

The Characteristic Study for Small Current Breaking of High Speed DC Circuit Breaker

閔丙薰[†] · 張禹鎭^{*} · 高寅錫^{**}
 (Byung-Hoon Min · Woo-Jin Jang · In-Suk Ko)

Abstract - Even the case DC circuit Breaker have good quality for interruption of high current like heavy load current, short-circuit current, the verification for small current breaking capability of circuit breaker should be performed. It comes from the reason DC small current breaking failure can be lead to break out second heavy fault condition and in the long run substation shutdown. In this paper, we can find the characteristics of DC small current and international test standard discription about small current breaking and one of the proper solution to get over it.

Key Words : HSCB(High Speed Circuit Breaker), DC Circuit Breaker, Subway Station Breaker

1. 서 론

직류차단기는 그 성능에 따라 HS(high speed), SHS(semi high speed) 및 GS(General speed) 용으로 나누어지며 사용 용도 또한 계통의 보호목적에 따라 달라지게 된다. 물론 차단기의 본연의 임무인 회로전류를 얼마나 빨리 전기적으로 차단하느냐에 따라 HS, SHS, GS로 나누어지지만 큰 관점에서 이 구성은 대전류 차단에 합당한 구분 방식이라 볼 수 있다. 그 이유는 통례적으로 현재 세계의 우수 제품들 모두가 소전류 차단에서는 HS, SHS, GS 라는 구분이 무색해지고 전류 차단시간이 길어지고 일률적이지 않기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 선진외제품 Sample 을 이용하여 외제품의 소전류 차단 성능 수준 및 소전류 차단 실패가 계통에 미치는 영향에 대하여 알아보고 국제시험규격의 소전류에 대한 시험내용과 소전류 차단 성능을 개선할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

2. 본 론

2.1 기존 선진품 Sample 실험

기존 지하철 전력공급시스템에 직류고속도 차단기로 사용되고 있는 선진 우수 메이커의 제품을 Sampling 시험하여 그 소전류 차단 특성에 대해서 알아보았다.

그림 1에 사용되지 않은 신품 상태의 시험용 시료차단기를 본다.

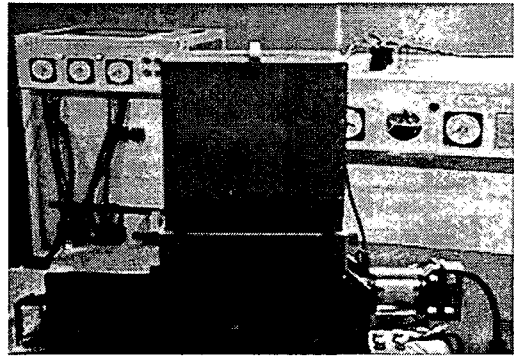


그림 1 선진외제품 DC차단기
 Fig. 1 Advanced imported DC circuit breaker

우선 시험 회로 조건으로서 회로정수를 결정하여야 하는데 일반적으로, DC 도시철도 전력 급전계통에서는 0~500A 구간을 소전류 영역, 500A~수천A 까지를 중전류 영역, 수천A~(6000A~8000A)를 대전류 영역, 8000A 이상을 대전류 영역으로 구분하게 된다. 따라서 일차적으로 시험전류는 500A 미만 부분에 대해서 수행하는 것으로 하고 다음 단계로 IEC61992 규격 “Search of critical currents” 시험 항목에서 언급하고 있는 바와 같이 시험전류는 25A, 50A, 100A, 200A, 400A로 결정 하였다.

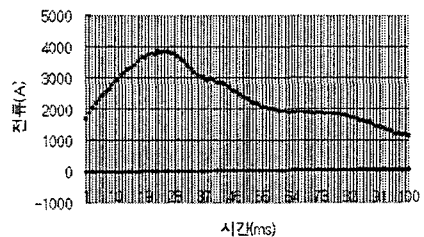


그림 2 S사 부하전류 차단파형
 Fig. 2 Load breaking oscillogram of S company model

† 교신저자, 正會員 : 서울메트로 기술본부장

E-mail : mbh108@naver.com

* 正會員 : 서울산업대 전기공학과 교수

** 正會員 : 인택전기전자(주) 대표이사

接受日字 : 2006年 5月 30日

最終完了 : 2006年 7月 5日

물론 400A 이상에 대해서는 특성 검증이 필요 없으나 하면 꼭 그렇지는 않다. 실제로 서울메트로 2호선 군자변전소에 설치된 수입산 S社 직류고속차단기의 차단성능을 보면 그림 2에 보는 바와 같이 약 4000A에서도 정상적인 전류차단이 되지 않고 아크시간이 100ms 후로 길게 늘어지기 때문이다.

