

Power Circuit 를 차단하는 여러가지 테크닉

具 滋 允
(韓國科學技術院 先任研究員)

■ 차 례 ■

- 1. 서 론
- 2. Electrical Current Interruption 을 지배하는 기본적인 원칙
- 3. Arc 소멸을 위한 여러가지 테크닉
- 4. 결 론

1 서 론

전기가 널리 가정에 보급되어 사용되기 시작한지 약 100여년이 지나서야 power circuit를 making 하거나 breaking 하는 문제에 부딪치게 되어 여러가지 팔목할 만한 방법이 계속 발전해 나아갔다.

특히 breaking 할때에 발생하는 arc를 어떻게 처리하느냐에 따라 테크닉이 달라지고 문제의 해결점이 되는 것이다.

왜냐하면 이러한 물리적인 현상은 아주 높은 온도의 특수한 상황에서 발생하기 때문에, 그의 성격을 정확하게 규명하기에는 어려운 형편에 있어서, 수학적으로 충분히 알맞은 모델링을 한다는 것은 그리 쉬운 일이 아니다. 따라서 이러한 어려움을 다루는 것은 학구적인 연구를 하는 이들에게는 좋은 연구과제가 되고 있으나, switching apparatus를 사용하는 현장엔지니어들은 수학적인 모델이나 물리적인 문제점 보다도 실질적인 경험에 의하여 know-how를 터득하여 나가야 한다.

이기술보고에서는 단지 매우 기본적이고 다양한 기술적인 양상과, 현재 발전되어가는 테크닉과 장래에 예상되는 기술에 대하여 간단하게 정리해 볼 목적으로 여러가지 테크닉을 설명하고자 하며 이들 사이의 몇가지 차이점에 대한 것들을 여러 자료들을 모아 간추려 정리하여 보았다.

여러가지 테크닉을 소개하기 이전에 current interruption 을 지배하는 기본적인 원칙에 대하여 간

단히 살펴보고, 차단기에 쓰이는 여러 arc extinction 재료들을 소개하고자 하기 때문에, 각각에 해당되는 자세하고 세밀한 이론적인 사항들을 생략하고 있음을 밝혀둔다.

2 Electrical Current Interruption 을 지배하는 기본적인 원칙

현재 사용되고 있는 여러가지의 breaking technique에 대하여 언급하기 이전에, 아울러 앞으로 언급할 여러 테크닉의 고유특성을 이해하기 위하여 몇가지 기본적인 원칙에 대해 간단히 상기해볼 필요가 있다.

왜냐하면 interrupter가 circuit를 close 하고 있을때는 breaking unit의 resistance가 거의 zero에 있다가, 순간적으로 infinity에 가까울 정도로 크게 변화해야 이상적이기 때문에, 즉 breaking unit의 electrical behaviour가 conductor에서 insulator로 변화하여야 하기 때문에, 그에 따른 interrupter가 흡수하여야 하는 breaking energy의 처리방법이 매우 중요한 factor가 되고 있다. (그림 1)

Interrupter 내의 extinction material의 conductance의 변화는 breaking 과정에서 일어나는 interrupter 내부에서 소비되는 에너지와 다음과 같은 관련이 있다:

interrupter의 electrical behaviour가 conductor에서 insulator로 변하는 transition time이 빠르면 빠를 수록 interrupter 내부에서 소모되는

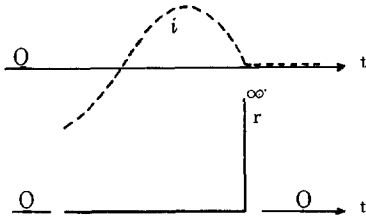
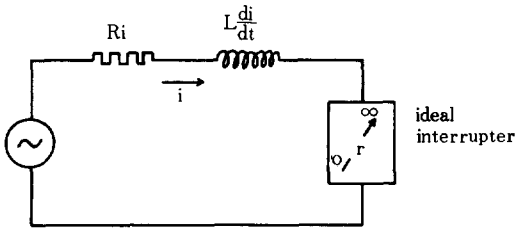


그림 1. 이상적인 교류전류의 차단(breaking energy는 zero이다)

에너지는 적어진다.

