

탠덤형 자석 소호기를 사용한 760V급 직류 개폐기의 차단 특성

김효성[†]

760 V-Class DC Switch Breaking Characteristics Using Tandem Type Magnet Extinguisher

Hyosung Kim[†]

Abstract

Magnetic arc extinguishing technology is effective as an extinguishing device for low-voltage direct current (DC) circuit breakers with a resistive load of ≤ 4 kW. The separation distance between the magnet and the electrical contact must be shortened to increase the magnetic arc extinguishing force. However, if the magnet is installed too close to the electrical contact points, the magnet is exposed to high temperatures due to the arc current generated when the load current is cut off and the magnetism is lost. To solve this problem, the effective magnetic flux density at the electrical contact can be maintained high by placing the arc extinguishing magnet in a tandem structure with the electrical contact point between them, and the proper separation distance between the contact points and the magnet can be maintained. In addition, an electric arc extinguishing technology that emits arc energy using a series circuit of diode and resistor is used to suppress the continuous arc voltage generated by the inductive load. For the proposed circuit breaker, the breaking characteristics are analyzed through the breaking test for the DC load of the 760 V level, the load power of 4 kW, and the time constant of 5 ms, and an appropriate arc extinguishing design guideline is proposed.

Key words: LVDC switches, Magnet arc extinguisher, Tandem magnet structure, 760V DC system, Breaking characteristics

1. 서 론

신재생 에너지에 기반한 분산발전의 증가와 데이터센터 전기차 등 직류부하의 증가에 따라 직류배전의 관심이 증대되고 있다^{[1]-[5]}. 직류배전 계통의 안전 확보를 위한 필수 요소 중 하나는 배전반의 개폐기이다. 기존의 AC 계통에 사용되는 접촉식 스위치는 도통 손실이 매우 낮아 개폐기로 널리 사용되어 왔다^{[6]-[8]}.

직류에서는 전류영점이 없으므로 회로 차단 시 발생하는 차단아크의 소호를 위한 전용의 소호장치가 필요하다^[9]. 4[kW] 이하 저항부하의 저압직류 회로 차단기의

소호장치로써 자기적 아크 소호 기술이 효과적이다^[10]. 자기적 아크 소호 기법은 자석에서 형성되는 자력선을 전기 접점에서 발생하는 아크 전류의 흐름과 직각으로 배치한다. 그러면 아크 전류에는 플레밍의 왼손 법칙에 따른 로렌츠 힘(Lorentz's force)이 발생하여 아크가 공간으로 분산됨으로써 아크 저항값이 증가하게 된다. 따라서 아크 에너지가 빨리 소모되어 차단 시간이 줄어드는 효과를 기대할 수 있다.

자기적 아크 소호를 일으키는 자기력의 세기는 자석 밀도의 크기에 비례한다. 자기적 아크 소호력을 증가시키기 위해서는 자석과 전기 접점 간의 이격 거리를 짧게 하여야 한다. 그러나 자석이 접점과 너무 가깝게 설치되면 부하전류 차단 시 발생하는 아크 전류에 의하여 자석이 고온에 노출되어 자성을 잃어버리는 사고가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 아크가 발생하는 전기 접점을 사이에 두고 아크 소호용 자석을 탠덤형 구조로 이중배치 함으로써 전기 접점에서의 유효 자속 밀도는 높게 유지하면서, 접점과 자석 간의 이격 거리는

Paper number: TKPE-2022-27-3-1

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic, & Control Engineering, Kongju National University, Korea

Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

Manuscript received Sep. 18, 2021; revised Nov. 1, 2021; accepted Nov. 30, 2021

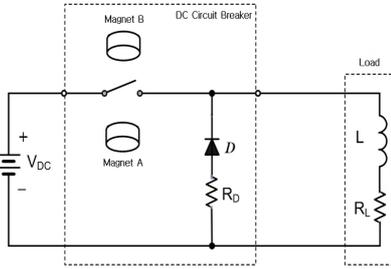


Fig. 1. Concept of proposed DC switch.

