

Interruption Capability of Hybrid Type GCB with High Opening Speed

宋基東[†] · 鄭鎮教* · 朴敬燁**

(Ki-Dong Song · Jin-Kyo Chong · Kyong-Yop Park)

Abstract - This paper presents the basic design technology on the hybrid type GCB(gas circuit breakers) through the test results. The three type hybrid interrupters according to the arrangement of the thermal expansion chamber and the puffer cylinder(they are called "serial type", "parallel/exchanged type", and "parallel/separated type" respectively in this work) were designed and manufactured and then the tests of operating characteristics and interrupting were performed using a simplified synthetic test facility. The interruption capability with the type and the opening speed and the pressure rise which is required to interrupt were examined. The change of pressure rise with the number of interruption was given quantitatively and therefore the pressure rise can be predicted. Finally, it was shown that the interruption capability tends to increase with the increasing of opening speed in the puffer type; however, the hybrid type interrupter has a different interruption characteristic.

Key Words : GCB(Gas Circuit Breaker), Hybrid Interrupter, Thermal Expansion, Puffer, Opening Speed, Pressure Rise

1. 서 론

현재 초고압 전력계통에 주로 사용되고 있는 파퍼형 차단부(puffer type interrupter)는 전류차단에 있어서 큰 조작력이 필요하기 때문에 유압(hydraulic) 또는 공압(pneumatic) 방식의 조작기(operating mechanism)를 사용하고 있다. 하지만 유지보수, 환경문제, 소음, 경제성 등의 이유로 유압 또는 공압방식의 조작기는 점차 배척되고 있으며, 심지어 일부 선진국에서는 환경문제를 근거로 유압조작기를 사용하는 차단기에 대해서는 수입 및 사용을 금지하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전 세계적으로 전동 스프링 또는 모터 구동형 조작기를 개발하기 위해 모든 노력을 기울이고 있다.

그러나 전동 스프링 또는 모터 구동형 조작기가 유지보수, 환경문제, 소음 등에 있어서 장점을 가지고 있다고는 하지만, 메카니즘 특성상 기존의 유압 또는 공압방식의 조작기에 비해 조작력이 크게 떨어지는 단점을 가지고 있다. 따라서 큰 조작력을 요구하는 파퍼형 차단기에 직접적으로 적용한다는 것은 대단히 어려운 일이다[1]. 이와 같은 문제를 극복하기 위해 전류차단과정에서 자연적으로 발생하는 아크 자체의 에너지를 아크소호에 필요한 압력상승을 일으키는 데 이용함으로써 조작기의 부담을 덜어주는 자력소호 방식

(self-extinguishing type)이 초고압 차단기에 적용되게 되었다[2]. 자력소호 방식은 전류크기가 작은 경우 즉, 소전류 차단에 문제점을 가지고 있으므로, 이를 보강하기 위해 작은 체적의 파퍼 실린더를 병용하는 즉, 소전류 차단은 파퍼 실린더가 담당하고 대전류 차단은 자력소호 방식이 담당하는 일명 복합소호 방식(hybrid extinguishing type)이 고안되게 되었다[3]. 현재 이러한 복합소호 차단부에 전동스프링 또는 모터 구동형 조작기를 사용하는 초고압 가스차단기의 개발이 국내는 물론, 국외에서도 경쟁적으로 수행되고 있다.

국내에서의 초고압 복합소호 차단기 개발은 현재 시작단계에 있다. 본 논문은 복합소호 차단부 개발에 필요한 기본적인 기술을 구축하기 위해 한국전기연구원을 비롯하여, (주)효성, LS산전(주), 일진전기(주), 현대중공업(주)가 공동으로 연구한 결과 중의 일부를 제시하는 것이다. 특히, 기존의 파퍼형 차단기는 조작력이 큰 경우 즉, 개극속도가 빠른 경우 차단성능이 증가하는 경향이 있다. 하지만 복합소호 차단부의 경우 동일한 현상이 발생하지 않을 것이라고 예측만 하고 있을 뿐 실험적으로 검증된 예가 없다. 세 가지 형태의 복합소호 차단부를 한국전기연구원이 설계하고, (주)효성, LS산전(주), 일진전기(주)가 각각 설계된 차단부를 2조씩 제작하였으며, 차단부를 구동시킬 유압조작기를 현대중공업(주)가 제작하였다. 제작 완료된 차단기들에 대해 한국전기연구원의 간이합성시험설비를 이용해서 차단성능 및 동작 특성시험을 수행하였다.