Interrupter는 direct voltage source를 차단할 경우도 있는데, 아무리 transition time이 infinite하게 빠르다 하더라도, interrupter 내부에서 요구되는 에너지는 적어도 power circuit에 내포되어 있는 electromagnetic 에너지와 같거나 비슷하다. 따라서 direct current인 경우에는 커다란 문제가 남아 있어 연구가 많이 진행중이다.

우리의 관심사는 direct current인 경우가 아니고 alternating current인 경우이다. 이 경우는 interruption moment를 인위적으로 조절하여 breaking시에 요구되는 energy를 비교적 적게할 수 있으며, 이러한 방법으로 interrupter의 conductor 상태에서 insulator 상태로 변하는 시간을 빠르게 할 수도 있다.

이렇게 이론적으로 생각해보면 간단한 문제를 다시 자세히 고려해 보고자 하는 것이 아니고 실질적으로 current를 interruption 할 수 있도록, 어떻게 realize 하여야 하는 어려움 때문에, current interruption을 지배하는 몇가지 현상에 대해 기본적으로 간단히 생각해 보아야 할 것들에 대해 살펴보고자 한다. 이렇게 고찰을 해보아야 할 사항을 몇개 열거해보면 다음과 같은데 이에 관련된 이론적인 자세한 것들은 다음기회에 미루기로 한다:

- (a) inevitable electrical arc
- (b) ionization

- (c) deionization
- (d) restriking voltage
- (e) arc deionization time constant
- (f) failure on breaking
- (g) post-arc phenomenon

2 · 1 Inevitable electrical arc

모든 apparatus의 breaking operation이 기계적으로 작동이 되므로 모든 관련된 부분들이 이상적으로 synchronize 되어 작동하거나, 또한 arc가 발생하지 않을 정도로 충분히 빠르게 작동할 수는 없다. 따라서 아무리 정교하고 perfect한 command system을 갖추고, breaking power가 큰 apparatus가 상당히 작은 current를 breaking할 경우 일지라도, 늘 필연적으로 발생하는 electrical arc 문제에 직면하게 된다.

Arc에 의한 에너지는 매우 크기 때문에 arc가 interrupter내의 breaking unit 내부에 체류하는 시간은 가능한한 짧을수록 좋은데, 이 짧은순간을 전후로 하여 interrupter의 electrical behaviour가 conductor에서 insulator로 바뀌어야 한다.

2 · 2 Ionization

Arc가 conductor 상태가 되는 것은 차단기(circuit breaker)의 breaking unit안에서 ionization이 일어나기 때문이다. 그런데 이 ionization은 chamber안에 존재하는 gas에서 높은 온도로 인하여 전자들이 떨어져나와 자유롭게 되어 arc내에 current를 carry하면서 ionization mechanism을 유지하도록 한다. 이렇게 이온화된 atom에 의하여 형성된 positive 이온들은 순수한 election에 의한 것보다는 낮은 속도로 current transport에 기여하는데 그 이유는 mass가 매우 커서 mobility가 작기 때문이다.

Arc 발생에 의한 전압강하는 chamber내에서 ionization이 진행되는데 요구되는 high temperature를 유지하는데 필요한 에너지를 Joule effect 형태로 공급을 하는데, 이러한 에너지는 radiation, convection, conduction등 여러 형태로 가능한한 짧은 시간내에 분산이 된다.

2 · 3 Deionization

Main current가 zero에 가까워지면, Joule effect에 의한 에너지는 chamber속에 형성되었던 arc의 세력에 비하여 미소하였던 thermal energy보다 작아지고 또 arc도 점차 식어져간다. 이러한 현상은 이온과 전자들이 재결합을 할 수 있도록 하여 전기

적으로 중성인 particle 등을 형성하게 되어서 상대적으로 ionization 이 감소할뿐만 아니라 conductance 도 작아진다.