그림 3의 회로를 수식으로 표현하면

$$V = RI + Ldi/dt \quad \dots (1) \text{ 이고}$$

$$\text{시정수 } \tau = L/R \quad \dots (2) \text{ 이므로}$$

(1) 식과 (2) 식을 풀면 표 1과 같은 결과를 쉽게 얻을 수 있다. 즉, 공급 시험전압을 DC1800V로 할때 시험전류 50A를 위해서 회로 저항을 약 36Ω으로 하고 시정수 10ms를 위해서 회로 인덕턴스를 360mH로 조절하였다.

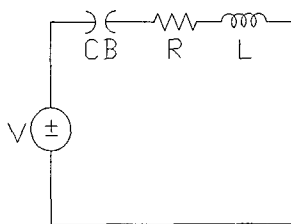


그림 3 유도성 간이등가회로

Fig. 3 Inductive simple equivalent circuit

표 1 회로정수

Table 1 Circuit data

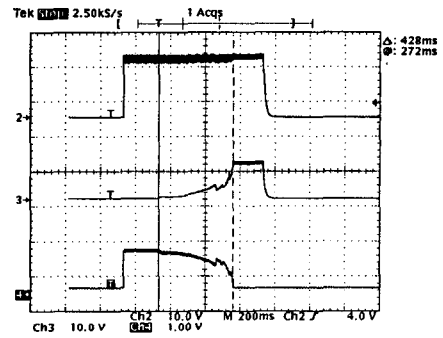
시험전류 (A)	di/dt (A/s)	E (V)	R (Ω)	L (mH)	τ (s)
25	2,500	1800	72	720	0.01
50	5,000	1800	36	360	0.01
100	10,000	1800	18	180	0.01
200	20,000	1800	9	90	0.01
400	40,000	1800	4.5	45	0.01

각 회로조건에서 차단기 시험시 Data 신뢰성 확보를 위해 각 회로마다 5회의 차단시험을 수행하였다. 표 2와 그림 4, 5, 6, 7, 8에 그림 1의 선진 외제품에 대해 수행한 차단시험 Data와 Oscillogram을 각각 실었다.

표 2 선진외제품 소전류시험 결과

Table 2 Small current breaking test result of advanced imported DC circuit breaker

시험 전압 (Vdc)	시험 전류 (A)	시험 횟수 (회)	차단 성공 (회)	차단 실패 (회)	차단 성공률 (%)	성공시 평균차단 시간 (ms)
1800	25	5	5	0	100	476
1800	50	5	2	3	40	748
1800	100	5	3	2	60	512
1800	200	5	2	3	40	500
1800	400	5	1	4	20	564



단) 2CH: 공급전압, 3CH: CB전압, 4CH: 시험전류

그림 4 1800Vdc 25A 차단시험 그래프 (차단성공)

Fig. 4 1800Vdc 25A Breaking test oscillogram (test success)

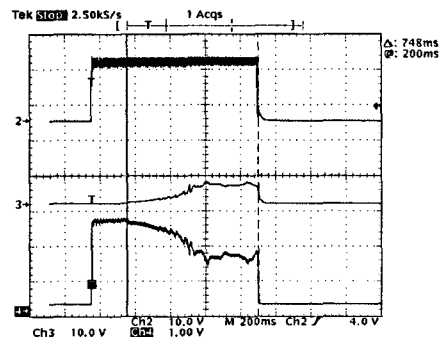


그림 5 1800Vdc 50A 차단시험 그래프 (차단실패)

Fig. 5 1800Vdc 50A Breaking test oscillogram (test failed)