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員
E-mail : kdsong@keri.re.kr

* 正會員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

** 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 Group長

接受日字 : 2005年 6月 24日

最終完了 : 2005年 7月 25日

2. 복합소호 차단부의 설계 및 제작

초고압급에 사용되는 복합소호 차단부는 자력소호방식 중

의 하나인 열팽창 소호방식과 파괴방식을 결합한 혼합방식을 주로 사용한다. 복합소호 차단부의 핵심 설계기술은 고장전류 차단과정에서 발생할 수 있는 기계적인 부담 즉, 조작기에 가해지는 부담을 줄이는 데 초점을 맞춰야 한다. 왜냐하면 조작기에 가해지는 부담이 작을 수록 작은 조작력을 가지는 전동 스프링 또는 모터 구동형 조작기의 채용이 유리해지기 때문이다.

그림 1과 2, 3은 각각 본 연구에서 설계/제작된 “직렬형”, “병렬/교류형” 및 “병렬/분리형” 복합소호 차단부를 나타낸 것이다. 각각의 명칭은 팽창실과 파괴실린더의 배열형태에 따라 임의로 정해진 것이며, 배열된 형태를 제외하고는 팽창실의 용적, 파괴실린더 용적, 노즐 형상 및 재질, 아크접점 형상 및 재질, 스트로크(stroke) 길이 등 모든 설계변수가 동일하다. 노즐의 재질은 PTFE 95%+Bn 5%의 강화 테플론이며, 아크 접점의 전류용량은 차단전류 40kA_{rms}를 기준으로 설계/제작하였고, 접점 팁(tip)의 성분비는 텅스텐 80%, 구리 20%로 이루어져 있다. 아크 에너지에 대한 압력상승 변화를 측정하기 위해 팽창실에 압력센서(Kistler 601A, piezo type)를 설치하였다. 각각의 차단기에 대한 차단 메카니즘은 참고문헌 [3]에 자세히 설명되어 있다.

그림 4는 전체조립도를 나타낸 것이다. 설계/제작된 차단부가 6bar(절대압력)의 SF₆가스로 채워진 탱크(tank)내에 조립되어 있다. 차단부는 조작기와 조작기 링크(link)로 연결되어 있고, 이 링크에는 동작특성을 파악하기 위한 선형 스트로크 센서가 설치되어 있다. 조작기는 기존 파괴형 차단기에 사용되고 있는 동일한 조작기를 취부하였다. 차단부의 개극속도를 변화시키기 위해 조작기의 유압을 동작 가능한 최저 압력 230 kgf/cm²에서 최대 340 kgf/cm²까지 조정하였다.

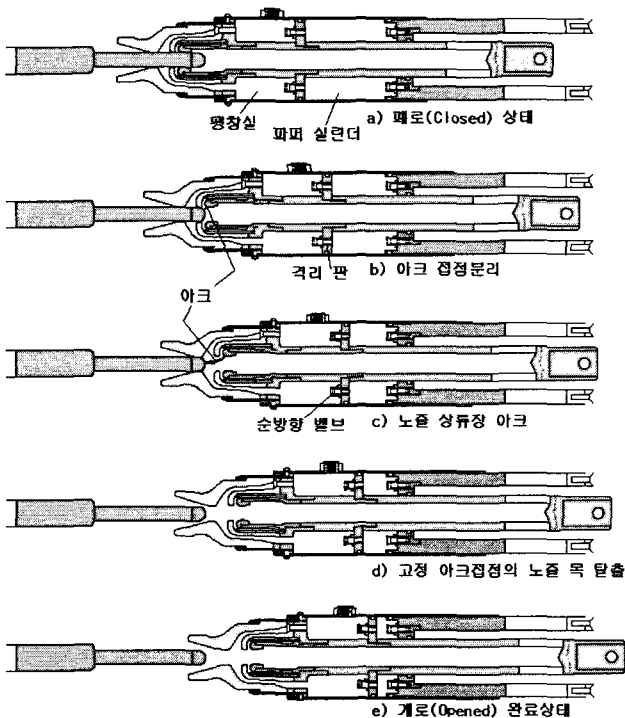


그림 1 “직렬형” 복합소호 차단부
Fig. 1 “serial type” hybrid Interrupter.

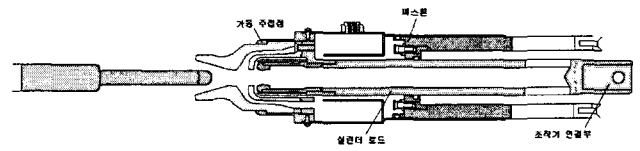


그림 2 “병렬/교류형” 복합소호 차단부
Fig. 2 “parallel/exchanged type” hybrid interrupter.

