직류차단기의 아크특성 모델링

김용중, 김효성
공주대학교 전기전자제어공학부

Modeling for arc characteristics of DC circuit breaker

Yong Jung Kim, Hyosung Kim
School of EE and control Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

배전계통에서 병렬아크는 전선이나 노후된 설비의 절연파괴에 따른 합선에 의하여 발생하고 직렬아크는 차단기, 소켓 플러그, 커플러 등 접속기에서 부하와 전원이 분리되는 경우에 발생한다. 이러한 아크현상에 대응하기 위해서는 아크의 특성을 해석하고 그에 따른 아크소호방법이 제시되어야 한다. 병렬아크는 1889년 발견된 Paschen의 법칙에 따르며, 평행한 금속판 사이에 아크방전이 시작되는 항복전압이 매질가스의 종류 및 압력과 개리거리에 따른 함수로 규정된다. 반면, 직렬아크는 아직까지 명확한 해석방법이 제시되어있지 못하다. 본 논문에서는 직류 차단기에서 발생하는 직렬 차단아크의 촉발과 지속적인 발생, 소호에 대한 특성을 분석하여 3가지 특성을 기반으로 하는 직렬 차단아크전류 모델을 제안하고 실험을 통하여 검증하였다.

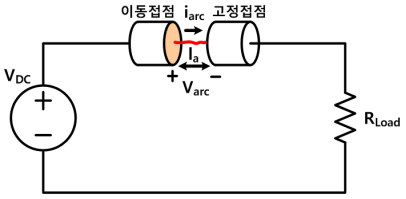
1. 서론

직류시스템은 교류시스템과 달리 전류제로점이 없기 때문에 아크의 소호가 어렵고 아크에너지가 커서 고온의 플라즈마성 아크로 발전하여 대형 전기화재로 발전할 가능성이 크다. 아크는 전류경로와 관련하여 병렬 및 직렬의 두 가지 유형으로 분류된다. 일반적으로 병렬아크는 전선이나 노후된 설비의 절연파괴에 의하여 발생하고 Paschen의 법칙을 따라 항복전압이 매질가스의 종류 및 압력과 개리거리의 함수이다. 직렬아크는 조임쇠 연결이 느슨한 부분이나 와이어 파손 또는 커플러, 소켓 플러그 등과 같이 부하와 전원이 분리되는 경우에 발생한다. 직렬아크는 전기 사용자의 일상적인 조작환경에서도 발생할 수 있기 때문에 직렬아크에 대한 해석과 이를 근거한 보호방법이 제시되어야 한다. 그러나 많은 연구에도 불구하고 직렬아크에 대한 명확한 해석방법 조차 제시되어있지 못하다.

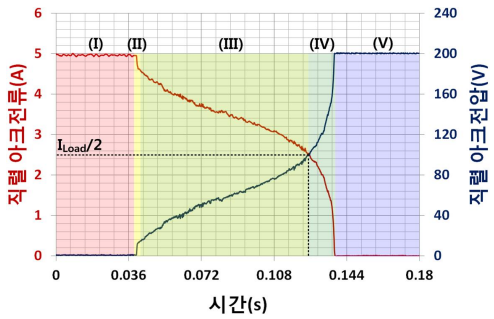
논문에서는 직류용 기계적 차단기가 전원과 부하를 분리시킬 때 발생하는 직렬 차단아크의 촉발과 지속적인 발생, 소호에 대한 특성을 분석하고 직렬아크의 3가지 특성을 기반으로 하는 직렬아크전류 모델을 제안하였다.

2. 직렬아크전류 모델링

[그림 1]은 모의 직렬아크 발생장치의 개념도를 보인다. 모의 직렬아크는 전원과 부하사이에 연결되어있는 기계적 차단기의 이동접점과 고정접점의 개리동작을 통해 발생시킨다. 그림 1에서 V_{DC}는 DC 전원전압, R_{Load}는 부하저항, i_{arc}는 아크전류, v_{arc}는 아크전압, l_a는 아크길이를 의미한다. 본 연구에서 이동접점의 개리속도는 150mm/s으로 하였다.



[그림 1] 모의 직렬아크 발생장치 개념도



[그림 2] 직렬아크 발생에 따른 아크전류 및 아크전압 파형

2.1 직렬아크에 따른 아크전압 및 아크전류 분석

[그림 2]는 V_{DC}=200V, I_{Load}=5A조건에서 직렬아크 발생에 따른 아크전압 및 아크전류 파형을 나타낸다. 직렬아크의 특성을 파악하기 위해서 5개의 시간영역으로 구분하여 파형을 분석한다.

