

P. Adre와 L. Brunet는 플라스마 토치 설계를 연구하며 온도에 따라 아크의 도전율이 달라짐을 밝혔다. 아크 온도가 6000K 이하가 되면 도전율을 상실하고, 6000K 에서 $15,000\text{K}$ 사이에서 $0\text{--}10,000\text{ }^{\circ}\text{m}^{-1}$ 의 도전율을 가진다.[6] 5m/s 을 초과하는 강제 대류가 발생하는 열 해석 문제에서 전도, 복사열의 영향을 무시할 정도이므로 고려하지 않으면 식(14)과 같이 단순화된 강제 대류문제가 된다.[7]

$$\gamma A \left(\frac{dT}{dt} \right) = \pi D h_{con} (T - T_a) \quad (14)$$

여기서, γ 는 가스 밀도이고, c는 가스 도체의 비열, A는 단면적, D는 아크 직경, T_a 는 주위 온도이다. 강제 대류는 계수는 무차원 열전달 계수 Nusselt수 Nu_m 을 이용하여 유체 열전도 전달 비로 해석될 수 있다. [8]

$$Nu_m = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{NEcRePr} (1 - e^{-5.33NEc})^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

여기서, $Ec = \frac{u^2}{C_p dT}$, $Re = \frac{uD}{\mu}$, $N = \frac{\sigma B_y^2 D}{C_p dT}$ 이고, σ :아크 도전율, μ : 점성계수, D: 아크직경, u: 아크 이동 속도, B_y 는 자기 구동력을 갖도록 하는 자속밀도, C_p 는 아크 가스의 비열이다. 형상이 원통형인 것에 대한 Nusselt number와 대류계수 사이의 관계는 식 (16)과 같다.

$$Nu_m = \frac{H_{con} \cdot D}{k} \quad (16)$$

여기서, k는 비열상수 이다.

3 시뮬레이션과 실험

3.1 시뮬레이션

그림 2에 점점 개방시 나타나는 현상을 관측하기 위한 아크 소호 unit 모델을 나타내었다. 점점의 개방 속도와 아크 소호 공간, 스프링 접촉 압력이 3가지 형태 모두 동일하다. 모델1은 아크주에 의한 자속밀도만이 아크 전류와 쇄교하고, 모델2는 영구 자석에 의한 외부자계가 작용한다. 모델 3은 그리드를 분할하여 모델2보다 자속

밀도를 높게하였다. 모델 외형 크기는 가로, 세로, 높이 각각 18, 18, 32이며, 그리드의 두께는 1.2mm이며, 그리드 사이에 분할된 gap은 5mm이며, 접점재질은 AgCdO이며, 모델 2와 모델 3에서 아크와 쇄교하는 외부자계 자속밀도는 각각 20mT와 60mT이다.

그림3.(a)는 아크 전류가 0에서 100A까지 변화하는 경우에 모델 1, 2, 3 아크 구동 속도를 나타내었다. 100A 전류에서 모델1, 2, 3의 속도는 각각 9m/s, 22m/s, 37m/s 이다.

그림3 (b)는 아크 구동 속도 변화에 따른 강제 대류 계수를 변화를 나타내었다. 강제 대류 계수는 속도 9 m/s, 22m/s, 37m/s에서 각각 16, 32, 50이 되었다.

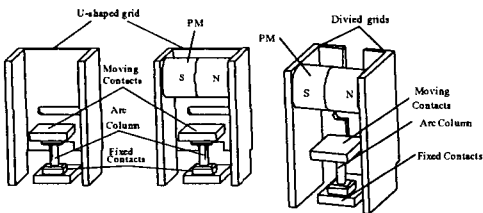
그림 3(c)는 대류 계수 변화에 따른 아크 냉각 시간을 나타내었다. 아크 가스가 도전성을 상실하여 모델 1, 2, 3의 아크 소호가 이루어지는 예측시간은 각각 16ms, 11ms, 6ms로 추정되었다.