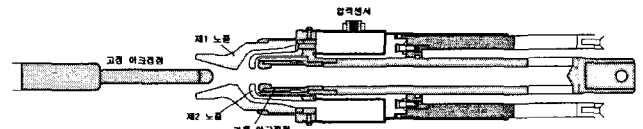


그림 3 “병렬/분리형” 복합소호 차단부
Fig. 3 “parallel/separated type” hybrid interrupter.

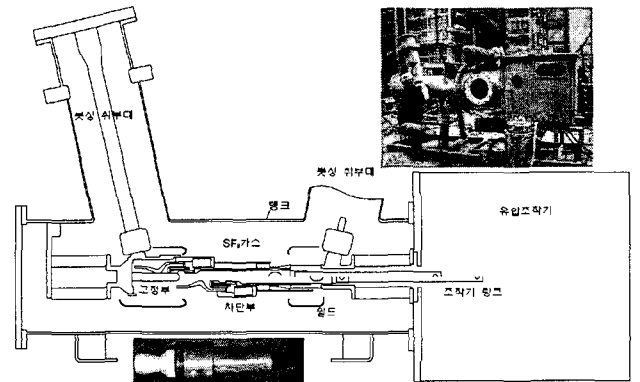


그림 4 모델 가스차단기의 전체 조립도
Fig. 4 Outline of model gas circuit breaker.

3. 차단성능시험

차단기에서 차단실패의 형식은 열적회복실패(thermal recovery failure)와 절연회복실패(dielectric recovery failure)로 분류할 수 있다. 각 차단기의 차단성능은 열적회복 성능시험으로 비교하였다. 열적회복의 성공여부를 정량적으로 판단하는 기준으로 아크-후 전류(post-arc current)가 이용된다. 차단기가 열적회복에 성공하는 경우, 수 μ s 이내에 아크-후 전류의 크기는 0으로 감소하지만, 반대인 경우는 급격히 증가하여 수십 kA의 고장전류가 다시 흐르게 된다. 전류 차단 후 시간에 대한 아크-후 전류 I_{pc} 의 변화는 식(1)과 같이 주어진다[4].

$$I_{post-arc} = \frac{\left(\frac{dV}{dt}\right) t}{R_{arc}} \quad (1)$$

여기서, dV/dt 는 회복전압의 상승률, R_{arc} 는 아크접점사이의 저항, t 는 시간이다.

그림 5는 차단에 성공한 경우의 대표적인 전류, 전압파형을 나타낸 것이다(합성시험 파형[3]). 차단전류의 기울기 di/dt 는 차단기에 가해지는 전류 스트레스의 크기를 나타내

며, dV/dt 는 차단기가 감당해야할 전압 스트레스의 크기를 나타낸다. di/dt 의 크기가 증가할수록 아크점점사이의 전도도는 증가하여 식(1)의 R_{arc} 의 값이 감소, 아크-후 전류의 크기가 증가할 것이다[5]. 또한 회복전압의 상승률 dV/dt 가 증가할수록 아크-후 전류의 크기는 증가할 것이다. 열적회복특성시험에 있어서 이 di/dt 와 dV/dt 값을 변화시켜 각 차단부의 열적회복성을 파악하였다. 시험은 참고문헌 [6]에 자세히 설명되어 있는 간이합성시험설비를 이용하였다.

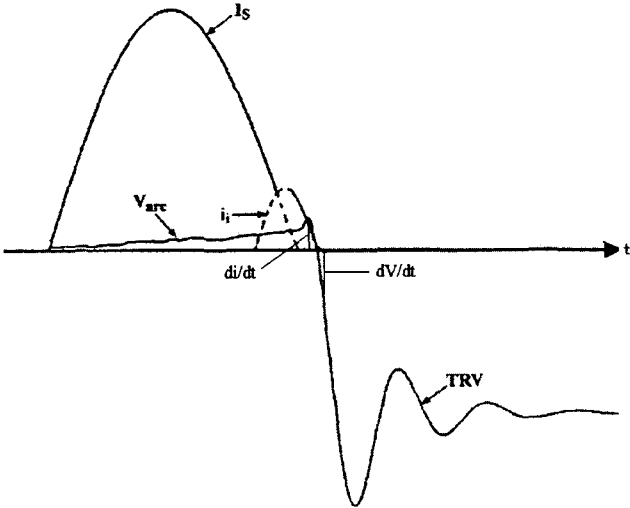


그림 5 차단에 성공한 경우의 대표적인 전압 및 전류 파형
Fig. 5 Typical waves of voltage and current in interruption success.

