

SF₆ 가스차단기의 아크저항에 관한 연구

A Study On The Arc Resistance of SF₆ Gas Circuit Breaker

鄭 鎭 毅[†] · 李 佑 暎^{*} · 金 奎 卓^{**}

(Jin-Kyo Chong · Woo-Young Lee · Gyu-Tak Kim)

Abstract - SF₆ gas circuit breakers are widely used for short circuit current interruption in EHV(Extra High Voltage) or UHV(Ultra High Voltage) power systems. To develop SF₆ gas circuit breakers, the arc resistance value is necessary to compare experimental results to numerical ones. The arc resistance value can be obtained from a breaking test with a SF₆ gas circuit breaker. The direct testing or synthetic testing facility is widely used to verify the breaking ability for SF₆ gas circuit breakers. We employed the simplified synthetic testing facility to test a SF₆ gas circuit breaker prototype. The arc resistance characteristic was measured and calculated under the various experimental conditions. This arc resistance value can be used for verifying the numerical results from arc simulation in a circuit breakers.

Key Words : SF₆ 가스차단기, 간이 합성시험설비, 시험전류, 주입전류, 아크저항

1. 서 론

SF₆ 가스는 화학적으로 매우 안정한 분자구조를 가지기 때문에 높은 절연파괴강도를 가진다. 이러한 특성 때문에 고전압설비의 절연매체로서 널리 사용되고 있으며, 또한 아크소호 성능이 우수하여 차단기의 아크소호 매질로도 널리 사용된다. 현재 대부분의 초고압 전력계통에서 고장이 발생하는 경우, 고장전류를 차단하고 전력계통의 설비를 보호하기 위하여 SF₆ 가스차단기(이하 가스차단기)가 사용된다.

가스차단기에 대한 차단성능 검증시험을 수행하는 경우, 용량에 따라 직접시험과 합성시험으로 구분된다. 직접시험은 시험전류 및 시험전압을 하나의 전원으로 공급하여 시험하는 방법이고, 합성시험은 시험전류를 하나의 전원으로 공급하고, 시험전압을 별도의 다른 전원으로 공급하여 시험을 수행하는 방법이다. 합성시험설비를 구축하는 경우, 일반적으로 시험전류는 단락발전을 이용하여 공급하고, 시험전압은 커패시터 뱅크를 이용하여 공급하는 구조로 이루어진다. 하지만 이러한 합성시험설비는 운전하고 유지 보수하는데 비용이 많이 들기 때문에 가스차단기의 개발초기 단계에서는 커패시터와 리액터의 공진전류를 이용하여 시험전류를 공급하고, 시험전압은 커패시터 뱅크를 이용하여 공급하는 간이 합성시험법^[1,2]이 이용된다.

가스차단기를 개발하는 과정에서 가장 중요한 것은 차단기 내부에서 변화하는 유동 파라미터(압력, 밀도, 온도, 속도 등)의 값을 정확하게 분석하는 것이다. 이를 위해서는 유동 특성에 가장 큰 영향을 주는 아크를 수치적으로 정확하게

모델링할 필요가 있으며, 이때 아크저항의 값이 반드시 필요하게 된다.

본 연구에서는 간이합성시험설비를 이용하여 SF₆ 가스차단기의 차단성능 시험을 수행하면서 측정된 파형으로부터 아크의 발생시간 및 전류의 크기 변화에 따른 아크저항의 값을 계산하여 정리하였다.