[그림 2]의 (I) 영역에서는 이동접점이 고정접점과 맞닿아 완전한 폐회로를 구성한다. 이때, 접점을 통해 흐르는 전류는 I_{Load}와 같고 접점 간 전압은 0V이다. (II) 영역에서는 개리동작이 시작됨에 따라 직렬아크가 촉발되어 아크전압이 급격하게 증가하고 그로 인해 아크전류도 부하전류에 비해 급격히 감소하는 현상을 보인다. 이러한 아크전압의 급격한 증가는 자유전자와 기체원자의 비탄성충돌에 의해 야기된다. 전계에 의해 가속된 자유전자가 기체원자 내 전자와 충돌하면 기체원자 내 전자의 에너지준위를 이동시키는 여기현상 및 기체원자 내 전자를 완전히 이탈시키는 이온화현상이 발생한다. 이때, 약 10eV의 에너지가 소모되며, 이는 개리동작 직후 최초의 단일전자가 여기 및 이온화됨에 따라 약 10V의 전압이 소모됨을 의미한다. 그러므로 직렬아크는 전계에 의해 가속된 자유전자와 기체원자의 충돌에 의해 촉발되며, 개리동작 직후 발생하는 최초 아크전압의 크기는 약 10V가 됨을 알 수 있다. (III) 영역에서는 아크길이가 증가함에 따라 아크전압이 선형적으로 증가하며 아크전류는 반대로 선형적으로 감소한다. 이러한 아크전압 및 아크전류의 선형적인 변화특성은 아크전류가 부하전류의 50%로 되는 아크길이까지 유지됨

을 확인 할 수 있다. (IV) 영역에서는 아크전류가 부하전류의 50% 이하로 되는 아크길이 조건에서 아크가 빠르게 소호됨을 보인다. (V) 영역에서는 아크가 완전히 소호되어 접점 간 전압이 전원전압에 이르고 접점을 통해 흐르는 전류가 0A임을 보인다.

모의 직렬아크 실험을 통해 아크전류는 아크길이의 함수이며, 직렬아크는 아크전류가 정격전류의 50%에 도달하는 아크길이 $l_{0.5i}$를 기준으로 동특성이 급격하게 변화하는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 식 (1)의 $l_{0.5i}$을 기준으로 하는 per unit 아크길이 개념을 적용하여 직렬아크전류를 모델링 한다.

$$q = l_a / l_{0.5i} \tag{1}$$

2.2 제안하는 직렬아크전류 공식

본 논문에서 제시하는 직렬아크전류 공식은 다음과 같다.

$$i_{\text{arc}}(q) = I_{Load} - I_{\in} - i_{duration}(q) - i_{extinguish}(q) \tag{2}$$

$$= I_{Load} - V_{excit}/R_{Load} - K_{res} * q - I_0 e^{\alpha q} \tag{3}$$

식 (2)에서 $I_{\in}$는 직렬아크가 촉발됨에 따라 급격하게 감소하는 아크전류 성분을 나타낸다. 여기서 V_{exict}는 개리동작 직후 단일전자의 여기 및 이온화에 따른 최초 아크전압을 의미한다. 식 (2)에서 $i_{duration}(q)$는 아크길이가 선형적으로 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 아크전류 성분을 나타내고 $i_{extinguish}(q)$는 정격전류의 50%에 도달하는 아크길이 직후 나타나는 급격한 아크전류 감소성분을 나타낸다.

식 (3)에서 K_{res}는 per unit 아크길이에 따른 비례상수, I_0는 포화전류, α는 per unit 아크길이에 따른 아크소호 계수를 의미한다. 제안하는 직렬아크전류 공식에 포함된 3개의 미지수를 찾기 위해서는 3개 이상의 제한조건이 필요하다. 만약 직렬아크가 완전히 소호되는 per unit 아크길이 q_{crit}를 추정할 수 있다면, 3개의 미지수들은 식 (2)의 직렬아크전류 공식과 아크전류가 가지는 특성에 의거하여 다음과 같이 설계될 수 있다.

$$K_{res} = (I_{Load}/2 - I_{\in})/q_{crit} \tag{5}$$

$$\alpha = \{\ln(K_{res} * (q_{crit} - 1)) - \ln(I_{Load}/2)\}/(1 - q_{crit}) \tag{6}$$

$$I_0 = 0.5 * I_{Load} e^{-\alpha q_{crit}} \tag{7}$$

2.3 Steinmetz 아크전압 특성을 고려한 q_{crit} 추정방법

Steinmetz는 실험을 통해 아크전압이 아크길이와 아크전류의 함수임을 파악하였고, 아크전압 특성방정식을 식 (8)과 같이 제시하였다[1].