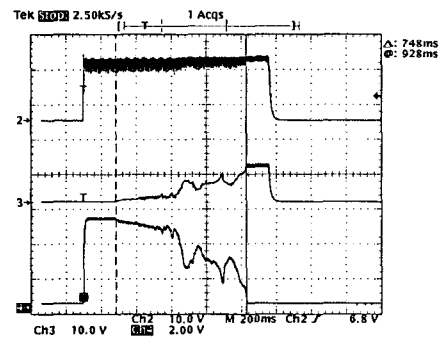


그림 6 1800Vdc 100A 차단시험 그래프 (차단성공)

Fig. 6 1800Vdc 100A Breaking test oscillogram (test success)

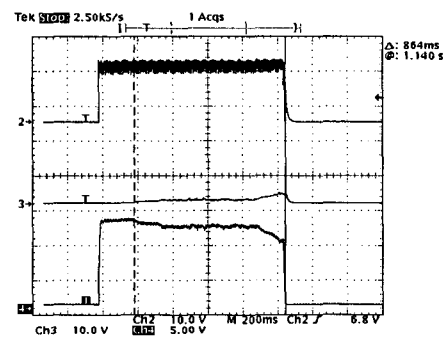


그림 7 1800Vdc 200A 차단시험 그래프 (차단실패)

Fig. 7 1800Vdc 200A Breaking test oscillogram (test failed)

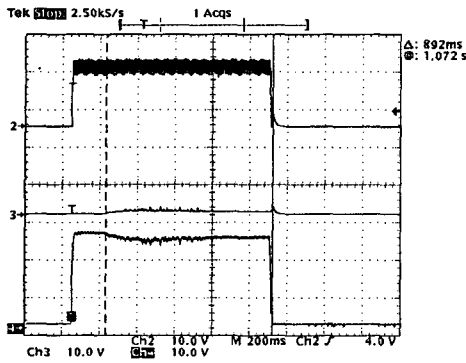


그림 8 1800Vdc 400A 차단시험 그래프 (차단실패)
Fig. 8 1800Vdc 400A Breaking test oscillogram (test failed)

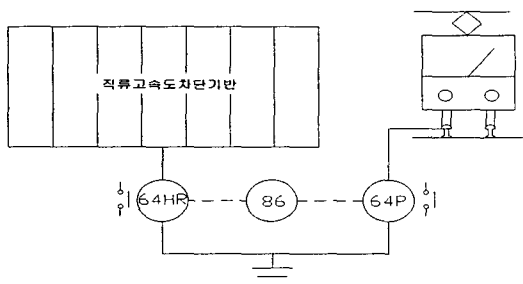
실제, 소전류 차단시험 수행 후 기존품이 소전류 차단에 상당 부분 취약성을 가지고 있음이 밝혀졌다.

위의 시험 Oscillogram을 살펴 보면 그림 4와 그림 6은 긴 아크시간후에 차단에 성공한 것을 볼 수 있고 그림 5와 그림 7 및 그림 8에서는 차단기의 절연 및 접점 손상을 고려하여 시험기준 조건으로 결정한 전류 통전시간 약 1초 동안에 차단완료를 수행하지 못하여 시험실패로 간주하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 비록 전류차단에 성공한 경우도 평균아크 시간이 500ms 이상이 되는 등 긴 아크시간 소요로 문제점이 상존하고 있다.

다음절에 소전류 차단 비정상적 수행에 따른 과급효과와 국제 시험규격을 통해 소전류 차단시험 정의에 대해서 알아보고 이어서 해결책으로 소전류차단 방법에 대해서 논하였다.

2.2 비정상적 소전류 차단

차단기의 회로차단의 의미는 기계적인 회로 열림과 전기적인 회로전류 차단 및 극간 절연회복을 의미한다. 전류가 정상적으로 차단되지 않고 지속되며 최종적으로 회로보호 Back up 차단기가 공급 시험회로를 차단 하므로써 시험이 종료되는 그림 5, 그림 7, 그림 8와 같은 조건에서 만약 회로 전원공급을 중단하지 않고 계속적으로 전원을 공급하였다면 결과는 어떻게 되었을까? 그 결과는 자명하다. 첫째로 긴 시간 후에 전류가 어느 순간 차단이 되던가 또는 아크가 지속되어 차단기는 거의 차단기 본연의 기능을 상실하고 2차 사고로 이어지게 된다. 실제로 도시철도 전력 변전소에서 운전되고 있는 차단기들이 알수 없는 이유로 전체가 트립되어 변전소가 Shutdown 되는 중고장이 간혹 발생하고 있는데 그림 9에 도시철도 변전소 64 HR, 86의 보호 구성을 본다.