2. 본 론

고장전류를 차단하고 전력계통을 보호하기 위하여 사용하는 가스차단기는 고장전류를 소호하는 방식에 따라 파퍼식, 열팽창식, 로타리아크식 그리고 이들 소호방식을 서로 결합한 복합소호식으로 구분된다. 일반적으로 구조가 간단하고 설계제작이 용이한 파퍼식 차단부는 현재 초고압 계통에서 가장 많이 활용하고 있다. 파퍼식 가스차단기의 형상은 그림 1과 같은 구조를 가진다. 기본적인 동작원리는 다음과 같다. 가스차단기에 동작신호가 입력되면 조작장치와 연결되어 있는 파퍼실린더, 노즐, 가동아크접점 등이 오른쪽에서 왼쪽으로 움직이게 되고, 고정되어 있는 피스톤과의 상호작용에 의하여 SF₆ 가스가 압축된다. 동시에 가동아크접점과 고정아크접점이 서로 분리되면서부터 아크가 발생하게 되고 파퍼실에서 압축된 SF₆ 가스가 아크영역으로 분출되면서 아크를 소호한다. 여기서 아크가 유지되는 시간을 아크시간이라 하며, 이 아크의 저항 값을 아크저항이라 한다. 아크저항은 차단기의 아크접점 사이의 길이가 계속해서 변하기 때문에 매 시간마다 변하는 값을 가지게 된다.

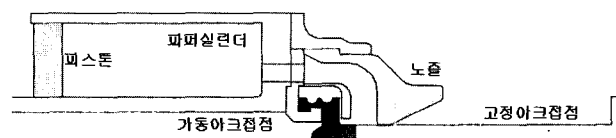


그림 1 파퍼식 SF₆ 가스차단기의 형상
Fig. 1 Figure of puffer type SF₆ gas circuit breaker

[†] 교신저자, 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

E-mail : jkchong@keri.re.kr

^{*} 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任研究員

^{**} 正 會 員 : 昌原大學校 電氣工學科 教授

接受日字 : 2007年 5月 24日

最終完了 : 2007年 7月 27日

가스차단기를 개발하는 초기 단계에서는 설비의 운전이 용이하고 유지보수 비용이 적은 간이합성시험설비를 사용하는데 본 연구에 이용된 간이합성시험설비의 회로도도 그림 2와 같다.

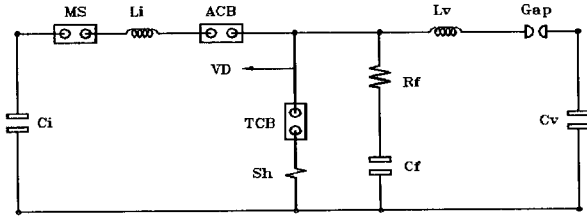


그림 2 간이 합성시험설비 회로도
Fig. 2 Circuit diagram of the simplified synthetic testing facility

차단성능 검증을 위한 시험용차단기 TCB를 기준으로 왼쪽은 전류원회로 즉, 시험전류 공급용 회로를 보여주고 있으며, 오른쪽은 시험전압 공급을 위한 전압원회로를 보여주고 있다. 시험전류는 커패시터 Ci와 리액터 Li의 공진특성에 의하여 만들어져서 시험용차단기에 공급되며, 시험전압은 커패시터 Cv와 리액터 Lv의 공진특성에 의하여 발생하는 전류(이하 주입전류) 0.5cycle을 시험용차단기에 흐르게 한 후, 시험용차단기가 주입전류를 차단하면 인가된다. 인가되는 시험전압의 파형은 회로정수 Rf, Cf에 의하여 조정된다. 시험용차단기에 흐르는 시험전류는 셉트 Sh에 의하여 측정되며, 시험전압은 시험용차단기의 인입부에 설치된 분압기 VD에 의하여 측정된다.

● 전류원회로의 전류 -시험전류-

시험전류는 커패시터 Ci와 리액터 Li의 공진특성을 이용하여 만들어지며 전류의 크기는 식 (1)과 같은 RLC 직렬회로방정식에 의하여 계산된다.

$$i(t) = \frac{V_{C_i}}{\beta L_i} e^{-\alpha t} \sin \beta t \quad (1)$$

여기서, $\alpha = \frac{R}{2L_i}$, $\beta = \sqrt{\frac{1}{L_i C_i} - (\frac{R}{2L_i})^2}$ 이다.