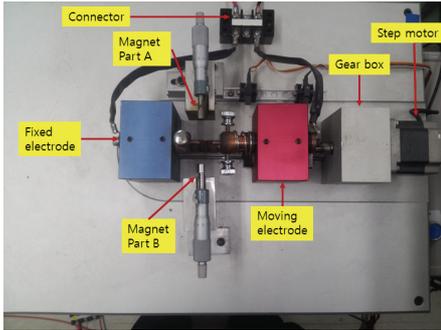


Fig. 2. Photo of prototype DC switch.

여유 있게 유지할 수 있다. 두 개의 자석을 탠덤 구조로 이중배치하게 되면 자석과 차단극 사이 거리의 자속에 비례하여 발산되는 자속을 차단극 주위로 모을 수 있게 된다^[10].

본 연구에서는 저압직류 계통에서 효과적인 회로차단을 위하여 탠덤형 자력선 집중회로를 사용하여 자기적 아크 소호력을 개선한다. 또한 유도성 부하에 의해서 발생하는 지속적인 아크 전압의 발생을 억제하기 위하여 다이오드와 저항의 직렬회로에 의하여 아크 에너지를 발산시키는 전기적 아크 소호 기술을 사용한다. 한국전력에서 직류수용가에 제공할 것으로 예상되는 저압 직류배전의 공급전압은 760[V]이다^[11]. 따라서 각 수용가의 소비전력을 4[kW]로 가정하여, 제안하는 회로 차단기에 대하여 760[V] 레벨의 전압 전압과 부하전력 4[kW], 시정수 5[ms] 급의 직류부하에 대하여 차단실험을 통하여 차단 특성을 분석하고 적절한 아크 소호 설계 가이드라인을 제시한다.

2. PSFB 동작 원리 및 소신호 모델

그림 1에 제안하는 직류차단기의 회로구조를 보인다. 본 연구에서는 탠덤형으로 배치된 영구자석을 사용한 자력선 집중회로를 사용하여 자기적 아크 소호력을 개선한다. 또한 유도성 부하에 의해서 발생하는 지속적인 아크 전압의 발생을 억제하기 위하여 다이오드와 저항의 직렬회로에 의하여 아크 에너지를 발산시키는 전기적 아크 소호 기술을 사용한다. 제안한 자기적 아크 소호 기법은 자석에서 형성되는 자력선을 전기 접점에서

TABLE I
EXPERIMENTAL CONDITION

Parameter	Value	Unit
Supply voltage	760	V _{dc}
Load current	5 [A]	A
Time constant	5 [ms]	ms
Contact material	AW18-Cu	-
Opening speed	50 - 150	mm/s
Magnet material	N35 (NdFeB)	
Magnet size	Diameter: 8 [mm] Length: 10 [mm]	

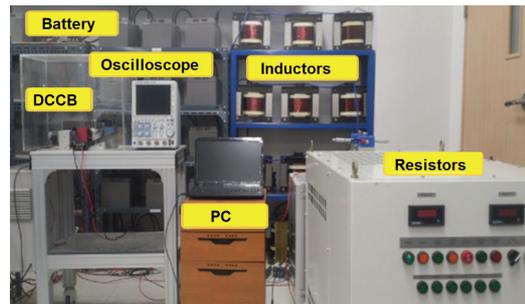


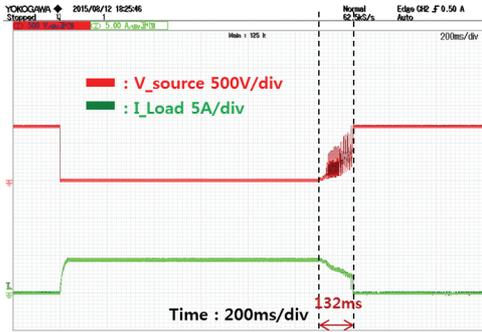
Fig. 3. Photo of DC switch experimental system.

발생하는 아크 전류의 흐름과 직각으로 배치한다. 그림 2는 제안하는 직류차단기의 실험을 위한 전기 접점 구동장치의 외관을 보인다. 접점의 개리 속도는 스텝 모터와 기어 구동부에 의하여 제어한다.