설명) 86계전기 동작시 변전소내 모든 차단기 트립

그림 9 변전소 86보호계통
Fig. 9 86 Protection diagram of substation

변전소의 중고장 요소로 동작하는 Lock out relay(86)의 동작요건을 알아보면 64P(접지전압계전기) 또는 64HR(접지전류계전기)가 동작하는 경우인데, 계통(급전선)에서는 접지사고가 없는 상태에서 86이 동작하고 변전소내 전체 차단기가 트립되는 사항으로, 이 경우 차단기의 소전류 차단 실패로 인한 차단기 내부아크의 유출로 정급선과 함체의 전기적 교락에 의해 64HR이 동작한 사고라는 논리가 상당한 설득력을 얻고 있다.

2.3 소전류 차단 시험규격

국제적으로 인정 받고 있는 직류고속차단기 규격으로는 IEC, JEC, IEEE 등이 있으며 표 3에 각 규격의 소전류차단에 대한 내용을 요약하였다. 먼저 JEC 규격을 보면 소전류차단의 중요성을 인식하여 500A 미만에 대하여 시험을 하도록 규정하고 있다. IEEE 규격에서도 특장점이 아닌 연속전류 정격보다 작은 전류로 소전류를 규정하면서 5회의 차단시험을 하도록 규정하고 있다.

표 3 국제규격 소전류차단시험 규정 내용

Table 3 Small current breaking test discription of international standard

JEC 7152 (91)	제목	電氣鐵道變電所用直流高速度氣中遮斷器
	관련 항목	10.4 小電流遮斷試驗
IEEE C 37.14 (99)	제목	Low-voltage DC power circuit breakers used in enclosures
	관련 항목	9.2.8 Load(low) current switching tests
IEC 77 (68)	제목	Rules for electric traction equipments
	관련 항목	21.2.3 Check on the critical current
IEC 61992 (01)	제목	Railway applications fixed installations DC Swit-chgear
	관련 항목	8.3.10 Search for critical currents
	내용	정격최고전압(800Vdc or 1600Vdc)으로 연속 전류 정격보다 작은 전류에서 5회 차단시험 실시 (시정수는 20~60ms 이내일 것)
	내용	정격전압(750Vdc or 1500Vdc)에서 시험전류 5~500A 영역에서 시험함. (회로인덕턴스는 15mH이상 일 것)
	내용	정격전압(900Vdc or 1800Vdc)에서 시험전류 25, 50, 100, 200, 400A에서 차단시험 (각전류에서 시정수는 10ms 이상일 것)
	내용	단락시험후 최고전압에서 50A 또는 최소 트립 정정치의 0.1배에서 2분 간격으로 3회 차단시험 (1회째는 저항부하, 2회와 3회째는 시정수 10ms로 차단시험)

IEC 규격을 보면 과거 IEC 77에서는 단락차단 시험후 50A 한 부분에 대해서만 검증시험을 하는 것으로 규정하고 있으나 현재의 IEC 61992 규격에서는 25, 50, 100, 200, 400A 범위에 대해서 고

르게 시험을 규정하고 있어 직류차단의 사각지대가 없도록 하고 있다. 이와 같이 소전류 차단에 대해서 관대하던 IEC 규격도 2001년도에 IEC 61992 규격이 제정 되면서 소전류 차단에 대한 중요성이 인식되어 시험을 필할 것을 규정하고 있다. 결론적으로 국제적으로 인정 받고 있는 모든 규격들이 소전류 차단시험에 대해 일제히 언급하고 있음을 볼 때, 특수한 소전류 차단장치 기능을 갖추지 않은 직류차단기는 기능을 갖추어야 하고 기능은 있지만 성능이 미흡한 직류차단기는 기능 개선을 통하여 향후적으로 현장에 사용되는 모든 직류차단기는 소전류 차단의 문제점으로 부터 벗어나도록 해야 할 것으로 보인다.