전류원회로의 총 저항 R은 공심리액터 Li의 권선저항, 커패시터뱅크를 결선하는 케이블의 권선저항, 보조차단기의 아크저항 그리고 커패시터의 정방향과 역방향의 충전비율을 나타내는 Voltage Reversal Factor 등이 있다. 커패시터의 VRF는 정방향에 대한 역방향으로의 충전비율을 나타낸 것으로 정확한 값은 시험을 통하여 얻어진다. 이러한 이유로 전류원회로에 대한 총 저항 값은 일정한 값을 가지지 않으며 커패시터의 충전주기마다 바뀌게 된다. 시험용차단기의 통전전류 용량을 기준으로 시험전류의 크기를 20kA, 40kA로 결정하였으며, 20kA의 전류를 흐르게 하기 위하여 커패시터 Ci 33,750uF, 충전전압 3.0kV, 리액터 Li 0.21mH 값을 이용하여 특성시험을 수행하였다.

전압원회로 및 시험용차단기는 동작시키지 않는 조건에서, 개방되어 있던 투입스위치를 동작시키면 시험용차단기를 통하여 시험전류가 흐르기 시작하며, 시험전류가 1.5cycle 흐

른 후 보조차단기를 이용하여 시험전류를 차단한 경우의 파형이 그림 3과 같다.

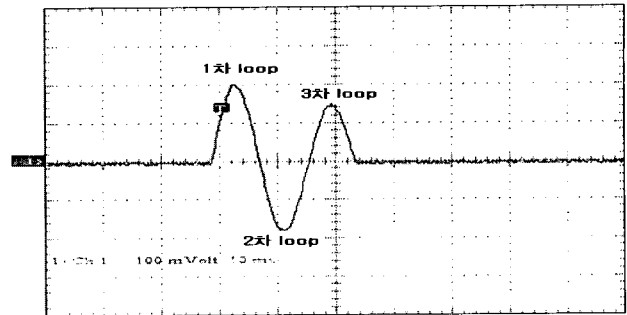


그림 3 전류원회로의 시험전류
Fig. 3 Testing current of current circuit

0.5cycle 기준(이하 1차, 2차, 3차loop)으로 계측기의 비율을 적용하여 시험전류의 크기를 계산하면 $22.8 > 19.7 > 16.4 \text{ kA}$ ($1.0 > 0.86 > 0.72 \text{ p.u.}$)로 불규칙하게 감소하는 값이 되는 것을 알 수 있다. 시험조건과 동일한 회로정수의 값을 식 (1)에 대입하고 시험전류의 3차 loop에서의 측정된 전류값 16.4kA의 값을 만족하는 전류원회로의 저항 값을 계산하면 전류원회로의 저항값이 5.5mΩ이 되는 것을 알 수 있으며, 해석결과를 그림 4에 나타내었다.

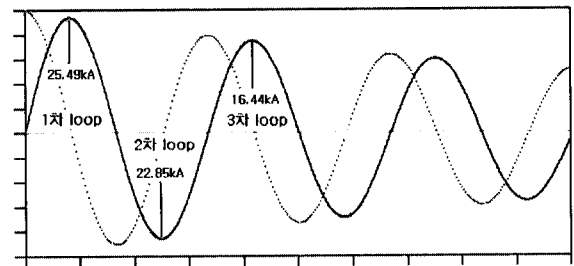


그림 4 전류원회로의 저항계산
Fig. 4 Resistance calculation of current circuit

● 전압원회로의 전류 -주입전류-

전류원회로에서 전압원회로로 전원공급 회로를 이동시키기 위하여 시험용차단기에 흐르는 시험전류가 차단되기 500us이전에 Gap을 트리거하여 전압원회로를 동작시키게 된다^[3]. 전압원회로가 동작되면 주입전류가 흐르게 되고 이 전류가 시험용차단기에 의하여 차단되면 전압원회로에서 공급하는 전압이 시험용차단기의 극간에 인가된다.

전압원회로 및 시험용차단기는 동작시키지 않는 조건에서, 커패시터 뱅크 Cv; 26.1uF, 충전전압 47kV, 리액터 Lv; 2.68mH의 값으로 회로를 결선한 후, 전압원회로를 동작시키면 시험용차단기에 주입전류가 흐르게 된다. 측정된 주입전류의 파형은 그림 5와 같으며, 시험전류의 크기는 $3.3 > 3.2 > 3.0 \text{ kA}$ ($1.0 > 0.97 > 0.91 \text{ p.u.}$)로 감소하는 값이 된다.

