

직류(DC)배전과 회로차단기술

김 호 성

(공주대 천안공과대학 전기전자제어공학부 교수)

1. 개요

최근들어 신재생에너지원의 급속한 보급, 고신뢰 및 고효율 전원망에 대한 고객의 요구, 디지털부하의 급증, 등 기술적·사회적 환경의 변화에 따라 직류배전망에 대한 관심이 높아지고 있다.

미국 EPRI에서는 2020년까지 디지털부하가 전체부하의 50%를 차지할 것으로 예측하고 있다. 미국의 로렌스버클리 연구소(NBNL)에서는 380V 직류배전에 대한 연구를 하고 있으며, 연구의 결과를 토대로 표준 직류전압의 수립할 목표를 세우고 있다. 일본의 NTT는 IDC (Internet Data Center)를 자체적인 직류배전망으로 구성하여 운전한 경험을 토대로 400V 표준 직류전압을 추진하고 있다. 유럽에서는 에너지를 100%자급하는 그린홈과 신재생에너지의 연계로 직류배전망에 대한 관심이 고조되고 있다. 국내에서는 KT에서 IDC의 직류배전망 구축을 경험으로 직류배전에 관한 연구에 관심을 보이고 있으며 ETRI 등 타기관과의 협력하에 IDC 직류배전 표준전압 수립을 추진하고 있다.

이와 같이 직류배전에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데, 직류배전망의 안전성에 관한 문제도 지속적으로 제기되고 있다. 안전성은 두 가지 측면에서 확보가 이루어져야 한다. 첫째로 인체안전성이고, 둘째로 전력설비 및 기기의 안전성이다.

전력설비 및 기기의 안전성을 확보하기 위하여는 고장전류로부터 계통을 보호하기 위한 차단기술, 낙뢰, 절연고장 등으로부터 계통을 보호하기 위한 접지기술 등이 필요하다.

저압 배전망에서 기존에 사용되어 왔던 대표적인 보호차단 기술은 퓨즈(Fuse)와 회로차단기(Circuit breaker)이다. 퓨즈는 전류의 실효값(RMS)에 따른 열에너지에 의해 용융되어 동작 하므로 교류전류와 직류전류에서 특성에 큰 차이가 없다.

그러나 회로차단기는 점접양단에 발생하는 아크전압의 크기가 중요한 변수가 된다. 또한 부하전류가 매 받주기마다 스스로 제로가 되는 교류배전망과, 그렇지 않고 일정하게 흐르는 직류배전망에서의 동작상황은 확연히 달라진다. 예를 들어 직류배전망에서는 회로차단기가 충분한 아크전압을 확보하지 못하고 사고전류의 지속적 흐름을 허용하게 되면 대형 화재사고로 이어질 수 있는 가능성이 있다. 이는 많은 장점을 갖고 있음에도 불구하고 직류배전망의 보급을 저해하여 왔던 중요한 요인 중의 하나이다.

본고에서는 직류배전 설비 및 기기의 안전성을 확보하기 위한 회로차단 기술에 대하여 정리해 보고자 한다.

2. 차단기의 기본용어

차단기에서 사용되는 기본적인 용어를 정리하면 다음과 같다.

2.1 최대 부하전류 : I_B

최종회로에서 최대 부하전류는 부하정격용량에 비례한다. 케이블과 열동계전기 모두는 최대 부하전류의 영향을 받는

다. 모든 상위회로 레벨에서 이 전류는 공급 가능해야 한다.

2.2 최대 도체허용전류 : I_z

최대 도체허용전류는 예상수명에 영향을 주지 않고 회로의 배선에 상시 흘릴 수 있는 전류의 최대값이다. 이 전류는 어느 주어진 도체의 단면적에 대하여 다음과 같은 몇 가지 파라미터에 의존한다.

- 케이블 특성 (도체, 절연체, 충전 도체수 등)
- 주위온도
- 시설방법
- 인접회로의 영향

2.3 과전류

전류의 크기가 해당 부하에 대하여 최대 부하전류 I_B 를 초과하는 전류를 과전류라 한다. 배선의 영구적인 손상을 방지하려면 과전류를 신속히 차단해야 한다. 그러나 비교적 짧은 지속시간의 과전류는 정상운전 중에도 흐르며 과전류의 두 가지 유형은 다음과 같이 구별된다.