3.2 실험 결과

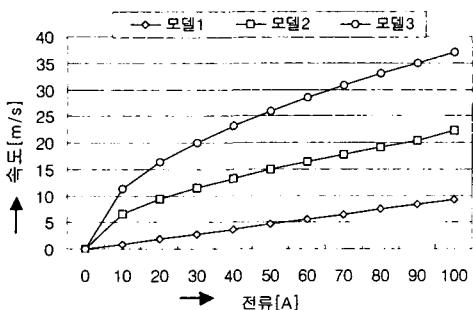
각 모델의 실험은 전자 접촉기의 접촉부에 DC 100[A]를 인가하고, 시정수 15[ms]의 부하를 이용하여 시험하였다. 아크 소호시간을 측정하여 부하를 개폐하는 순간에 전류 파형을 측정하였다. 아크 소호시간의 측정 결과 모델1, 2, 3은 각각 15ms, 12ms, 5.3ms의 평균치를 보였으며, 측정 결과의 시뮬레이션이 유사하게 접근하였다.

4. 결론

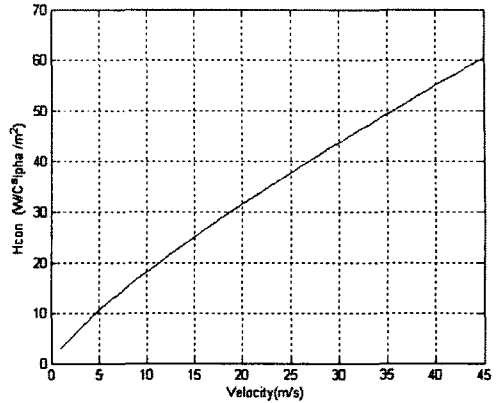
본 논문은 접점을 개방하는 순간 아크 형성 과정을 엔탈피 변화에 의하여 이론적 정립하였고, 3차원 유한요소법과 유체역학에 의하여 아크 구동 속도를 계산하였으며, 강제 대류에 의하여 아크 냉각방법을 정립하였다. 새로운 직류 아크 소호부를 고안하여 이론의 타당성을 확인하고, 직류 아크 소호장치의 성능 예측을 위한 알고리즘을 제시하였다.



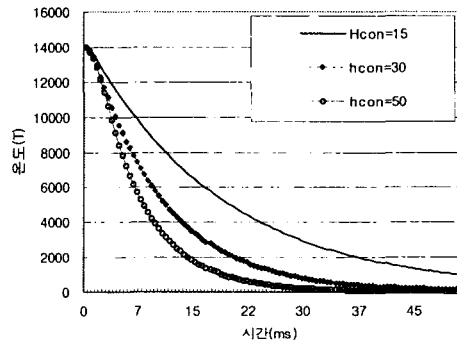
(a) 모델 1 (b) 모델 2 (c) 모델 3
그림 2. 해석과 실험 모델



(a) 전류 변화에 따른 아크 구동 속도



(b) 아크 구동 속도에 따른 강제 열대류 계수 변화



(c) 시간에 따른 아크 온도 변화
그림3. 해석 결과

[참고 문헌]

- [1] T.S Davis, H.Nouri, " Towards the control of contact Bounce", Proc. IEEE Holm Conf. on electric contacts, pp. 289 294, 1995
- [2] R. Holm, Electric Contacts: Theory and Applications, Springer-Verlag, New York, 1967
- [3] K. Pechrach, et al., " The Correlation of magnetic, gas dynamic and thermal effects on arc mobility in low contact velocity circuit breakers", Proc. 48th IEEE Holm Conf. on electric contacts, pp. 86 94, 2002
- [4] J.P. Chabrierie, et al., " Experimental Study of contact opening", Proc. IEEE Holm Conf. on electric contacts, pp. 194 199, 1995
- [5] P. Andre and L. Brunet, "Theoretical computation of the electrical conductivity of thermal plasmas-application to plasma torch design of an electrothermal launcher", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol.29, No.1, Feb. 2001. Pp.19-28
- [6] LIANG Humini, et al, " Research on the Relation Between contact breakway Initial Velocity and Arc Duration"
- [7] Vincent T. Morgan : Thermal Behavior of Electrical Conductors, Research studies press Ltd. 1991
- [8] K. Horinuchi, et al., " A Method of Simulating Magnetically Driven Arcs", IEEE Transaction on Power delivery, Vol. 12. No.1, Jan. 1997. pp.213 218