4. 결과 및 검토

표 1과 그림 6은 “병렬/분리형” 복합소호 차단부의 동작 특성시험과 무부하 압력상승시험 결과를 각각 나타낸 것이다. 차단부의 구조상 조작압력이 증가하더라도 팽창실의 무부하 압력상승은 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있으며, 조작압력이 증가할수록 스트로크 파형의 기울기 즉, 개극속도가 증가한다는 것을 알 수 있다.

표 1. “병렬/분리형” 복합소호 차단부의 동작특성 및 무부하 압력상승시험 결과

Table 1 Test results of operating and pressure rise without arc in “parallel/separated type” hybrid interrupter.

조작압력[kgf/cm ²]	개극속도[%]	ΔP [p.u]
220	×(동작 없음)	
230	8.4	
240	8.5	
250	8.9	1.0
260	9.2	(조작압력에
270	9.3	관계없이
280	9.3	거의 일정)
310	9.4	
320	10.3	
340	10.5	

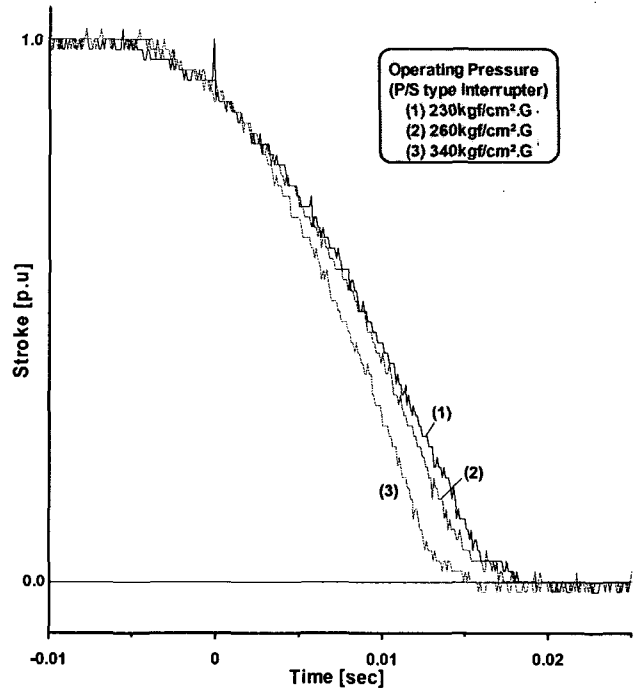


그림 6 “병렬/분리형” 복합소호 차단부의 조작압력에 따른 스트로크 파형의 변화

Fig. 6 Change of stroke curve with operating pressure in “parallel/separated type” hybrid interrupter.

표 2는 “병렬/분리형” 복합소호 차단부의 차단성능시험 결과를 나타낸 것이다. 차단부의 동작은 최저 조작압력 230kgf/cm²에서 구동시켰으며 차단전류는 36kA_{rms}, 아크시간은 15ms로 설정하였다. 표 2의 시험결과로부터 임계(critical) 회복전압의 기울기 dV/dt 는 7.0kV/ μ s라는 것을 알 수 있다.

표 2. “병렬/분리형” 복합소호 차단부의 차단성능 시험결과
Table 2 Test results of interruption capability of “parallel/separated type” hybrid interrupter.

조작압력 [kgf/cm ²]	차단전류 [kA _{rms}]	dV/dt [kV/ μ s]	아크시간 [ms]	결과	100% 차단횟수
230	36	7.0	15.4	×	1
			15.3	○	2
			15.4	○	3
			15.2	×	4
			15.2	○	5
			15.2	×	6

그림 7은 유부하시의 “병렬/분리형” 복합소호 차단부의 팽창실 압력상승을 나타낸 것이다. 차단횟수가 증가하면서 압력상승이 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 특히 조작압력에 관계없이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이것으로부터 차단횟수가 증가하면서 아크에 의한 노즐 목의 용삭(ablation)이 증가한다는 것을 알 수 있다. 실제로 시험 전과 시험 후의 노즐 목 직경은 30.0mm에서 31.5mm로 증가하였다. 그림 7의 결과를 이용하여 차단횟수(즉 아크에너지)에

대한 압력상승(노즐 재질 Bn 5%)을 예측할 수 있는 데이터 베이스를 구축할 수 있고, 따라서 요구되는 압력상승을 얻기 위한 차단부의 설계변수 조절에 활용될 수 있을 것이다.