2.3.1 과부하

과부하는 최대 부하전류(I_B)보다 큰 전류가 지속적으로 흐르는 경우 발생한다. 만약 이러한 과부하 상태가 보호계전기의 설정 및 퓨즈의 정격에 의해 정해지는 일정한 기간 동안 지속되면 회로는 자동적으로 차단된다.

2.3.2 단락전류

단락전류는 각 상간 혹은 각 상과 대지 사이(중성선 저임피던스 접지계통)의 다음과 같은 절연 고장에 의해 흐르게 된다.

- 3상 단락
- 2상 단락
- 1상과 중성선 사이의 단락

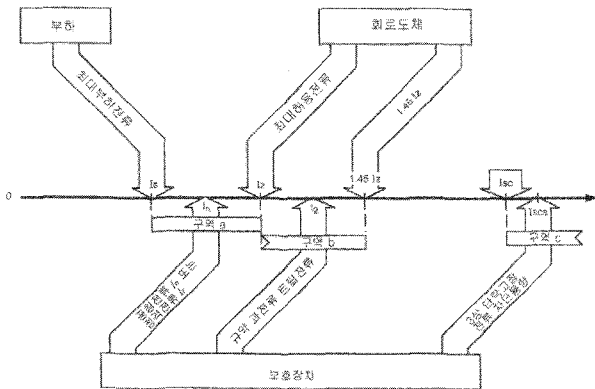


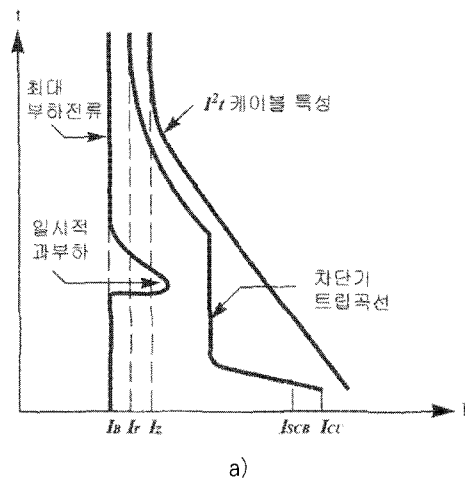
그림 1 차단기의 정격을 결정하는 전류레벨

2.4 차단전류의 설정

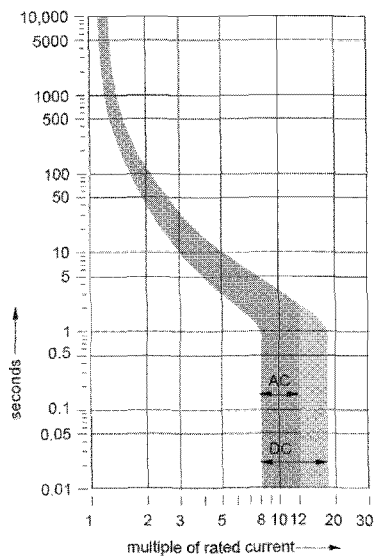
차단기는 다음의 조건이면 정확한 역할을 한다.

- ① 차단기의 공칭전류 혹은 설정전류 I_n 은 최대부하전류 I_B 보다 크지만 회로의 최대허용전류 I_s 보다 작다. 즉, 그림 1의 구역 "a"에 해당하는 $I_B \leq I_n \leq I_s$ 이다.
- ② 차단기의 트립전류 I_2 의 "통상적인"설정은 그림 1의 "b"구역에 해당하는 $1.45I_z$ 보다 작아야 한다.
- ③ 차단기의 정격 3상 단락전류용량은 차단기의 설치지에서 발생하는 3상 단락전류보다 커야 하며, 이것은 그림 1의 구역 "c"에 해당한다.