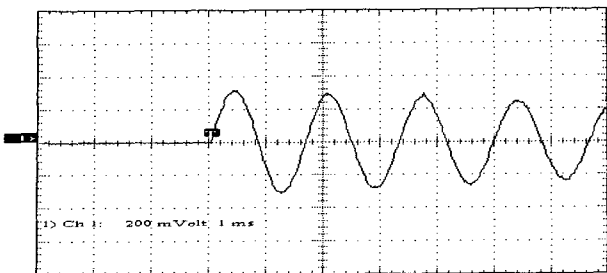


그림 5 전압원회로의 주입전류
Fig. 5 Injection current of voltage circuit

● 과도회복전압 -(TRV; Transient Recovery Voltage)-
시험용차단기의 동작에 의하여 주입전류가 차단되면, C_v 에 남아 있는 충전전압에 의하여 시험용차단기의 극간에는 전압이 인가된다. 이를 과도회복전압이라고 하며, 크기는 식(2)와 같이 계산된다.

$$v_{TRV}(t) = R_f \frac{V_{C_v}}{\beta L_v} e^{-\alpha t} \sin \beta t \quad (2)$$

$$+ \frac{1}{C_f} \frac{V_{C_v}}{\beta L_v} \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} [\beta - e^{-\alpha t} (\alpha \sin \beta t + \beta \cos \beta t)]$$

여기서, $C_T = \frac{C_v * C_f}{C_v + C_f}$, $\alpha = \frac{R_f}{2L_v}$, $\beta = \sqrt{\frac{1}{L_v C_T} - (\frac{R_f}{2L_v})^2}$ 이다.

TRV의 상승파형을 조정하는 튜닝저항 R_f 를 500 Ω , 튜닝커패시터 C_f 를 6.2nF로 결선 한 후, 시험용차단기를 개방상태에 놓고 극간에 인가되는 전압(C_v , L_v 는 주입전류시험과 동일한 조건)의 파형을 측정하면 그림 6과 같으며 최대값을 계산하면 76kV_{peak}의 값이 되며, 상승율을 10kV/us의 값이 된다.

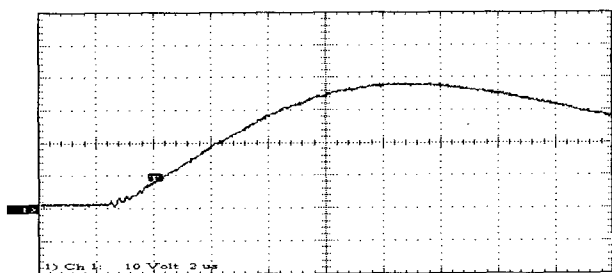


그림 6 과도회복전압 파형
Fig. 6 Transient recovery voltage waveform

● 합성시험 수행^[3,4]

시험설비의 회로정수를 동일하게 유지하고, 전류원회로 C_i 의 충전전압과 시험용차단기에서 발생하는 아크시간을 변경시켜가면서 차단성능시험을 수행하였다. 시험용차단기 TCB의 아크시간을 16.0ms로 설정한 후, 합성시험을 수행하였으며, 측정된 전류의 파형은 그림 7과 같다. 전류원회로에 의하여 시험용차단기에 공급된 전류의 크기를 계산하면 22.7 > 19.3 > 10.7kA (1.0 > 0.85 > 0.47p.u.)이 되며, 전압원회로에 의하여 공급된 주입전류의 크기를 계산하면 3.2 > 3.0 > 2.9kA (1.0 > 0.94 > 0.91p.u.)의 값이 된다.

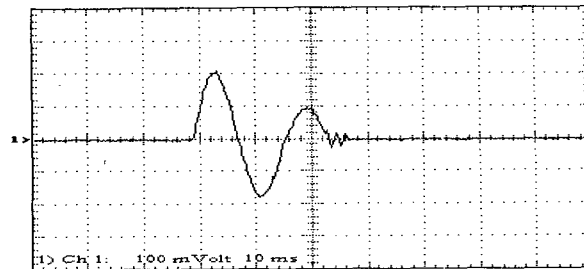


그림 7 합성시험결과(아크시간 16.0ms)
Fig. 7 Synthetic testing result(arcing time 16.0ms)

전류원회로 C_i 의 충전전압과 시험용차단기의 아크시간을 변경시켜가면서 차단성능 시험을 수행하였으며, 측정결과를 표1에 정리하였다.