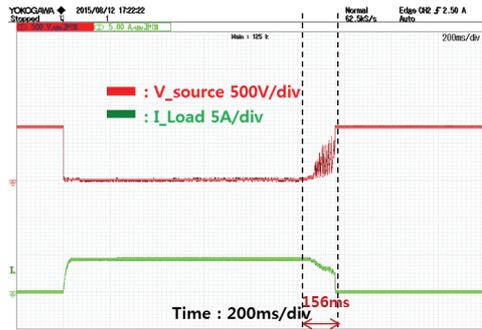
표 1에 차단실험 조건을 보인다. 부하전류는 5[A]가 되도록 부하의 저항값을 설정하였다. 부하는 유도성 부하로서 시정수가 5[ms]가 되도록 인덕턴스를 설정하였다. 그림 3은 실험장치를 구성한 외관 사진을 보인다.

3. 아크 소호 특성 실험 결과

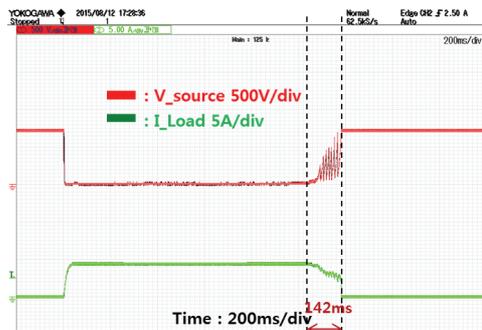
본 논문에서는 제안된 아크 소호기의 설계에 따라 제작된 실험용 직류차단기를 적용하여 차단극의 이송속도와 소호 자석의 이격 거리에 따른 차단기의 차단 특성에 대하여 실험하고 결과를 분석한다. 그림 4는 차단극의 개리 속도를 150[mm/s]로 하였을 때, 소호 자석의 이격 거리에 따른 차단 시 전압-전류 실험 곡선을 보인다. 이와 같은 실험을 차단극의 개리 속도를 150[mm/s]로부터 25[mm/s]씩 5단계로 감소하여 50[mm/s]까지 낮추어 가면서, 각 실험 조건에 대하여 5번씩 반복 실험하여 평균 차단 시간을 측정한다. 그림 5는 차단극의 개리 속도를 5단계로 변화시켰을 경우, 소호 자석의 이격 거리에 따른 평균 차단 시간을 3차원 그래프로 그린 것이다. 차단극의 개리 속도 100[mm/s]를 기준으로 차단 특성이 현저하게 달라짐을 알 수 있다. 즉, 차단극 개리 속도 100[mm/s]



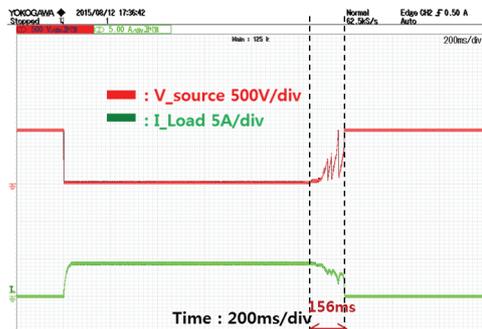
(a) Magnet distance = 20 [mm]



(b) Magnet distance = 25 [mm]



(c) Magnet distance = 30 [mm]



(d) Magnet distance = 35 [mm]

Fig. 4. Waveform for DC breaking experiment (Gap opening speed = 150 [mm/s]).

이하에서는 개리 속도에 따라 차단 시간의 차이가 심하게 나타나지만, 차단극의 개리 속도가 100[mm/s]를 넘게 되면 개리 속도에 따른 차단 시간의 변화가 그리 크지 않게 된다. 따라서 차단극 접점의 개리 속도는 100[mm/s] 이상이 되도록 하는 것이 바람직하다.