그림 2b에서 장한시(Long-time delay)영역에서 차단시간은 열동식 계전기에 의해 실효치전류로 작동되기 때문에 직



a)



b)

그림 2 보호용 차단기의 예; a) 전류레벨 설정 개념 b) TCC

류나 교류에서 동일하다. 그러나 순시(단락)영역에서는 차단 시간이 순시치의 제곱에 비례하는 전자식 계전기로 구동되어 차단되므로 직류와 교류간에 차이가 있다. 교류용 TCC (time-current curve)를 직류에 적용하려면 사용자는 1.1 내지 1.4 정도의 교정계수를 적용하여 트립곡선을 시간-전류평면에서 우측으로 이전시켜야 한다. 이 계수의 값은 제품 및 회로결선에 따라 다르므로 제조사의 권고에 따르는 것이 좋다.

Connection modality	Circuit-breaker					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1
	1	1.15	1.15	1.15	1	1
	1	1.15	1.15	1.15	1	1
	-	-	-	1	0.9	0.9
	-	-	-	1	0.9	0.9
	-	-	-	1	0.9	0.9
	-	-	-	-	-	1
	-	-	-	-	-	0.9

그림 3 순시차단 계전기의 TCC 교정계수 예

그림 3에 magnetic relay에 의한 순시차단 계전기의 교정계수예를 보인다.

3. 아크소호 원리

아크란 두 접점의 갭사이를 통과하는 전류 에너지의 방출이다. 아크는 부하전류가 흐르는 상황에서 회로차단기가 동작하여 접점이 개방될 때 발생한다. 아크의 크기는 접점이 개방되기 직전에 흐르던 전류의 크기에 비례한다. 따라서 단락전류의 차단시 발생하는 아크는 과부하전류의 차단시 발생하는 아크에 비하여 매우 크다. 아크의 발생은 회피할 수 없는 것이므로 차단기를 설계할 때는 예상되는 아크를 충분히 견딜 수 있도록 하여야 한다.

아크는 열발생을 수반하며 이로 인하여 이온가스가 발생하는 환경이 조성된다. 아크가 증가하면 열발생이 증가하며 이는 이온의 증가를 초래한다. 이온의 증가는 아크의 유지를 지속하게하며 아크는 더욱 커진다. 따라서 차단기는 빠르고 효과적으로 아크의 발생에 대처하여야만 한다. 단락전류가 가장 큰 고장전류이므로 회로차단기는 단락전류를 차단할 능력이 확보되어야 한다.

3.1 부하전류와 아크의 소호

교류전류에서는 매 반사이클 마다 부하전류의 크기가 제로가 된다. 이는 아크의 소호에 매우 중요한 조건이다. 왜냐하면 회로차단기가 동작하여 접점이 개방되기 시작한 후 적어도 반사이클의 시간이 지나면 부하전류가 스스로 제로가 되어 아크가 소호되기 때문이다.

그러나 직류전류에서는 회로차단기가 동작한 후에도 부하전류는 스스로 제로가 되지 않고 일정값을 유지하려고 한다. 따라서 적절한 대책을 강구하지 않으면 아크도 소호되지 않고 지속적으로 증가하여 차단실패를 가져올 수 있다.

3.2 전압과 아크의 소호

전압은 항상 전류를 흐르게 하려고 한다. 부하전류가 제로가 된 후에도 인가전압이 존재하면 부하전류는 다시 증가하려고 한다. 부하의 역율이 1인 교류의 저항성부하에서 부하전류와 인가전압은 동상이 되므로 이러한 문제는 발생하지 않는다. 그러나 유도성 부하나 용량성 부하의 경우는 교류부하전류가 제로가 되었을 때 인가전압은 제로가 아니다. 이 상황에서 접점의 절연내력이 인가전압보다 높지 않으면 부하전류가 증가하여 차단실패가 일어난다.

직류의 경우는 항상 인가전압이 존재하므로 접점의 절연내력은 충분히 확보되어야 한다.

3.3 아크의 소호방법

일반적으로 저압용 교류 차단기에서 사용하는 아크소호 방법은 다음의 방법을 사용한다.

- 1) Arc extinguisher(chute)
- 2) Break arc into smaller pieces
- 3) Blow arc out with high-pressure gases
- 4) Elclose contacts in non-conductive environment

위의 방법 중에서 arc extinguisher chute (소호실) 방법이 가장 효과적으로 사용되는 방법이다. 그림 4에 차단기에서 소호실의 개념구조를 보인다.