표 1 충전전압과 아크시간 변경 시 시험전류 및 주입전류
Table 1 Testing and injection current when charging voltage and arcing time are changed

충전전압 kV		아크시간 ms	시험전류 kA			주입전류 kA		
C_i	C_v							
3.0	-		22.8	19.7	16.4			
-	47					3.3	3.19	2.95
3.0	47	12.6	22.5	19.1	14.3	3.2	3.0	2.9
3.0	47	14.0	22.7	19.3	12.6	3.2	3.1	2.9
3.0	47	16.0	22.7	19.3	10.7	3.2	3.0	2.9
3.0	47	18.0	22.9	18.5	7.60	3.2	3.0	2.8
5.7	-		43.4	37.3	32.3			
5.7	47	12.6	43.3	36.8	29.9	3.2	3.1	3.0
5.7	47	14.0	43.1	37.0	27.6	3.2	3.1	3.0
5.7	47	16.0	43.1	36.1	25.6	3.2	3.1	-
5.7	47	18.0	42.7	36.3	22.0	3.2	3.1	2.8

측정된 시험전류의 3차 loop에서의 최대값을 만족시키는 저항값을 식(1)을 이용하여 계산하면 그림 8과 같다.

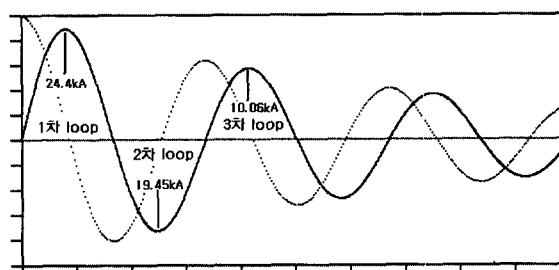


그림 8 계산결과 (아크시간 16.0ms)
Fig. 8 Calculation result(arcing time 16.0ms)

시험용차단기가 동작하면서 전류원회로의 저항값이 5.5m Ω 에서 11.0m Ω 으로 변한 것을 볼 수 있다. 결과로부터 시험용차단기의 내부에서 발생한 아크저항 값이 5.5m Ω 이 되는 것을 알 수 있다.

측정된 시험전류의 3차 loop 최대값에 대하여 동일한 계산방법을 적용하여 아크저항의 값을 계산하여 정리하면 표 2와 같다.

표 2 아크저항의 계산결과

Table 2 Calculation results of arc resistance

Ci 충전전압 kV	아크시간 ms	시험전류 kA	회로저항 mΩ	아크저항 mΩ
3.0	동작 X	22.8 19.7 16.4	5.5	-
3.0	12.6	22.5 19.1 14.3	7.0	1.5
3.0	14.0	22.7 19.3 12.6	8.5	3.0
3.0	16.0	22.7 19.3 10.7	11.0	5.5
3.0	18.0	22.9 18.5 7.60	14.0	8.5
5.7	동작 X	43.4 37.3 32.3	5.1	-
5.7	12.6	43.3 36.8 29.9	6.0	0.9
5.7	14.0	43.1 37.0 27.6	6.8	1.7
5.7	16.0	43.1 36.1 25.6	7.7	2.6
5.7	18.0	42.7 36.3 22.0	9.4	4.3

아크시간이 최소 12.6ms, 최대 18.0ms의 크기를 가지므로 시험용차단기는 2차 loop에서 개극이 이루어지면서 차단을 수행하게 된다. 그러므로 동일한 계산방법을 2차 loop에 대하여 적용하면 아크시간이 적은 경우에 대하여 아크저항을 계산할 수 있다. 계산된 아크저항의 값을 전체적으로 정리하면 그림 9와 같다.