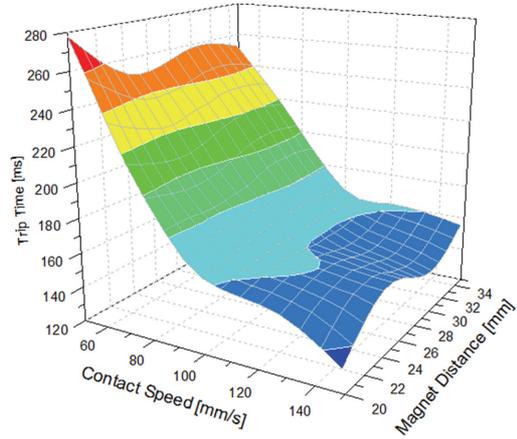


Fig. 5. 3-D graph of DC switch breaking characteristics.

TABLE II
TRIP TIME ACCORDING TO MAGNET DISTANCE AND GAP OPENING SPEED.

Opening Speed [mm/s]	Magnet Distance [mm]				Avg. [ms]	Std. Dev. [%]
	20	25	30	35		
50	257	247	242	242	247	7
75	171	191	192	202	189	13
100	156	163	172	178	167	10
125	143	136	152	157	147	10
150	130	163	157	161	153	16

표 2는 자석 거리와 차단극 개리 속도에 따른 차단 특성을 표로 정리한 것이다. IEC60947-2 표준 8.3.9항에서는 4[A] - 63[A] 범위의 전류조건에서 차단기의 아킹 시간이 1초 이하가 되도록 정하고 있으므로 표 2의 실험결과는 IEC 표준을 만족하고 있다^[12]. 각 개리 속도 조건에서 소호 자석의 이격 거리를 20[mm]에서 35[mm] 까지 4단계로 달리하였을 경우 평균 차단 시간의 표준 오차는 그리 큰 차이를 보이지 않는다. 즉, 개리 속도 75[mm/s], 및 150[mm/s]의 조건을 제외하고는 소호 자석의 이격 거리에 따른 평균 차단 시간의 표준 오차는 10% 이내이다.

그림 6은 자석 거리와 차단극 개리 속도에 따른 차단 특성 중 대표적인 3가지 개리 속도에 대한 차단 특성을 그래프로 그린 것이다. 개리 속도 100[mm/s], 및 150 [mm/s]의 조건에서는 소호 자석의 거리가 증가함에 따라 차단 시간이 증가하는 양상을 보인다. 이는 소호 자석의 이격 거리 증가에 따라 차단극 접점에서의 자속밀도가 감소할 것이므로 물리적으로 타당하다. 그러나 개리 속도 50[mm/s]의 조건에서는 소호 자석의 거리가 증가함에 따라 차단 시간이 오히려 줄어드는 특성을 보인다. 이는 낮은 개리 속도에서는 전반적으로 차단 아크의

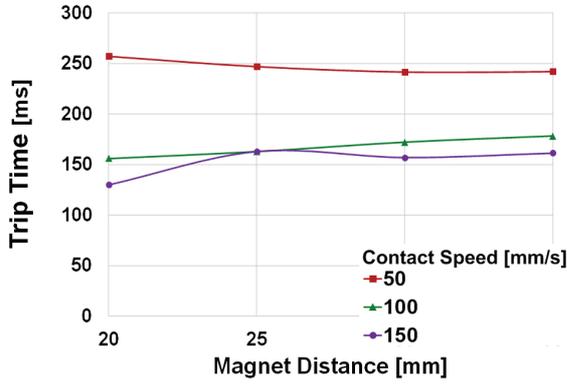


Fig. 6. Switch breaking characteristics according to magnet distance and gap opening speed.

발생 시간이 길어져서 소호 자석이 열적 스트레스를 받아서 자석의 이격 거리가 작을수록 자력이 약화되는 현상이 나타나는 것으로 보인다. 반복적인 차단 동작에 의해서 이러한 현상은 더욱 심화될 것으로 보인다. 이러한 현상은 높은 개리 속도 조건에서도 차단 동작이 반복되는 경우 같은 양상으로 나타날 것으로 보인다. 따라서 전체적으로 보았을 경우 적절한 자석 이격 거리는 30 - 35[mm]인 것으로 판단된다.