3.4 아크소호의 모델

그림 5에 단락사고 발생시 DC차단기에 가해지는 전압 및 전류파형을 보인다. 그림에서 사용한 기호의 의미는 다음과 같다:

- I_p : 단락회로 발생전류
- I_{cn} : 예상단락전류
- V_a : 최대 아크전압
- V_n : 계통전압
- T : 시정수=L/R
- t_o : 단락시작
- t_s : 차단점접의 개방시작
- t_a : 사고전류의 제거

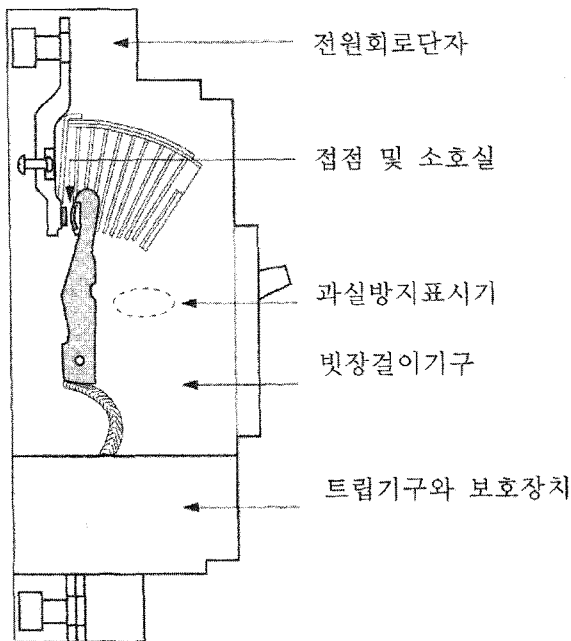


그림 4 차단기의 기본구조

t_o 의 시점에서 단락사고가 발생하면 사고전류는 초기에 $di/dt=V/L$ 의 기울기로 증가한다. 사고전류를 차단하지 않는 경우 사고전류는 $I_{cn}=V/R$ 의 값으로 수렴할 것이다. 그러나, t_s 의 시점에서부터 차단기가 동작하여 접점에서 발생하는 아크전압(V_a)이 일정 값 이상으로 증가하면 사고전류는 감소하기 시작한다.

그림 6은 단락사고 발생시 DC차단기의 아크소호모델을 보인다. 단락사고 발생시 계통의 총인덕턴스를 L, 총저항값을 R이라고 가정한다. 차단기가 동작하면 차단기의 접점에는 아크가 형성되며 아크양단의 전압은 전원전압과는 역방향으로 형성되고 그 크기는 접점간의 거리와 관계된다.

그림 6의 아크소호모델에 키르히호프의 전압법칙을 적용하면 식 (1)을 수립할 수 있다.