그런데 이렇게 conductance 가 감소하는 정도는 main current 가 감소하는 정도와 자동적으로 오늘날 쓰이는 차단기는 synchronized 되어 있다.

Main current 가 zero 에 다다른 동안에 arc 에 의한 voltage chute 에 의하여 발생한 에너지가 다 소모되지 않으면, (즉 arc 속에서 소모된 에너지가 zero 가 되지 않으면) 이 잉여에너지는 arc 의 voltage 가 작으면 작을 수록 제한을 받게 됩니다.

차단기가 정상적으로 작동을 하기 위해서는 이러한 잉여에너지를 아무런 손상을 받지 않고, 본래의 자기의 기능을 유지하면서 흡수할 수 있어야 한다. 이것이 차단기가 지켜야 하는 첫번째 criterion 이다. 이러한 criterion 이 만족될 수 있다는 조건하에서 교류전류를 interruption 하는 문제는 단지 arc 를 얼마나 빠른 속도로 식혀서 main current 가 zero 가 될때 chamber 내의 material 의 conductance 가 zero 가 되느냐 하는 문제에 귀착이 된다. 쉽게 말해서 arc 가 차지하고 있던 공간이 얼마나 빠르게 insulator 가 되느냐 하는 것이다.

2.4 Restriking voltage

Breaking operation process 가 끝나게 되는 때부터, 즉 interrupter 가 conductor state 에서 insulator state 로 변하게 되면, interrupter 양단간에 나타나는 전압이 power network 에 있는 generator 의 electromotive force 와 같아지게 되는데, network 의 characteristic 에 많이 좌우되며 transient state

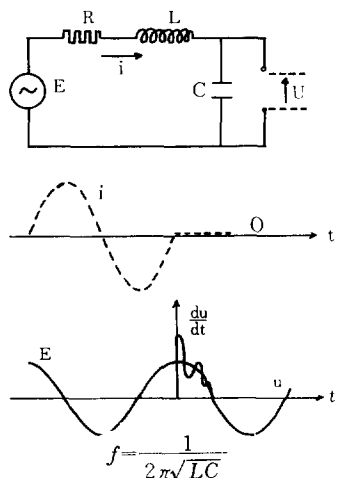


그림 2. Transient restriking voltage

를 거쳐서 갈아진다(그림 2). 특히 high voltage 에서는 TRV(transient restriking voltage)의 증가속도가 매우 중요한 데 initial part에서의 rising rate 가 매우 중요하며 대개 수 KV/ μ second 에 이르고 있다.

2.5 Arc deionization time constant

Main current 가 zero 가 될때 chamber 안의 extinction material 의 conductance 가 변하는 속도는 apparatus 의 기능에 매우 중요한 parameter 가 되고 있다. 이 속도는 thermal-electrical inertia 를 characterize 하는데 전문가들은 이것을 arc deionization time constant 라고 부른다. (그림 3).

Arc deionization 이 채 끝나기도전에 restriking voltage 가 차단기의 양단간에 나타나면 arc 의 conductance 가 여전히 zero 가 되지 않은 상태이므로 current 가 흐르게 되는데 이 current 는 Joule dissipation 을 초래한다.

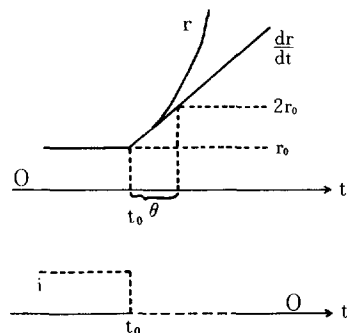


그림 3. r : resistance
i : current
 θ : arc deionization time constant

2.6 Failure on breaking process

Breaking operation 을 어느 순간에 하던지 간에 만약에 main current 가 상당히 클때 breaking 을 하게 되면 Joule effect 에 의한 energy 가 매우 커서 extinction material 의 deionization 이 미처 이루어 지지 않아서 arc 는 식어지지 않고, conductance 는 줄어들지 않게 되고 또한 restriking voltage 가 계속 증가하기 때문에 chamber 안이 급격히 가열되어 current interruption 을 실패할 수가 있다. (그림 4)