4. 아크 소호 성능 개선

제안하는 차단기는 IEC60947-2 표준을 만족하였으나 가정용으로 사용되기 위해서는 좀 더 빠른 차단 시간을 갖는 차단기의 개발이 요구된다. 본 연구에서 제안한 자기적 아크 소호 기법은 자석에서 형성되는 자력선을 전기 접점에서 발생하는 아크 전류의 상호관계에 의한 로렌츠 힘을 사용한다. 그림 7은 여러 쌍의 자석 배치에 의해 증강되는 자석 소호기의 로렌츠 힘 개념을 보인다. 이 경우 로렌츠 힘은 다음식으로 표현된다.

$$F_{rorenz} = B_{eff} \times L_{eff} \times I_{arc} \quad (1)$$

- 단, B_{eff} : 유효 자속 밀도
- L_{eff} : 유효 자속이 아크 전류에 미치는 유효길이
- I_{arc} : 아크 전류의 크기

이와 같이 로렌츠 힘은 유효 자속 밀도와 유효길이의 곱에 비례한다. 재료의 한계로 유효 자속 밀도를 증가시키는 데는 한계가 있으나, 자석쌍을 병렬로 배치하여 전류에 가해지는 자속의 유효길이를 증가시키면 로렌츠 힘을 증가시킬 수 있다.

다시 말해 그림 7(a)의 경우에 비하여 그림 7(b)의 경우는 3쌍의 자석이 아크 전류가 흐르는 방향으로 병렬로 배치되어 있기 때문에 자속력이 가해지는 유효길이가 3배 정도 증가하게 되어 아크에 가해지는 로렌츠 힘도 3배 정도 증가할 것이다. 따라서 자석의 소호력이 증강될 것으로 예상된다.

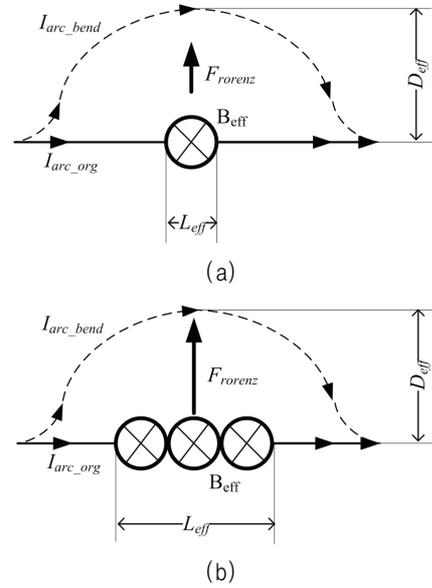


Fig. 7. Principle of Rorenz's force using paralleled magnets.

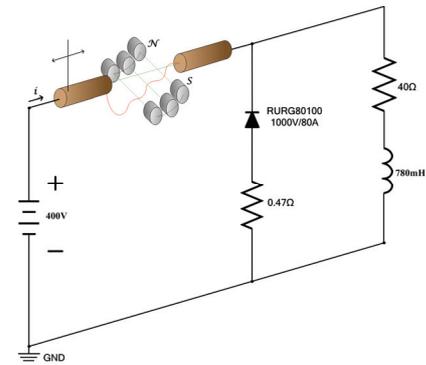


Fig. 8. Concept of increasing Rorenz force using triple paralleled tandem magnet pairs.

TABLE III
TRIP PERFORMANCE OF PROPOSED CIRCUIT BREAKER USING SINGLE TANDEM MAGNET PAIR AND TRIPLE TANDEM MAGNET PAIRS.

Load Current (A)	Trip Time (ms)		Ratio (%)
	Single	Triple	
5 A	71.6	11.6	16
9 A	118.7	27.4	23
14 A	130	41.9	30
18 A	Fail	41.9	-

그림 8에 3중 병렬로 자석쌍을 배치하여 로렌츠 힘을 증강시켜서 아크 소호력이 개선되도록 한 자석 소호기의 설계 개념을 보인다. 이때 자석쌍을 직선적으로 배치하지 않고 아크 형태로 배치함으로써 전류 아크의 분산을 더욱 촉진시킬 수 있다.