$$V = L \frac{di}{dt} + R \times i + V_a \tag{1}$$

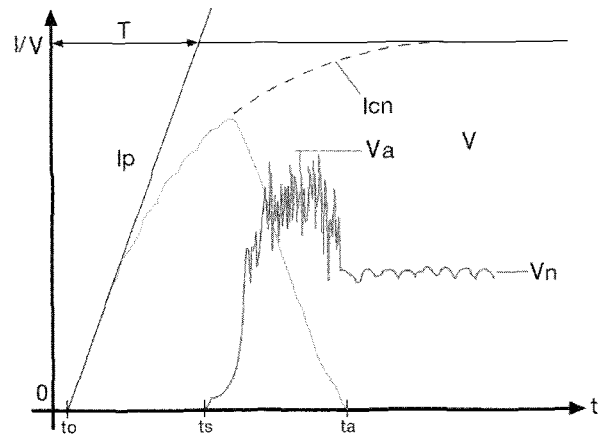


그림 5 DC 차단기의 동작시 전류 및 전압 파형

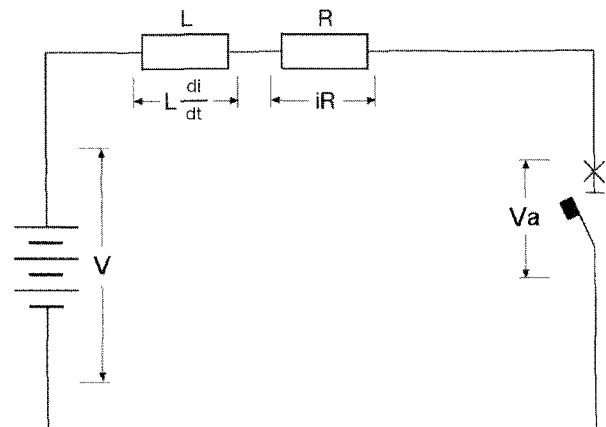


그림 6 DC 차단기의 아크소호모델

- 단, V : 정격전원전압
- L : 회로의 등가인덕턴스
- R : 회로의 등가저항
- V_a : 아크전압

식 (1)을 전류에 대하여 정리하면 식 (3)과 같이 된다. 따라서 사고전류가 감소하기 위하여는 식 (2)의 우변항의 값이 마이너스가 되어야 한다. 즉 차단기의 접점에서 발생하는 아크전압의 크기가 전원전압에서 저항의 전압강하를 뺀 값보다 커야만 한다.

$$L \frac{di}{dt} = V - R \times i - V_a \tag{2}$$

$$\frac{di}{dt} < 0 \tag{3}$$

4. 저압직류 회로차단기의 종류

IEEE Std C37.14(R2008)에서는 저압직류차단기의 전압레벨을 표 1과 같이 정의하고 있다.

다음은 IEEE Std C37.14(R2008)에서 정의하는 저압직류차단기의 종류이다.

4.1 General-purpose low-voltage dc power용 circuit breaker

차단동작 중에 예상사고전류의 최대값을 제한시키는 기능을 갖고 있지 않거나, 사고전류가 지속되는 것을 막는 기능이 없는 차단기.

4.2 High-speed low-voltage dc power용 circuit breaker

차단동작 중에 예상사고전류의 최대값을 제한시키는 기능을 갖고 있는 차단기. 이러한 차단기는 정격 단락전류 값을 갖거나 짧은 시간 전류정격을 갖는다.

표 1 저압직류차단기의 전압레벨(IEEE Std C37.14)

항목	전압레벨(V)						
	250	275	750	850	1000	1500	3000
공칭	250	275	750	850	1000	1500	3000
최대	300	325	800	1000	1200	1600	3200

4.3 Rectifier low-voltage dc power용 circuit breaker

정상동작조건에서는 한 대의 정류기를 운전할 수 있는 전류공급능력을 확보하고, 비정상적인 사고전류 조건에서는 요구조건에 따라 견디거나 차단능력이 있어야 한다. 이러한 차단기는 n-1정류기에 대한 정격 단락전류 값을 갖거나 해당 정류기에 대한 짧은-시간 전류정격을 갖아야 한다.

4.4 Semi-high-speed low-voltage dc power용 circuit breaker

인덕턴스가 최소인 회로조건에서는 사고시 예상사고전류의 최대값을 제한시키지 않으나, 높은 인덕턴스를 갖는 회로조건에서는 사고전류를 사고지속전류보다 낮추도록 제한시키는 기능을 갖는다. 이러한 차단기는 정격최대전류 및 정격단락전류값을 갖으며, 짧은-시간 전류정격이 주어진다.

5. 저압직류 회로차단기의 시험조건

앞에서 정의한 저압직류 회로차단기를 설계 및 제작하는 경우, IEEE Std C37.14(R2008)에서는 저압직류차단기의 성능을 시험하기 위한 조건이 제시되어 있다.

5.1 설계시험

회로차단기를 설계하는 경우 해당 모델의 성능을 표 2 및 표 3에 제시되어 있는 순서에 따라 테스트 한다. 설계시험은 같은 정격의 제품을 대표하여 한 대의 제품에 대하여만 실시

표 2 설계 테스트 1

Test	Design test	Breaker type			
		General purpose	High-speed	Semi-high-speed	Rectifier
a)	AC dielectric withstand test—values given in 8.1 (9.2.1.2)	X	X	X	X
b)	Short-time current test (9.2.1.3)	X	—	X	X
c)	Continuous current test (9.2.1.4)	X	X	X	X
d)	Load (low) current switching tests (9.2.1.8)	X	X	X	X ^a
e)	Endurance test (9.2.1.5)	X	X	X	X
f)	AC dielectric withstand test at 60% as given in item f) of 8.1.	X	X	X	X

^aIf the rectifier breaker is polarity sensitive, the load (low) current switching test must be done in both directions.