2.4 소전류 차단 방법 연구

2.4.1 직류회로 차단논리 특성 연구

직류회로의 차단을 교류회로의 차단과 달리 반주기 마다 자연영점을 가지는 이점이 없으므로 강제 영점을 만들어 소호를 하여야 하므로 그만큼 회로전류차단이 AC와 비교하여 어렵게 된다. 일반적으로 회로의 DC전류를 0으로 줄이기 위해서는 회로전류의 기울기에 해당하는 di/dt는 음수가 되어야 하는데, 이러한 조건은 차단기의 아크에너지가 공급에너지를 소모하고 아크전압이 시스템의 공급전압을 초과하여야 한다. 더욱이 직류를 차단하는 과정은 더 큰 회로전류 기울기(미분계수)에 도달할수록 빨라지는데 더 큰 미분계수는 아크전압이 증가하고 시정수와 공급전압이 감소할 때 더욱 커지게 된다.

2.4.2 소전류 차단 방법연구

실제적으로 소전류의 차단시에 발생하는 전력에너지는 사고전류 차단시의 에너지와 비교해 보면 약 0.1 ~ 2%에 지나지 않게 된다. 여기서 연구는 두 가지의 방향성을 가지게 된다. 첫째는 대전류차단을 고려한 설계이고 둘째로 소전류차단 우선 설계이다.

본 연구에서는 논제가 소전류 차단 부분이므로 중점적으로 소전류차단에 설계의 초점을 맞추었다. 그리고 차단기가 정상적인 회로전류의 단속과 사고전류차단 등 차단기 자체로서 기능을 갖추기 위해서는 기본적으로 동작 메카니즘 구성, 주회로 구성, 차단부접점 및 절연 외 여러 요소와 특성을 만족해야 하고 이러한 부분이 차단특성에 영향을 미칠 수 있는 변수이지만 본 연구에서는 이러한 부분은 동일한 기능을 발휘 하도록 기능을 일률화 하므로 연구 목적의 신뢰성을 높였다. 소전류 차단 연구의 방법으로 여러 가지를 사용하였으나 실효성이 없었고 유효한 대표적인 방법을 이하 소개한다.

우선, 회로전류를 차단하는 소호실의 소호Baffle에 대한 연구로 여러 형상의 설계를 도모하여 컴퓨터 시뮬레이션 분석을 수행한 결과 그림 11과 그림 12의 구조가 최적임을 알게 되었다.

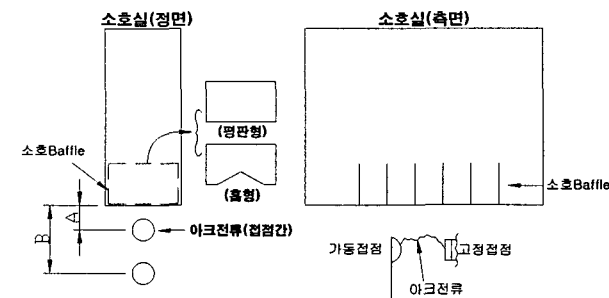


그림 10 모델구성
Fig. 10 Model composition

그림 10에서 보는 바와 같이 해석모델은 소호Baffle의 A(5mm) 지점과 B(30mm) 지점에 약 400A의 아크전류를 생성했을 때의 소호Baffle의 자계의 세기를 비교한 것으로 B에서 최대의 자계의 크기는 그림 11에서 평판형이 1.5Gauss 이고 그림 12에서 홈형 구조가 1.08 Gauss 였다. 그러나 A에서는 그림 13의 평판형이 2.5G 그림 14의 홈형이 약 2.6G로 대등한 값을 보여주고 있다. 모의 시뮬레이션과 실제 시험에서 접점간의 아크전류가 Baffle의 중앙에 존재한다는 보장이 없으므로 실제 제품 제작용으로는 홈형 Baffle 을 선정하게 되었다.