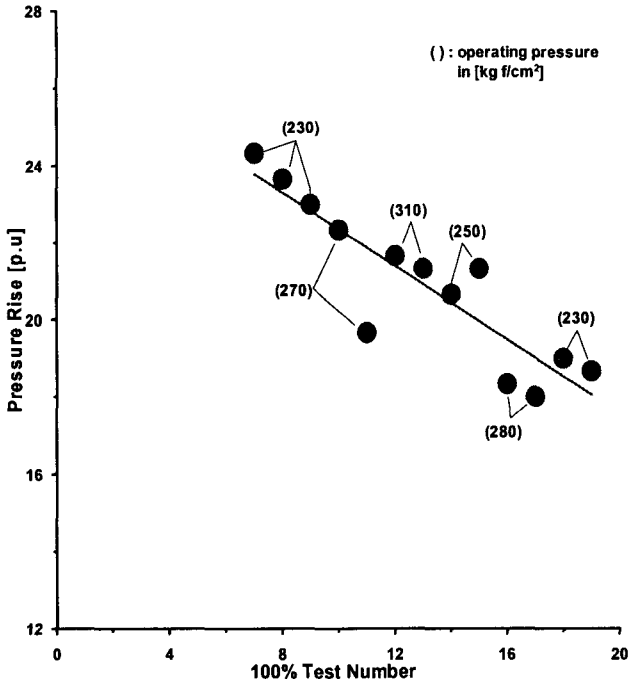


그림 7 “병렬/분리형” 차단부의 유부하 압력상승
Fig. 7 Pressure rise with arc in “parallel/separated type” hybrid interrupter.

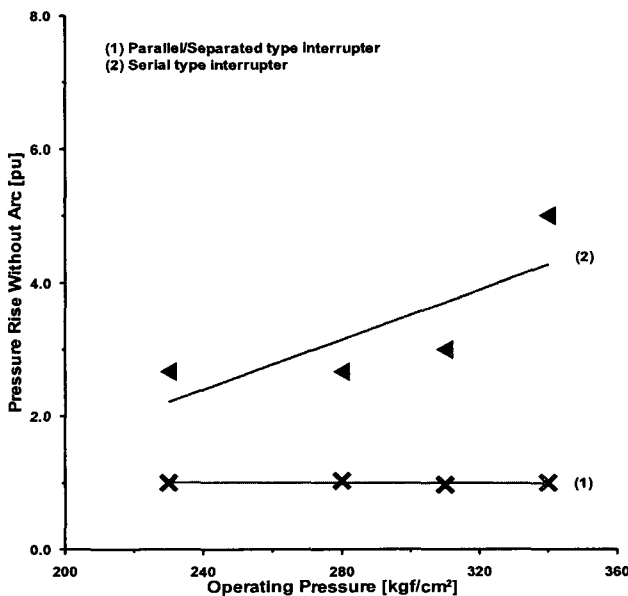


그림 8 “직렬형” 차단부의 무부하 압력상승
Fig. 8 Pressure rise without arc in “serial type” hybrid interrupter.

그림 8은 “직렬형” 복합소호 차단부의 무부하 압력상승을

나타낸 것이다. 조작압력이 증가할수록 팽창실의 압력상승은 증가하는 경향을 보이고 있다. 조작압력이 증가하면서 파퍼 실린더의 압축작용도 자연이 증가하여 압력상승이 증가한다는 것을 쉽게 알 수 있다.

“직렬형” 복합소호 차단부의 차단성능을 표 3에 나타내었다. “병렬/분리형” 복합소호 차단부의 임계 차단성능 $dV/dt = 7.0kV/\mu s$ 에 설정해 놓고 시험했지만, 조작압력에 관계없이 거의 차단성능을 가지지 못하고 있다. 원인을 찾기 위해 100% 차단횟수 3과 4의 스트로크 파형을 그림 9와 같이 중첩시켜 비교하여 보았다. 그 결과 차단 성공한 경우 차단부의 움직임이 느려졌다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 개극 속도가 느려지면서 차단에 성공한 이유를 다음의 “병렬/교류형” 복합소호 차단부의 결과와 함께 검토할 것이다.

표 3. “직렬형” 복합소호 차단부의 차단성능 시험결과
Table 3 Test results of interruption capability of “serial type” hybrid interrupter.