표 3 설계 테스트 2

Test	Design test	Breaker type			
		General purpose	High-speed	Semi-high-speed	Rectifier
a)	Trip device calibration check test (9.2.1.1)	X	X	X	X
b)	AC dielectric withstand test—values given in 8.1 (9.2.1.2)	X	X	X	X
c)	Peak current test (9.2.1.6)	X	—	X	X
d)	Short-circuit current test (9.2.1.7)	X	X	X	X
e)	Trip device calibration check test (9.2.1.1)	X	X	X	X
f)	AC dielectric withstand test at 60% as given in item f) of 8.1.	X	X	X	X

한다.

5.1.1 내전압 테스트

회로차단기는 다음 표 4에 제시되어 있는 내전압 조건에서 60초동안 플래시오버 현상없이 견디어야 한다. 차단기는 완전히 조립된상태에서 내전압시험을 하여야 하며, 모든 전압은 IEEE Std 4-1995 및 수정안 Std 4a-2001의 규정에 따라야 한다. 전압은 제로에서부터 표 4에 규정된 설정된 값까지 5-10(초) 기간동안 서서히 상승시키며, 최종 값에서 1분을 유지하여야 한다. 시험전압은 필수적으로 정현파여야 하며, 그 최대값이 규정값의 1.414배보다 낮아서는 않된다. 시험용 변압기의 용량이 500[VA] 보다 낮은 경우는 인가전압을 직접 측정하여야 한다.

5.1.2 연속 전류 시험

연속 전류시험은 다음의 조건에서 차단기가 100%부하전류를 흘릴 수 있는지 검증하는 것이다:

- 최소의 시험용 합 내에서의 조건
- 요구 통풍조건
- 온도상한을 넘지 않는 조건

5.1.3 내구성 시험

이 시험은 차단기의 전기적·기계적 요구조건을 시험하는 것으로, 정격부하조건에서 차단기의 Close-open (CO) 조작을 매 2(min)마다 반복시킨다. 제조사에 따라서 반복 주기를 짧게 하여도 좋으나 Close 시간은 적어도 300(ms) 이상 유지하여야 한다. 또한 반복회수는 연속하여 120번을 넘지 않도록 한다.

시험용 부하회로는 연속 정격전류 이상의 조건에서 시정수(L/R)가 0.02-0.06[s]에 있어야 하며 역기전력은 무시할 수 있을 만큼 작아야 한다.

5.1.4 최대전류 시험

최대전류시험은 차단기가 close동작시 설정된 최대 전류를 흘릴 수 있는지를 보는 것이다. 최대전류 시험을 하기 위하여

표 4 정격최대전압에 따른 절연 레벨

Rated maximum dc voltage (V)	RMS test voltage (V)	Reference dc withstand test voltage (kV) ^a
300	2200	3.1
325	2200	3.1
800	3700	5.2
1000	4600	6.5
1200	4800	6.8
1600	5400	7.6
3200	8800	12.4

NOTE—Test voltages provide for dielectric margin for open circuit or regenerative overvoltages.

^aTests may be conducted with dc voltage provided that the dc voltage is no less than 1.414 times the ac rms listed voltage.

는 단락시험을 하는 조건과 마찬가지로 과도적인 피크전류를 생성하여야 하며, 새로 조립한 차단기를 대상으로 실시한다. 이때 최대전류는 적어도 8(ms)이상은 공급하여야 한다.

5.1.5 단락전류 시험

단락전류 시험은 규정된 단락전류 조건에서 차단기가 close, carry, 및 interrupt의 기능을 성공적으로 수행할 수 있는지 보는 것이다. ANSI C37.16-2000에는 다음의 차단기에 대하여 단락전류 시험회로가 기술되어있다.

- General-purpose dc circuit breakers
- General-purpose dc circuit breakers for mining application
- Semi-high-speed dc circuit breakers
- High-speed dc circuit breakers
- Rectifier dc circuit breakers

단락전류 시험에서 트립전류 레벨은 다음과 같이 설정한다.