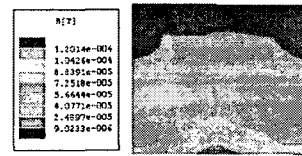


그림 11 평판형 B지점 자계 (1.5G)
Fig. 11 Rectangular type magnetic flux at B point (1.5G)

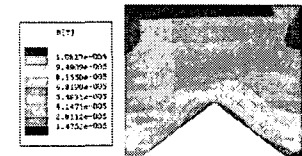


그림 12 홈형 B지점 자계 (1.08G)
Fig. 12 Groove type magnetic flux at B point (1.08G)

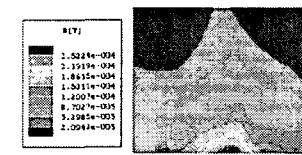


그림 13 평판형 A지점 자계 (2.5G)
Fig. 13 Rectangular type magnetic flux at B point (2.5G)

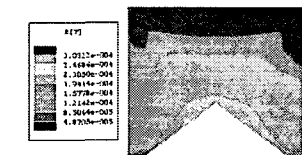


그림 14 홈형 A지점 자계 (2.6G)
Fig. 14 Groove type magnetic flux at B point (2.6G)

홈형 Baffle 을 기초로 소전류차단의 주요한 방법으로 그림 15와 같이 영구자석을 이용하였다. 영구자석은 설치 위치가 차단부 부근인 것을 고려하여 열적내력이 높고 주변자계에 영향이 적은 네오듬계 영구자석을 이용하였다. 표 4에서 실험에 사용한 영구자석의 특성을 본다.

표 4 영구자석 특성

Table 4 Characteristics of permanent magnet

Material	네오뎀계
잔류자속Br(T)	1.11
Recoil μ r	1.05
퍼미언스	0.48
동작점Bd	0.36

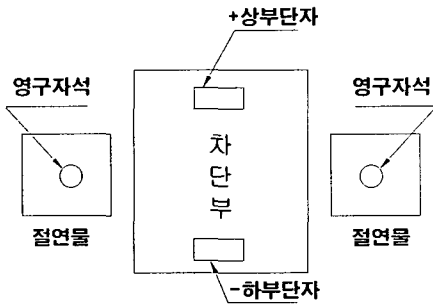


그림 15 영구자석 배치도 (평면도)

Fig. 15 Permanent magnet installed formation (plane figure)

그러나, 영구자석을 이용한 방법은 단방향 다시 말해서 영구자석과 같은 자계의 방향성을 갖는 회로전류는 차단을 잘하는 반면 역방향의 전류 성분은 전혀 차단을 하지 못하고 더욱 차단이 악화되는 결과를 얻었다. 따라서 영구자석을 이용한 방식은 양방향 전류에 대해서 보호요소가 필요한 차단기에는 부적절하게 된다. 하지만 단방향 차단기의 경우에는 영구자석의 외부요소에 의한 감자요소 즉, 단락전류 등 대전류 통전에 따른 외부자계 감자요소와 온도상승 등 열적요소에 의한 감자요소에 영향이 없는지를 충분히 따져서 안전 범위의 부품을 사용하여야 한다.

다음은 영구자석이 가지는 단점을 극복한 방법으로 영구자석 대신에 BOC(Blow Out Coil) 를 설치하는 방법을 검토하였다. 그림 16와 같이 BOC (폭250mm×두께80mm×높이200mm)를 차단부 주변에 설치하였는데 실제 차단기의 차단부 주변은 비어 있는 공간이므로 차단기 본체의 크기에는 영향을 미치지 않았다. 또한 본 설계의 BOC는 모션전압을 전원으로 사용하므로 모션전압의 극성(+ -)에 따라 BOC의 극성이 바뀌는데 대전류 통전시에도 동일한 논리가 적용되어 접점간 아크전류의 유도 방향을 일정한 방향 (항상 상부소호실 방향)으로 한다는 점에서 대전류 차단에도 도움을 주는 결과가 된다.

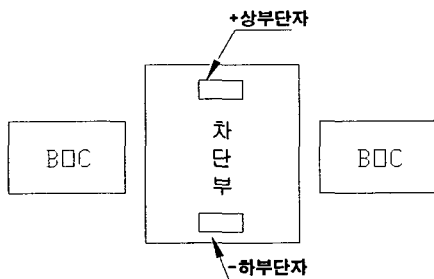


그림 16 BOC 배치도 (평면도)

Fig. 16 BOC installed formation (plane figure)

상기에 연구된 내용을 토대로 시험품을 그림 17과 같이 제작하였다.