조작압력 [kgf/cm²]	차단전류 [kA _{rms}]	dV/dt [kV/μs]	아크시간 [ms]	결과	100% 차단횟수
230	36.0	7.0	15.6	×	1
			15.6	×	2
			15.4	○	3
			15.4	×	4
			15.2	×	5
340	36.0	7.0	15.2	×	6
			15.2	×	7

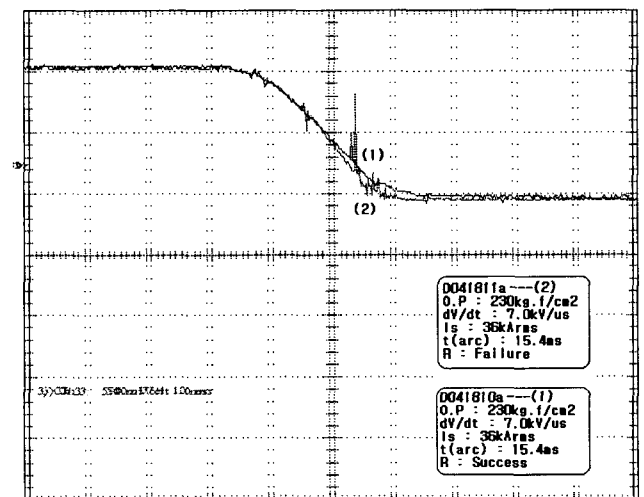


그림 9 “직렬형” 복합소호 차단부의 스트로크 파형 비교((1), (2)는 각각 표 3의 100%차단횟수 3과 4)
Fig. 9 Compare the stroke waves in “serial type” interrupter((1) and (2) denote 3 and 4 of 100% interruption test in table 3 respectively).

조작압력 즉, 개극속도에 따른 “직렬형” 복합소호 차단부의 팽창실의 유부하 압력상승을 그림 10에 나타내었다. 개극속도가 증가할수록 차단에 필요한 팽창실의 유부하 압력상승은 오히려 낮아지고 있다.

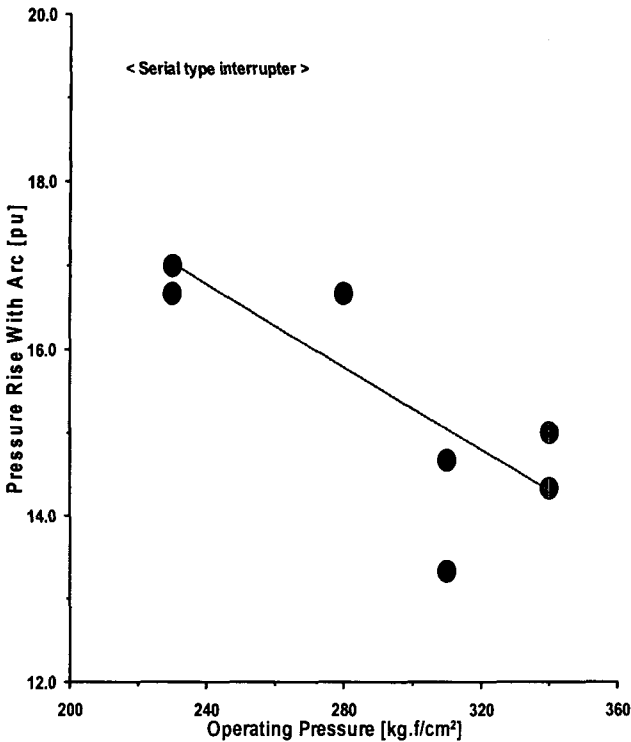


그림 10 “직렬형” 차단부의 유부하 압력상승
Fig. 10 On-load pressure rise of “serial type” interrupter.

“병렬/교류형” 복합소호 차단부에 대한 차단성능시험결과를 표 4에 나타내었다. 회복전압의 상승률과는 무관한 차단 성능을 보여주고 있다. 따라서 그림 9와 같이 유사한 조건에서 차단성공한 경우와 실패한 경우의 스트로크 파형을 비교하여 보았다.

표 4 “병렬/교류형” 복합소호 차단부의 차단성능
Table 4 Test results of interruption capability of “parallel/exchanged type” interrupter.