2.7 Post-arc phenomenon

차단기의 breaking unit 내부에서 항상 thermal energy 와 electrical energy 와의 상관관계가 post-

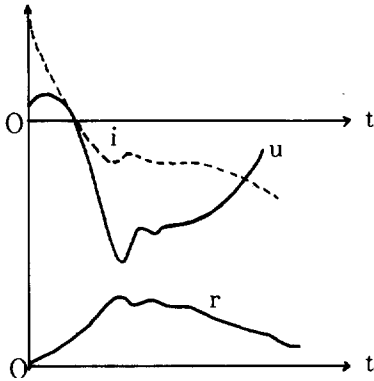


그림 4. failure on breaking

i : current
u : 차단기 양단전압
r : chamber 내의 resistance

arc phenomenon을 결정지우는데, 대개 post-arc 는 main current가 zero가 된이후 일반적으로 수 μ s이상을 초과하고 있지 않은데 이것이 길어지면 breaking은 실패하게 된다.

3 Arc 소멸을 위한 여러가지 테크닉

3-1 Air (대기압하에서)

Air를 이용하여 breaking을 할때에는 apparatus에서 소비되는 에너지는 power circuit의 electromagnetic effective energy의 약 절반에 이르고있다. (그림 8 참조). 이러한 apparatus는 매우 간단하고 제일 먼저 개발된 breaking system이다.

공기는 대기압하에서 어느 정도의 dielectric rigidity를 갖는데, 어떤 특별한 physical process도 ion과 election들의 재결합을 가속시키지 않기 때문에 deionization time constant가 매우 크다.

일반적으로 high voltage에서는 apparatus의 이 time constant가 매우 적어야 하는 반면에, low 혹은 medium voltage에서는 time constant가 큰 apparatus라 하더라도 breaking operation을 성공리에 끝낼 수 있다. (그림 5)

이렇게 공기를 extinction material로 쓰는 방법은 low voltage나 medium voltage에서 많이 쓰인다. 이러한 type의 apperatus는 간단하고 내구성이 있고 유지 관리하기에 쉬운 장점을 갖고 있으며, 또한 breaking할때 apparatus에 over voltage가 크게 걸리지 않기 때문에 안전도가 큰 것이 특징이다. 이러한 안정성 때문에 미국에서는 medium voltage

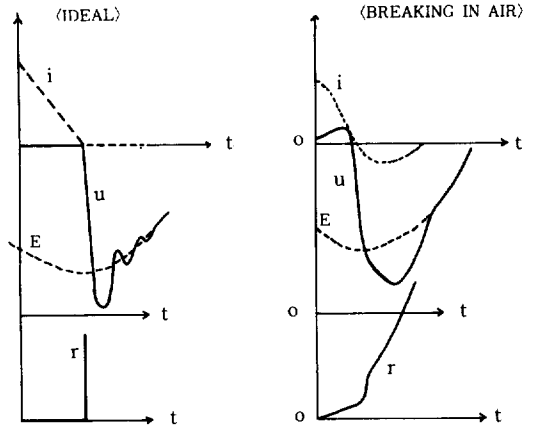


그림 5. 이상적인 경우와 공기중에서의 비교

u : 차단기 양단간의 전압
i : 전류
E : electromotrice
r : resistance

station에서 많이 사용되고 있다. low voltage에서는 거의 모든 range에 걸쳐 이 방법을 채택하고 있으며 medium voltage (10kV~15kV)에서도 전반적으로 많이 쓰이고 있다.