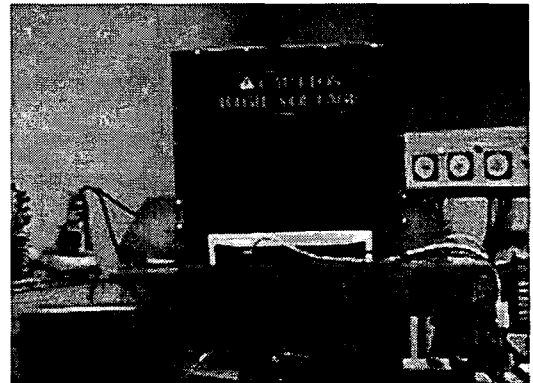


그림 17 시험품 소전류시험 사진

Fig. 17 Small current breaking test picture of test sample

IEC61992 규격을 토대로 25A, 50A, 100 A, 200A, 400A 소전류 차단시험을 수행한 결과 그림 18, 19, 20, 21, 22와 표 5와 같은 양호한 결과를 얻었다.

표 5에서 평균차단시간을 보면 11~22ms 으로 이 값은 기존 외제품 (표 2참조)의 476~632ms를 획기적으로 개선한 것으로 차단기 절연 및 접점 손상 방지에 따른 차단기의 수명과 2.2절에 언급한 소전류차단 실패에 의한 2차 사고의 가능성을 배제할 수 있게 되었다.

표 5 연구품 소전류시험 결과

Table 5 Small current breaking test result of test sample

시험 전압 (Vdc)	시험 전류 (A)	시험 횟수 (회)	차단 성공 (회)	차단 실패 (회)	차단 성공률 (%)	평균차단 시간 (ms)
1800	25	5	5	0	100	11
1800	50	5	5	0	100	17
1800	100	5	5	0	100	19
1800	200	5	5	0	100	22
1800	400	5	5	0	100	20

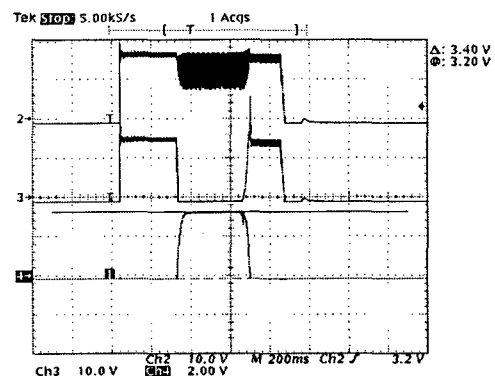


그림 18 1800Vdc 25A 차단시험 그래프

Fig. 18 1800Vdc 25A Breaking test oscillogram

3. 결 론

본 논문을 통해 기존 선진 외제품들도 현안의 문제점으로 가지고 있는 소전류 차단 실패에 대해서 실시험을 통해 확인 하였고 시험적으로나 국제규격을 통해서 볼 때 실제 소전류가 작은 값이라고 무시할 수 있는 사안이 절대 아니며 소전류 차단 실패가 곧 변전소 현장에서 모든 차단기의 트립에 따른 변전소 Shut-down 의 결과로 이어질 수 있음을 보았다.

여러 소전류 차단 실험중 차단부에 BOC(Blow Out Coil)을 설치한 구조가 혁신적인 방법이며, 또한 외부전원에 의존하지 않고 자기 모션전원을 사용한다는 측면에서 상당히 양호한 디자인으로 판단되며 선진 외제품이 가지지 못한 숙제를 해결하였다는 점에서 높은 평가가 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] C.H.Flurscheim, "Power circuit breaker theory and design" pp. 189-234, 1982.
- [2] THOMAS.E. BROWN, JR. "Circuit interruption" pp. 425-453, 1984.
- [3] GREENWOOD, A.N., and T.H.LEE, "Theory and application of the communication principle for HVDC circuit breakers" .IEEE Trans .,91, pp. 1570-1574, 1972.
- [4] MORTON, J.S. "Coil-less cold cathode arc chutes for high-speed d.c. circuit breakers for use on traction systems", IEEE Proc. ,127, Pt .B ,pp. 34-45, 1980.
- [5] "電氣鐵道變電所用直流高速度氣中遮斷器", JEC7152, pp. 36, 1991.
- [6] "Low-voltage DC power circuit breakers used in enclosures", IEEE Std C37.14, pp. 18, 1999.
- [7] "Rules for electric traction equipments", IEC77, pp. 36-37, 1968.
- [8] "Railway applications fixed installations DC Switchgear", IEC61992, pp. 46-47, 2001.