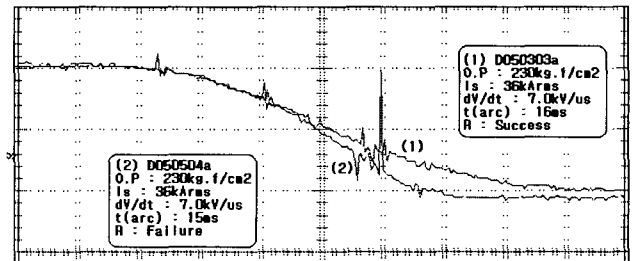
조작압력 [kgf/cm²]	차단전류 [kA _{rms}]	dV/dt [kV/μs]	아크시간 [ms]	결과	100% 차단횟수
230	36.0	7.0	15.0	○	1
			16.0	○	2
			15.0	×	3
			15.0	×	4
			15.0	×	5
		5.8	15.2	○	6
			15.2	×	7
			15.0	×	8
		5.1	15.2	×	9
			15.2	○	10
				15.2	×

그림 11의 (가)는 표 4의 100% 차단횟수 2와 3을 (나)는 9와 10을 각각 비교한 것이다. 그림 11에서 알 수 있듯이 차단에 성공한 경우는 차단기의 움직임이 느려지는 경우이다.

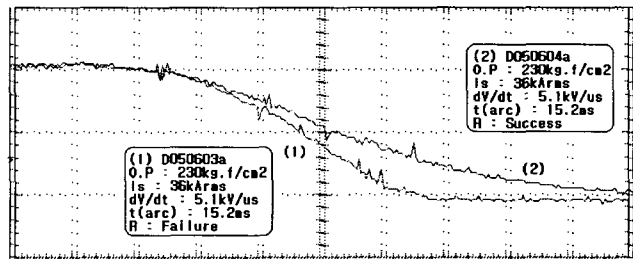
차단기의 차단성능을 나타내는 임계 회복전압 상승률 RRRV_c (critical ratio of rise of recovery voltage)은 다음과 같이 식(2)로 주어진다[7, 8].

$$RRRV_c = kP^\alpha \left(\frac{di}{dt} \right)^{-\beta} \quad (2)$$

여기서 k, α, β는 실험상수이다.



(가) 표 4의 100% 차단횟수 2(파형 (1)), 3(파형(2))



(나) 표 4의 100% 차단횟수 9(파형 (1)), 10(파형(2))

그림 11 “병렬/교류형” 차단부의 스트로크 파형 비교
Fig. 11 Compare the stroke waves in “parallel/exchanged type” interrupter.

식(2)에서 알 수 있듯이 회복전압은 압력상승 P에 비례한다. 즉 차단에 필요한 압력상승이 높을수록 회복전압의 상승률은 증가하며, 결국 차단기의 차단성능도 증가하게 되는 것이다. 따라서 차단기는 고장전류를 차단하기 위해 어느 정도의 압력상승이 요구된다. 이러한 압력상승을 기존의 파파형 차단기에서는 파파 실린더의 압축을 증가시켜 얻었다. 따라서 동작속도(개극속도)가 빠를수록 압력상승은 증가하여 차단기의 차단성능이 증가하는 경향이 있다. 하지만, 복합소호 차단기의 경우에는 그림 10에 나타낸 것과 같이 개극속도가 빠를수록 차단에 필요한 압력상승은 오히려 감소한다. 이것은 복합소호 차단부가 차단에 필요한 압력상승을 아크에너지를 이용해서 얻는다는 것으로 설명된다. 즉, 아크 접점이 분리되어 아크가 발생되면, 고정아크 접점이 노즐 상류장에 머무는 동안에는 SF₆가스가 아크에 의해 팽창되고 팽창된 가스는 팽창실로 역류하게 된다. 고정아크접점이 노즐 목을 지나 노즐 하류장에 이르게 되면 팽창실로 역류했던 가스가 다시 분출되어 아크를 소호하게 된다. 하지만, 개극속도가 너무 빠른 경우, 팽창실의 압력상승을 유도할 시간적 여유가 부족하게 되고 표 4에서처럼 낮은 dV/dt에서도

차단에 실패하게 된다. 또한 고정아크접점이 노즐 하류장에도달하면서부터 차단이 시작된다는 것을 고려하면, 차단기가 고장전류를 차단할 시점인 전류영점이 최소한 하나라도 존재하기 위해서는, 아크접점이 분리된 후 전류의 반주기 이상(60Hz인 경우 8.3ms)부터 차단이 가능해진다(최소 아크시간(minimum arcing time)개념[9])고 볼 수 있다. 따라서 복합소호 차단부의 경우 아크접점 분리지점과 노즐 하류장 시작점을 기준으로 개극속도를 결정하는 것이 가장 중요할 것이다. 예를 들어, 본 연구에서 설계/제작된 차단부의 경우, 아크접점 분리지점부터 노즐 하류장 시작점까지의 거리는 약 40mm이므로, 전류 60Hz인 경우 개극속도는 약 4.8m/s(=40mm/8.3ms)이다. 이러한 관점에서 보면 파퍼형 차단부에 사용되었던 조작기를 복합소호 차단부에 취부하여 고속으로 개극시켰을 경우, 파퍼형 차단부와는 달리 복합소호 차단부에서는 차단성능이 오히려 저하될 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