- General-purpose circuit breakers
 - 연속전류 2000A이하의 정격을 갖는 차단기의 경우 차단기 정격전류의 15배의 전류에서 트립될 것.
 - 연속전류 2000A이상의 정격을 갖는 차단기의 경우 차단기 정격전류의 12배의 전류에서 트립될 것.
- Semi-high-speed and high-speed circuit breakers
차단기는 연속정격전류의 4배 이내에서 차단되는 direct-acting 순시트립요소를 갖고 있어야 한다.
- Rectifier circuit breakers
차단기는 연속정격전류의 50%를 넘지않는 역전류에 대하여 트립되어야 한다.

5.2 제품시험

회로차단기를 제조하는 경우, 제조자는 해당 제품이 설계에 따른 성능을 확보하고 있는지, 다음과 같이 품질을 검증하여야 한다.

5.2.1 Calibration

Directing-acting 트립장치의 long-time-delay element pickup, short-time-delay element pickup, instantaneous element pickup 등에 대하여 Calibration을 수행하며, undervoltage trip 장치와 reverse-current trip 장치도 캘리브레이션의 대상이다.

5.2.2 Control, secondary wiring, device check test

Control, secondary wiring 및 장치들은 올바르게 접속되어 있는지 확인하여야 한다. 장치와 계전기들은 실제로 잘 작동되는지 확인하여야 한다.

5.2.3 내전압시험

제품의 내전압시험은 설계의 내전압시험과 같이 수행한다.

6. 맺음말

직류배전 계통은 급증하는 디지털부하와 신재생에너지의 보급에 따라 관심이 증대되고 있다. 국내외에서 직류배전계통은 IDC(Internet Data Center)의 고효율화와 고신뢰성, 및 작은 공간요건 요구에 따라 산업현장에서 실제적으로 보급이 확산되고 있다. 직류배전이 폭넓게 보급되기 위하여는 공칭전압의 국제표준화, 인체 및 설비에 대한 보호기술 수립, 전압변동을 고려한 배터리의 개발, 고효율 강인한 정류기의 개발, 전원품질 보상기술 등의 과제가 놓여있다.

직류배전에 관한 연구는 전세계적으로 태동기에 있다고 볼 수 있다. 따라서, 우리나라도 세계의 경쟁국들과 대등한 출발선 상에 있으므로 상기의 과제들에 대하여 연구력을 집중한다면 국제적으로 관련 분야의 기술을 선도할 수도 있을 것으로 본다. 국내의 전력전자 기술은 세계적인 수준으로 발전하였기 때문에 전력변환장치분야는 국제적으로 선도기술이 될 수 있을 것이다. 그러나 직류배전계통을 완성하기 위하여는 인체 및 설비에 대한 보호기술이 반드시 수반되어야 하며, 이러한 직류배전의 보호기술은 전력전자기술이 융합적으로 넓혀 나가야 할 기술 분야 중의 하나이다. 따라서, 인체 보호를 위한 누전차단기 및 환선절연저항 모니터링의 개발, 적절한 접지방식의 확립과 함께 설비보호를 위한 직류전용 차단기 등에 대한 본격적인 연구가 필요하다. ■

참고 문헌

- [1] ABB Technical catalogue: Low voltage air circuit-breakers.
- [2] 2009 IEC 규격에 의한 전기설비 설계 가이드, 대한전기협회

- [3] C37.14-IEEE Standard for Low-Voltage DC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.
- [4] Std 1458-IEEE Recommended Practice for the Selection, Field Testing, and Life Expectancy of Molded Case Circuit Breakers for Industrial Applications.
- [5] Std 4-1995 IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing.
- [6] Std 4a-2001 Amendment to IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing.
- [7] C37.16-2000-IEEE standard for preferred ratings, related requirements, and application recommendations for low-voltage AC (635 V and below) and DC (3200 V and below) power circuit breakers.
- [8] Std 1-2000 IEEE Recommended Practice-General Principles for Temperature Limits in the Rating of Electrical Equipment and for the Evaluation of Electrical Insulation.

〈 필 자 소 개 〉



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오카야마대학 방문교수. 2000년~2001년 덴마크 Aalborg대학 방문교수. 2003년 12월~2004년 3월 독일 아헨대학 방문교수, 1987년~2010년 현재 공주대 전기전자제어공학부 교수, 당 학회 충청지부장.