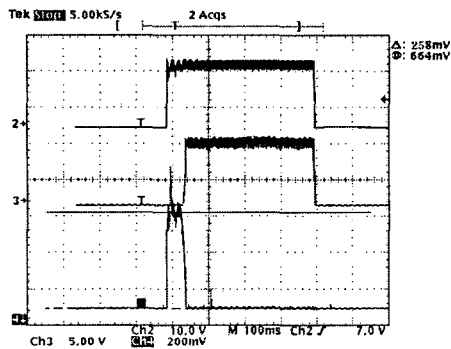


그림 19 1800Vdc 50A 차단시험 그래프
Fig. 19 1800Vdc 50A Breaking test oscillogram

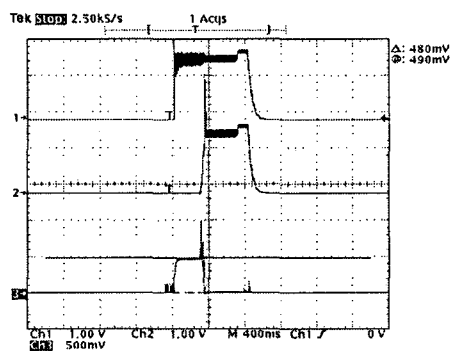


그림 20 1800Vdc 100A 차단시험 그래프
Fig. 20 1800Vdc 100A Breaking test oscillogram

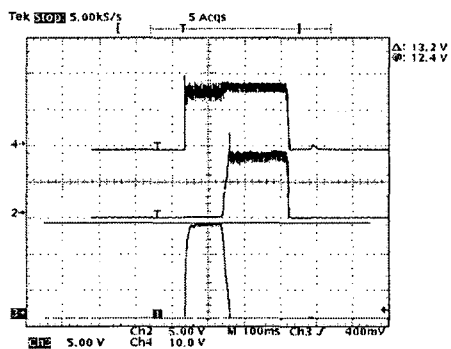


그림 21 1800Vdc 200A 차단시험 그래프
Fig. 21 1800Vdc 200A Breaking test oscillogram

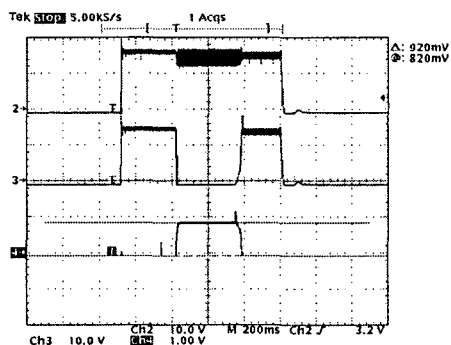


그림 22 1800Vdc 400A 차단시험 그래프
Fig. 22 1800Vdc 400A Breaking test oscillogram

저 자 소 개



민 병 훈 (閔 丙 薰)

1951년 5월 21일생. 1988년 국립경기공업개방대학교 전기공학과 졸업. 2002년~현재 철도전문대학원 철도전기신호학과 박사과정, 2003년~현재 서울메트로 기술본부장
Tel : 02-520-5012
Fax : 02-520-5018
E-mail : mbh108@naver.com



고 인 석 (高 寅 錫)

1945년 6월 15일생. 1967년 전남대 전기공학과 졸업. 1996년~현재 인택전기전자(주) 대표이사
Tel : 031-227-1161
Fax : 031-227-1164
E-mail : entec@entecene.co.kr



장 우 진 (張 禹 鎭)

1956년 5월 13일생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 동대학원 전기공학과 박사학위. 1984년~현재 서울산업대 전기공학과 교수
Tel : 02-970-6414
Fax : 02-978-2754
E-mail : hlight@snut.ac.kr