표 3에 단일 자석쌍과 3중 병렬 자석쌍에 따른 실험

용 차단기의 차단 성능을 비교한 실험 결과를 보인다. 전원 전압은 760[V]를 인가하였으며 저항성 부하전류는 5[A] - 18[A]를 가하였다. 3중 병렬 자석쌍에 따른 실험용 차단기는 단일 자석쌍의 경우에 비하여 전체적으로 차단 시간이 30% 이하로 줄어들었으며, 낮은 부하전류에서 성능의 차이는 더욱 크게 나타났다. 더욱이 18[A] 부하전류 조건에서 단일 자석쌍의 경우는 차단실패가 발생하였으나 3중 병렬 자석쌍에 따른 실험용 차단기는 약 42[ms]의 시간 내에서 회로차단이 가능하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 탠덤형 소호 자석과 프리 휠링 다이오드 분기 회로를 조합하여 제안된 아크 소호기의 직류 차단 특성을 실험을 통하여 분석하였다. 제작된 실험용 직류차단기를 적용하여 차단극의 개리 속도와 소호 자석의 이격 거리를 달리하여 760[V], 5[A], 부하 시정수 5[ms]의 유도성 부하에 대하여 회로 차단 실험을 실시하여 차단 시간을 분석하였다. 차단극의 개리 속도가 100[mm/s]를 넘어서면 제안한 직류차단기는 아크 소호기의 차단 시간에 큰 차이가 없었으며, 열적 스트레스까지 고려한 소호 자석의 적절한 이격 거리는 30 - 35[mm]인 것으로 분석되었다. 제안하는 차단기는 IEC60947-2 표준을 만족하였으나 가정용으로 사용되기 위해서는 좀 더 빠른 차단 시간을 갖는 차단기의 개발이 요구되며, 소호 자석의 반복 동작에 따른 열적 스트레스에 의한 노후 현상을 고려한 최적 이격 거리는 좀 더 연구해야 할 과제로 남는다.

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

References

- [1] A. Pratt, P. Kumar, and T. V. Aldridge, "Evaluation of 400 V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency," *INTELEC*, pp. 32 - 39, 2007.
- [2] T. Babasaki, "Developing of higher voltage direct-current power-feeding prototype system," *INTELEC*, pp. 1 - 5, 2009.
- [3] E. Rodriguez-Diaz, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Intelligent DC homes in future sustainable energy systems: When efficiency and intelligence work together," *IEEE Consum. Mag.*, Vol. 5, No. 1, pp. 74 - 80, 2016.
- [4] T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, and D. Skrlec, "Advanced LVDC electrical power architectures and microgrids: A step toward a new generation of power distribution net-works," *IEEE Electr. Mag.*, Vol. 2, No. 1, pp. 54 - 65, 2014.
- [5] M. G. Jahromi, G. Mirzaeva, S. D. Mitchell, and D. Gay, "Powering mobile mining machines: DC versus AC power," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, Vol. 22, No. 5, pp. 63 - 72, 2016.
- [6] H. Kim, "DC distribution systems and circuit breaking technology," *The Magazine of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 15, No. 5, pp. 40 - 46, 2010.
- [7] ABB, "ABB circuit-breakers for direct current applications," *ABB SACE*, S.p.A, 2007.
- [8] C. Strobl et al., "Safety concepts and circuit protection for LVDC grids in datacenters and in telecommunications," *INTELEC*, CD ROM, 2018.
- [9] S. Lee and H. Kim, "Development of DC circuit breaker using magnet arc extinguisher," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 21 - 26, 2012.
- [10] Y. J. Kim and H. Kim, "Novel DC circuit breaker using magnet-extinguisher and free-wheel diode," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 14, pp. 497 - 503, Jan. 2019.
- [11] J. Y. Kim, "KEPCO public DC distribution business model," *DC Distribution Workshop, Korea Electric Power Research Institute*, 2014.
- [12] *IEC60479-2 Standard, Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2: Circuit-breakers*, Edition 5.0, Jun. 2016.



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오카야마대 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.