한편, "병렬/분리형"의 경우, "직렬형"과 "병렬/교류형"과 달리 그림 12와 같이 스트로크 파형이 변형되지 않았음에도 불구하고 차단에 성공한 경우가 있다. 이것은 팽창실의 압력상승 작용으로 차단한 것이라기보다는 파퍼 실린더의 압력상승이 차단에 기여한 것으로 판단된다. "병렬/분리형" 차단부의 경우 속도가 증가할 경우, 다른 두 차단부보다 파퍼 실린더에서 높은 압력상승을 얻을 수 있는 구조이기 때문이다(다른 두 차단부는 피스톤의 작용으로 팽창실과 파퍼실을 동시에 압축 즉, 압축해야 할 체적이 크기 때문).

5. 결 론

동일한 설계변수를 가진 세 가지 형태 즉, "직렬형", "병렬/교류형", "병렬/분리형"의 복합소호 가스차단부를 설계/제작하여 조작력을 변화시켜가면서 차단성능 및 압력상승시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 팽창실을 적용한 복합소호 차단부의 경우, 기존의 파퍼형 차단부가 개극속도가 증가함에 따라 차단성능이 증가하는 것과는 달리, 개극속도가 증가할수록 차단에 필요한 압력상승이 감소하여 차단성능이 저하되었다. 따라서 차단성능을 개선시키기 위해 무리하게 조작기의 조작력을 증가시킬 필요가 없으며, 스프링 또는 모터 구동형 조작기의 취부가 용이해 질 수 있다.
2. 차단횟수가 증가할수록 노즐 목의 용삭으로 팽창실의 압력상승은 감소하였으며, 측정된 압력상승으로부터 노즐 재질(본 연구의 경우 Bn 5% + PTFE 95%)에 대한 압력상승의 변화를 예측할 수 있는 정량적인 결과를 제시하였다.
3. 복합소호 차단부의 경우, 아크접점 분리지점과 노즐 하류장 시작점사이의 거리와 전류파형의 반주기 시간을 고려하여 최적의 개극속도를 결정하는 것이 핵심기술 중의 하나라는 것을 검증시험을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Ruben D. Garzon, High Voltage Circuit Breakers Design and Applications, Marcel Dekker, Inc., pp217-227, 2002.
- [2] 송기동, 박경엽 외, 25.8kV급 열팽창 분사식 차단부의 개발에 관한 연구, 과학기술부 보고서 II, pp17-26, 1995.
- [3] 송기동, 정진교, 박경엽, "팽창실과 파퍼 실린더의 배열 형태에 따른 복합소호 모델 가스차단부의 열적회복특성 비교", 대한전기학회 논문지, Vol. 53B, No. 12, Dec., 2004.
- [4] Kunio Nakanishi, Switching Phenomena in high-Voltage Circuit Breakers, Marcel Dekker, Inc., 1991.
- [5] Ki-Dong Song, Byeong-Yoon Lee and Kyong-Yop Park, "Analysis of Thermal Recovery for SF6 Gas-Blast Arc within Laval Nozzle," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42, pp7073-7079, 2003.
- [6] 이우영, 박경엽, 송기동 외, 간이차단성능 평가기술 및 시스템 개발, 1997-EL02-E-41, 산업자원부, 2000.
- [7] E. Haginomori et al., "Performance of circuit breakers related to high rate of rise of TRV in high-power high-density network," IEEE, PAS-104, No. 8, Aug. 1985.
- [8] Masao Hosokawa et al., "Breaking ability and interrupting phenomena of circuit breaker equipped with parallel resistor or capacitor," IEEE, PDRD-2, No.2, April 1987.
- [9] IEC 62271-100, High-Voltage Alternating-Current Circuit-Breakers, 2001.1.

저 자 소 개

송 기 동(宋基東)

Trans. KIEE. Vol. 53B, No. 12, pp731, Dec.,2004 참조
 Tel : 055-280-1563, Fax : 055-280-1569
 E-mail : kdsong@keri.re.kr

정 진 교(鄭鎭敎)

Trans. KIEE. Vol. 53B, No. 12, pp731, Dec.,2004 참조
 E-mail : jkchong@keri.re.kr

박 경 엽(朴敬燁)

Trans. KIEE. Vol. 53B, No. 12, pp731, Dec.,2004 참조
 E-mail : kypark@keri.re.kr