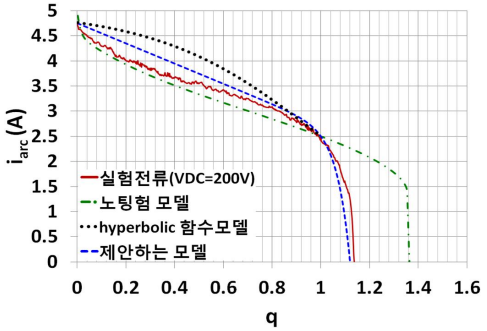
$$V_{\text{arc}} = V_{\min} + k_a * l_a / i_{\text{arc}}^{0.5} \tag{8}$$

식 (8)에서 k_a는 상수, $V_{\min}$은 전극 간 최소아크전압으로 정의되며 물리적으로 이동접점과 고정접점이 개리동작 직후 단일전자의 여기 및 이온화를 위한 전압강하 성분을 의미한다.

$$V_{\text{arc}} = V_{DC} - i_{\text{arc}} * R_{Load} \tag{9}$$

$$i_{\text{arc}}^{1.5} - I_{Load}(1 - \frac{V_{excitat}}{V_{DC}}) i_{\text{arc}}^{0.5} + \frac{k_a * l_a}{R_{Load}} = 0 \tag{10}$$

식 (9)는 [그림 1]의 직렬저항부하를 포함하는 직렬아크회로의 해석에 따른 아크전압 방정식을 나타내고, 식 (10)은 식 (9)에 식 (8)을 대입하여 도출된 아크길이에 따른 아크전류 방정식을 나타낸다.



[그림 3] per unit 아크길이 (q)에 따른 아크전류 그래프

$$i_x^3 - I_{Load}(1 - \frac{V_{excitat}}{V_{DC}}) i_x + \frac{k_a * l_a}{R_{Load}} = 0 \tag{11}$$

해를 구하기 위하여 $i_{\text{arc}}^{0.5} = i_x$로 놓으면 식 (10)은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

식 (11)에서 아크전류 방정식의 해는 미지상수 k_a와 아크길이 l_a에 따라 결정된다. 이때, 아크전류 방정식의 해가 음의 실근과 두 개의 중근인 경우 아크길이는 최대아크길이 l_{crit}가 되며, 아크길이가 l_{crit}보다 길어질 수 없으므로 l_{crit}를 초과하는 아크길이조건에서 직렬아크는 완전히 소호된다. 비록 k_a는 미지상수이지만 식 (11)에 대한 3차방정식의 판별식과 식 (10)을 통해 아크길이가 l_{crit}되는 조건에서의 $k_a l_{crit}$와 아크길이가 $l_{0.5i}$되는 조건에서의 $k_a l_{0.5i}$를 유도할 수 있다.

$$q_{crit} = \frac{k_a l_{crit}}{k_a l_{0.5i}} = \frac{l_{crit}}{l_{0.5i}} = \frac{4(1 - V_{excit}/V_{DC})\sqrt{\frac{I_{Load}(1 - V_{excit}/V_{DC})}{27}}}{(1 - 2V_{excit}/V_{DC})(I_{Load}/2)^{0.5}} \tag{12}$$

식 (12)는 아크길이가 $l_{0.5i}$되는 조건에서의 $k_a l_{0.5i}$와 아크길이가 l_{crit}되는 조건에서의 $k_a l_{crit}$ 비를 나타내고, 식 (12)를 통해 Steinmetz 아크전압 특성과 직렬저항부하를 포함하는 직렬아크회로의 아크전압 특성을 이용하여 q_{crit}가 추정될 수 있음을 보인다.

3. 제안하는 아크전류 모델링 검증

[그림 3]에서는 실제아크전류와 노팅험 아크전류모델, hyperbolic 함수를 이용한 아크전류모델, 제안하는 아크전류모델을 비교하였다. [그림 3]을 통해 노팅험 아크전류모델과 hyperbolic 함수를 이용한 아크전류모델 모두 개리동작이 시작하여 $q \leq 1$영역에서는 비교적 유효하지만 $q > 1$영역에서는 실제아크전류를 정확하게 모사하지 못함을 알 수 있다. 반면 제안하는 아크전류 모델은 전체적인 영역에서 실제아크전류를 상대적으로 정확하게 모사함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 직렬아크의 아크전압 및 아크전류를 분석하여 직렬아크전류 모델을 제안하였고 실제 실험에 의한 직렬아크전류와 비교를 통해 제안하는 직렬아크전류 모델이 직렬아크의 동특성을 정확하게 모사함을 검증하였다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2016R1D1A3B01008279)

참 고 문 헌

[1] R. F. Ammerman, T. Gammon, P. K. sen, and J. P. Nelson, "DC arc models and incident energy calculations" *IEEE Trans. Ind. appl.*, pp1810 1819, 2010