3-2 Oil

Transformer에 사용하는 mineral oil을 extinction material로 사용하는 테크닉은 공기를 사용하는 기기보다 높은 voltage에서도 breaking이 가능하게 되어 송전전압을 올리는데 커다란 기여를 했다. (그림 6)

Field experience result에 의하면 oil이 내부에 발생하는 arc에 의해 분해되어 여러종류의 gas가

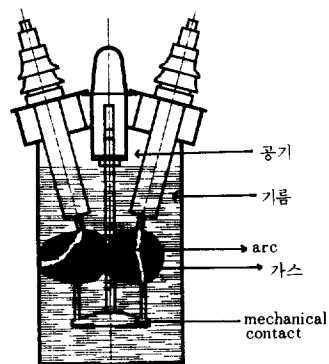


그림 6. 기름을 사용하는 classical 차단기의 schematic representation

발생한다; H_2 : 70%, C_2H_4 : 20%, CH_4 : 10%). 이러한 gas들은 차단기의 breaking ability에 중요한 영향을 끼친다. 그러나 hydrogen gas는 thermal property가 좋은 덕분에 deionization time constant가 상당히 적어 arc extinction agent로 좋은 결과를 갖고 있다. 특히 breaking unit의 압력이 높으면 높을 수록 효과적으로 breaking process를 행할 수 있다.

오늘날에 쓰이는 개선된 apparatus는 volume을 줄이기 위해 높은 압력에 견디어 낼 수 있는 chamber를 많이 사용하는데, 사용되는 기름양은 과거의 classical apparatus에 쓰이는 기름의 양보다 비교할 수 없을 정도로 적은양을 쓰고 있다. 그러나 항상 양호한 상태를 유지하기 위하여 주기적으로 분해하여 검사를 하여야 하는데 이 과정이 시간이 걸리고 어려운 작업이다. 차단기의 breaking 횟수가 반복됨에 따라 electrode의 contact이 많이 변하게 되는데 그 이유는 oil의 decomposition에 의하여 hydrogen뿐만 아니라, 여러 다른 gas의 발생에 의한 by-product에 의하여 chamber내의 insulation내력이 점차적으로 나빠지기 때문이다.

Oil을 사용하는 차단기는 구조가 비교적 간단하기 때문에 많이 사용되고 있지만 maintenance 과정이 힘이 드는 일어서 그리 크게 각광을 받고 있지는 않다.

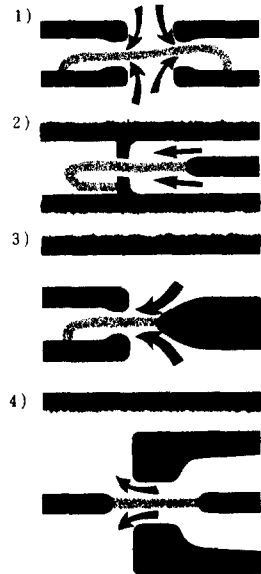
1930년에 최초로 monopole high voltage 차단기가 생산이 되었는데 그 이후에는 높은 전압을 위해서는 성능이 좀더 perfect한 다른 재료를 사용하는 테크닉에 의하여 생산된 차단기로 대체되기 시작했다.

3.3 Compressed Air

압축공기를 high voltage용 차단기의 extinction material로 쓰기 시작한 것은 1930년대인데, 그 이유는 그 당시 널리 쓰였던 mineral oil을 사용한 circuit breaker가 폭발, 화재사고가 발생되었기 때문이다. 그래서 이에 대비하기 위해 새로운 테크닉으로써 compressed air를 이용한 차단기가 나오기 시작하였다.

Chamber의 직경과 compression pressure를 조정하여 breaking voltage level을 조정할 수 있는데, 예를 들면 power test station의 protection으로 사용하는 차단기의 경우 big power용으로써는 80bar 정도되는 압력으로 20kV, 200kA effective까지 break할 수 있다는 결과를 갖고 있다.

Compressed air는 dielectric이기도 하지만 좋은 breaking agent로도 쓰이며 이러한 차단기에서 arc



➔ 는 압축된 공기의 진행방향임
 :::: : 여러형태로 발생하는 arc

그림 7. arc를 분산시키는 여러가지 방법

를 분산시키는 방법은 여러 가지가 있다. (그림 7)

이러한 차단기들은 mineral oil을 이용하는 차단기들 보다 보호유지에 어려움이 많이 줄어들고 있으며, compressed air를 계속적으로 조심스럽게 air내의 humidity를 제거해주면서 공급을 해주면 아무탈 없이 오래 쓸 수가 있다.

오늘날 medium voltage에서 계속 이러한 type를 계속 쓰고 있는데 특히 그 성능이 완전하여 power center의 발전기 보호용이나, extreme high voltage에서도 쓰이는데, 차츰 SF_6 gas를 이용하는 더욱더 perfect한 circuit breaker에 의해 조금씩 대체되어가고 있다.

3.4 SF_6 gas

Dielectric material으로써 또 arc extinction material으로써 두가지 역할을 모두 갖고 있는 재료를 찾도록 하는 노력의 결과로 약 20년전부터 SF_6 gas의 physical property 덕분에 breaking apparatus에 쓰이게 되었는데, 이 gas를 사용하게 된 이유를 간단히 살펴보면 다음과 같다.

- 수 bar의 압력에서 air의 dielectric strength 값의 5배가 되고
- arc period에서 SF_6 gas의 high thermal conductivity는 chamber내의 높은 열도 빠른 속도

로 evacuate시킬 수 있고

- zero current에서 SF₆ 원자에 electron이 매우 강하게 capture되기 때문에 arc를 빠르게 extinction할 수 있다.

이 기술보고에서는 SF₆ gas의 모든 dielectric characteristic 나 thermal conductivity나 physical property에 대해서는 언급하지 않았다.

이러한 차단기의 chamber내의 압력은 3기압정도 되고, Cylinder내에서 이동하는 piston을 장치하여 제작을 하는데 이 작은 압력하에서의 SF₆ 차단기의 breaking성능은, compressed air를 이용한 차단기의 경우에 25기압 정도의 압력에서의 성능보다 우세하다. 이러한 practical한 장점으로 인하여 SF₆ gas가 차단기에 많이 쓰이게 되었다.

이 SF₆ gas가 갖고 있는 놀랄만한 dielectric characteristic 덕분에, breaking 성능을 향상시킬뿐만 아니라 차단기의 working part의 volume을 매우 줄일 수 있어, compact system을 만들 수 있어 1970년대중반 이후에 medium voltage에서도 급격히 그 수요가 증가되고 있는 실정이다. 특히 기계적인 piston system을 이용하지 않고 magnetic field를 이용하여 chamber내의 arc를 회전시켜 cooling을 하도록 한 6kV급 contactor의 개발은 괄목할 만한 발전이다.

3-5 Vacuum

Vacuum을 이용하는 테크닉은 1920년대에 개발되었지만 실제로 상업화되기 시작한 것은 1950년대이며, 1960년대에 이르러서야 미국의 회사들에 의하여 대량 생산되었다. 미국회사들은 이기술을 이용한 차단기가 굉장한 속도로 쓰이고 개발 되리라 예측하였지만 25년이 지난 오늘날 여러국가의 experience result에 의하면 이러한 예측이 그리 맞지 않은 것을 알 수 있다.

Vacuum을 사용하는 테크닉은 다른 여러 재료를 사용하는 기술과 완전히 다른 테크닉인데 모든 부분에 걸쳐 기술적인 어려움이 많은 것으로 알려져 있다. Vacuum의 dielectric rigidity는 collision이 일어나지 않기 때문에 기인하는 것인데, 완전한 진공 상태에서는 impact ionization에 의해서 야기되는 dielectric breakdown을 초래하는 electron의 avalanche가 일어나지 않기 때문이다. 차단기의 experience에 의하면 10⁻³ bar 정도의 vacuum에서 약200 kV까지 견디어 낼 수 있다.

그러나 Vacuum을 사용할때는 Vacuum의 dielectric strength는 insulation의 거리에 비례하여 증가

하는데 breaking의 횟수가 거듭되면 차단이 가능한 전압이 제한을 받는다. 왜냐하면 intense arc에 의하여 electrode의 metal contact부분에서 발생하는 metallic vapour에 의해 vacuum의 dielectric rigidity가 영향을 받기 때문이다. 이 vapour의 양이적으면 적을 수록 vacuum의 dielectric rigidity는 다시 regenerate가 될 수 있다.

결국 향상된 performance를 얻기 위하여 concentrated intense arc가 체류하는 시간을 될 수 있는 대로 짧게 하면서 intense상태에 있는 arc를 diffused된 상태의 arc로 만들어야 한다. 따라서 circuit breaker에 존재하는 metallic vapour는 이러한 transition time에 많은 영향을 끼치는데, 이것은 contact부분의 형태와 재질에 많이 관계되며 여기에 관련된 여러규정이 매우 까다로운 것이 실정이고 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 문제점들 때문에 사실상 medium voltage에서 주로 사용되고 있다.

4 결 론

어떠한 테크닉을 사용하여 차단기를 만드는가를 결정하기 이전에 몇가지 유의하여야 할 사항이 있다:

- Apparatus의 안전도와 사고시에 주위의 시설물과 사람에게 끼치는 영향
- 될 수 있는대로 유지보수에 적은 노력이 들어야 하고
- Over voltage를 처리하는데 본래의 기능을 상실치 않으면서 완전해야 하고
- 개선된 안전기술규정에 잘 부합하여야 하며 부피와 설치면적이 economically optimal해야 한다.

breaking energy	techniques	voltage							
		0	1	3	12	24	36	72	5,245/765kV
0.5	air	[arrow pointing right]							
	oil	[arrow pointing right]							
	compressed air	[arrow pointing right]							
0.1	SF ₆	[arrow pointing right]							
	vacuum	[question mark]							
0.02	semi-conductor	[question mark]							
0	ideal	[arrow pointing right]							

그림 8. 그림에서 나타나는 ⇨는 각 테크닉의 예견되는 앞으로의 경향의 정도를 나타내주고 있다.

이러한 위의 사항을 유념한뒤 3단원에서 이야기 한 여러 테크닉을 정리하여 보면 그림 8 과 같다. 그림 8 은 차단기가 흡수하여야할 에너지가 적어지는 순서로 정리하여 보았는데, 차단기가 고장을 일으키지 않고 견디어내야 하는 전압의 범위도 아울러 나타내어 보았다.

이 그림 8 을 토대로 하여 예측할 수 있는 전망은 다음과 같다 :

- a) Air를 사용하는 테크닉은 모든 range에 걸친 low voltage에 유일하게 적합한 것으로 나타나 있고, medium voltage에서도 사용할 수 있기 위하여 기술적연구가 계속 이루어지고 있다.
- b) High voltage range에서 compressed air나 metallic oil을 사용하던 테크닉은 이제 서서

히 사항길에 들어서 있다.

- c) Vacuum을 사용하는 테크닉은 medium range에서 계속 앞으로 쓰이게 될 것인지 아닌지 확실치 않은 상태이다.
- d) Semiconductor를 사용하는 테크닉은 얼마나 높은 voltage에서도 쓰이게될지 의문이지만 이 분야의 연구가 계속되고 있다.
- e) 괄목할 만한 발전은 역시 SF₆ gas를 사용하는 기술인데 EHV에서도 쓰이고 있으며 주로 air와 SF₆를 사용하는 테크닉이 계속 연구 개발되어, low voltage, medium voltage, high voltage, extreme high voltage의 모든 range를 커버하며 사용될 것으로 나타난 것이 세계적인 추세인 것으로 생각된다.