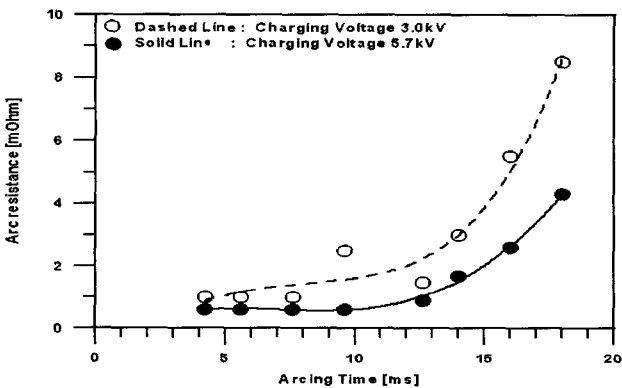


그림 9 아크시간에 따른 아크저항
Fig. 9 Arc resistance versus Arcing time

계산결과로부터 아크시간이 12[ms]이상이 되면서 아크저항의 값이 지수적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, Ci의 충전전압이 클수록 즉, 시험전류의 크기가 클수록 아크저항의 값이 작아지는 것을 알 수 있다.

표 3 주입전류 영역에서 아크저항 계산

Table 3 Arc resistance calculation at injection current area

Cv 충전전압 kV	주입 전류 kA	총 저항 mΩ	아크저항 mΩ
47	3.25 3.19 2.95	0.15	
47	3.2 3.0 2.9	0.17	0.02
47	3.2 3.1 2.9	0.17	0.02
47	3.2 3.0 2.9	0.17	0.02
47	3.2 3.0 2.8	0.17	0.02
47	3.2 3.1 3.0	0.17	0.02
47	3.2 3.1 3.0	0.17	0.02
47	3.2 3.1 -	0.17	0.02
47	3.2 3.1 2.8	0.17	0.02

다음으로 전압원회로에서 공급되는 주입전류의 측정결과를 이용하여 아크저항의 값을 계산하면 표 3과 같다.

시험용차단기의 아크시간 변화에 대하여 주입전류의 크기는 크게 변하지 않는 것을 알 수 있으며, 아크저항의 값도 변하지 않는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

간이합성시험설비를 이용하여 시험용차단기의 아크시간을 변경시켜 가면서 특성시험을 수행하였다. 시험용차단기에 흐르는 시험전류와 주입전류의 크기가 측정되었으며, 측정결과를 분석하기 위하여 전류가 최대값을 가지는 경우에 대하여 아크저항의 값을 계산하여 정리하였다. 계산된 아크저항의 값으로부터 알 수 있는 것은

- ① 아크시간이 12ms 이상이 되면서 아크저항의 값이 지수적으로 증가하는 것을 알 수 있다.
- ② 커패시터의 충전전압이 클수록 즉, 시험전류의 크기가 클수록 아크저항이 작아지는 것을 알 수 있다.
- ③ 시험용차단기의 아크시간의 변화는 주입전류의 크기에 크게 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

본 연구결과는 가스차단기내부에서 발생하는 아크에 대한 수치해석을 수행하는 경우, 해석결과를 비교하고 검증하는데 있어서 좋은 참고자료가 될 수 있으며, 시험전류의 전체 영역으로 확대하는 경우, 해석결과에 대한 검증자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 박경엽, 신영준, 장기찬, 정진교, 최영길, "LC 공진회로를 이용한 단락시험의 등가성에 관한 연구", 한국전기연구소 1996년 10월
- [2] 金方直弘 외 2인, "대용량 C-L회로에 의한 단락차단시험에 대하여", SPD-88-1, 일본전기학회연구회자료, 개폐보호연구회, 1988
- [3] IEC 62271-101 Synthetic testing
- [4] IEC 62271-100 High-voltage alternating-current circuit-breakers

저 자 소 개



정진교 (鄭鎭敎)

1967년생. 1991년 강원대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 강원대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원

E-mail : jkchong@keri.re.kr



이우영(李佑暎)

1957년 10월 2일생. 1980년 경북대 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1982년~현재 한국전기연구원 전력연구단 책임연구원

E-mail: wylee@keri.re.kr



김규탁(金奎卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996~2000년 일본 早稻田大 客員研究員.

현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.

E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr