

친환경 개폐장치 개발 현황

김정배, 진상용, 조정환, 박창우, 이학성 | (주)효성 중공업연구소

1. 서론

현재 초고압 송변전기기에 적용되고 있는 SF₆가스는 절연 및 소호성능이 우수하며 회복특성이 뛰어나기 때문에 초고압 기기의 절연매체로서 일반적으로 사용하고 있다. 일반적인 스위치기어로 많이 사용되고 있는 SF₆ 가스절연개폐장치(SF₆ Gas Insulated Switchgear, GIS)는 전 충전부를 단상분리형 혹은 삼상일체형 금속압력용기에 내장하고 무색, 무취, 무독의 불활성 절연가스인 SF₆ 가스로 주회로를 절연시켜 기존의 공기절연 스위치기어의 문제점을 보완하면서 고신뢰성, 경제성, 안전성을 도모하고 간편한 보수점검과 설치면적의 축소 등의 많은 장점을 가지고 있다.

그렇지만 SF₆ 가스의 온난화 계수는 CO₂의 약 23,900배로 매우 높고, 대기 중으로 방출될 경우에는 온실효과 가스로 문제가 되고 있다. 이러한 지구환경 문제의 관점에서 SF₆ 가스는 금후 총량 제한에 의해, 사용량이 규제 받을 가능성이 높다. 이러한 환경오염을 규제하는 국제적 흐름에 맞춰 신개념의 신절연 개폐장치 개발이 요구되고 있다. 이러한 배경으로 (주)효성에서는 SF₆ 가스의 대기 중으로의 방출을 억제하는 단계별 연구를 진행 중에 있으며, 본 논문에서는 SF₆

가스 손실 최소화, SF₆ 가스 사용량의 감소, 대체가스 적용 등의 기본 전략을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 SF₆ Gasless의 배경

최근 GIS개발에 있어 주된 이슈는 고 신뢰성, 대용량 축소화, IT기술의 접목 등 이라 할 수 있겠다. 이와 더불어 최근 환경에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데, 온실가스에 대한 규제로서 교토의정서가 정식 발효됨에 따라(2005.2) 친 환경이라는 새로운 이슈가 핵심으로 떠오르고 있다. 현재 전력기기에 사용되고 있는 SF₆ 가스는 무해하고 화학적으로 극히 안정적이며, 다른 가스들에 비해 월등한 절연성능을 가지고 있을 뿐만 아니라 전류차단의 아크소호 능력까지 탁월하여 현재 운전되고 있는 대부분의 GIS의 절연/아크소호 매질로 이용되어 왔다. 그러나 SF₆가스의 사용량 증대에 따른 환경문제가 부각됨에 따라 대표적인 온실가스의 하나인 SF₆ 가스에 대한 규제가 오스트레일리아, 캐나다, 일본, 유럽연합(EU) 등 여러 국가에서 시행되

고 있다. 비록 현재 강제이행국은 아니지만 우리나라 또한 이에 자유로울 수는 없을 뿐만 아니라 향후 강제이행국으로 될 것이 확실시 되고 있다. 현재 선진국에서는 SF₆ 가스의 사용량 감소를 위해 다양한 방식의 대체절연 매질을 이용한 전력기기 연구/개발이 활발히 진행되고 있으며, 25.8kV C-GIS에 대해서는 이미 개발 및 상업화가 완료된 상태이다.

본 논문에서는 SF₆ 가스 대체기술에 대해 크게 몇 단계로 분류하여 소극적인 방법으로써 SF₆가스의 사용량을 줄이는 문제에서 보다 적극적인 방법으로 SF₆ 가스를 전혀 쓰지 않는 GIS의 개발 순으로 살펴볼 것이며, 또한 현재 선진업체에서 개발 완료된 제품들에 대해서도 소개하도록 하겠다.

2.2 Kyoto Protocol

2.2.1 교토 의정서의 핵심내용

- ① 38개 선진국은 2008년부터 2012년까지 온실가스 배출을 1990년보다 평균 5.2% 줄일 것
- ② 개도국은 2013년부터 2017년까지 감축(한국은 개도국에 포함됨)
- ③ 온실가스란 이산화탄소(CO₂), 아산화질소(N₂O), 메탄(CH₄), 불화탄소(PFCs), 수소불화탄소

(HFCs), 불화유황(SF₆) 등 6종류

- ④ 온실가스 배출권의 국가간 거래 허용

2.3 SF₆ 가스 대체 GIS

현재 연구되고 있는 많은 GIS의 대체절연물질 중 SF₆가스보다 우수한 절연성능을 가지거나 이에 필적할 만한 물질은 없다는 것에 이의를 제기할 수는 없다. 그만큼 SF₆가스는 그 탁월한 성능으로 인해 GIS 확대에 많은 기여를 해 왔던 것이 사실이다. 비록 향후에 SF₆가스를 전혀 사용하지 않는 GIS의 개발이 최종적인 목적이 되겠으나, 현재까지 운전되고 있는 수많은 GIS와 그 안에 포함되어 있는 SF₆가스의 양, 환경부담을 고려할 때, 현실적으로 현재 방식의 GIS에 대해서 SF₆가스 사용량 및 누설량을 줄이는 방안이 더 효과적일 수 있다. 그래서 본 자료에서는 SF₆의 취급손실을 줄이는 방안 및 사용량을 현재보다 현격하게 줄이는 방안, 대체가스절연의 GIS 적용가능성 등에 대해 논의한다.

2.3.1 SF₆ 가스 취급손실의 최소화

SF₆ 가스를 적용한 종래 GIS의 경우, 기기로부터 가스를 회수하고 재활용하는 것 만으로도 효율적으로

표 1. 온실가스 감축 목표량(1990년 배출량 기준)

국가	EU국가	미국	일본 캐나다 폴란드 헝가리	크로아티아	뉴질랜드 러시아 우크라이나	노르웨이	호주	아이슬란드
국가별 온실가스 감축 목표량	-8%	-7%	-6%	-5%	0%	1%	8%	10%

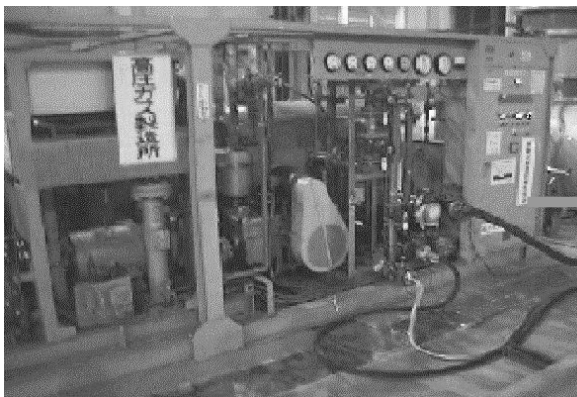
* 미국은 2001년 협약당사국에서 탈퇴선언

가스 방출량을 줄일 수 있다. 일본의 ETRA(Electric Technology Research Association, ETRA)의 연구 결과를 살펴보면(1990~1995) 일본에서 생산된 SF₆ 가스의 양은 연간 약 2,300[Ton]이고, 전력기기 제조자에게 약 1,500[Ton]이 제공되었다. 전력기기 제조자는 전력기기 설치에 550[Ton]을 사용하였으며, 전력회사를 제외한 회사에서 연간 150[Ton]을 사용하고, 300[Ton]이 수출되었다. 이 결과 전력기기 제조자와 전력회사에서의 SF₆ 가스 방출량은 각각 연간 400[Ton]과 50[Ton]으로 추정된다. 이러한 방출량을 억제하는 정책을 펼쳐, 2000년도에는 약 280[Ton], 2005년도에는 약 70[Ton]으로 획기적인 절감을 실현하였다. 전력기기로부터 SF₆ 가스의 누설은 무시할 수 있을 만큼의 낮은 수준이다. 이러한 사실과 관련하여 ETRA의 활동을 살펴보면 현재 우리나라의 SF₆ 가스의 방출 최소화 활동의 훌륭한 벤치마킹 사례가 될 수 있다. ETRA는 SF₆ 가스를 다루는 표준을 제정했는데, 특히 전력기기로부터 SF₆ 가스를 회수하고, 재활용하는 것이다. ETRA는 SF₆ 가스의 방출을 줄이기 위한 자발적인 행동계획을 제안했는데, 보기로 1995년도에는 30%인 SF₆ 가스의 손실율을 2000년에는 약

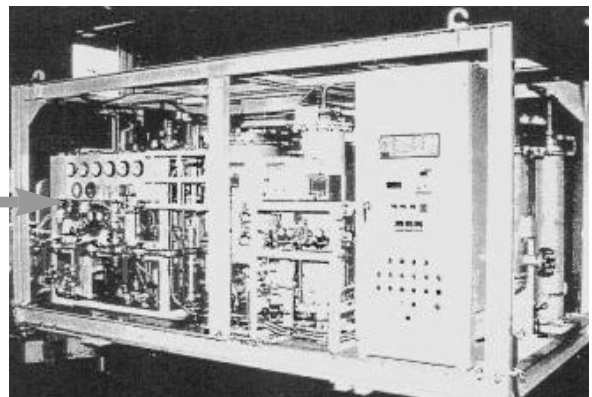
10%, 2005년에는 3%로 축소하였다. SF₆ 가스의 관리 시스템을 강화하기 위해, SF₆ 가스 이력의 Database 형태를 지정하였다. SF₆ 가스의 양은 자발적으로 감시되고, Database에 기록된다. 이것은 가스공급자, 제조자와 사용자 사이에 정보의 교환을 가능하게 하였다. 또한 이러한 활동과 더불어 재활용률이 99%에 이르는 새로운 SF₆ 가스 재활용 기기가 최근 발명되었다는 사실에 주목할 필요가 있다. 종래 구형Type의 재활용 기기가 70~80% 정도의 재생처리효율을 가진다는 것을 감안하면 단순한 산술적인 비교만으로도 20%의 재생처리 효율이 증가한 것을 알 수 있다. 이것을 현재 운전중인 GIS에 모두 적용한다면 얼마나 획기적으로 SF₆ 가스의 배출량이 줄어들 수 있는지 짐작할 수 있다. 이것은 또한 온실가스 규제에 의한 새로운 연구 및 Business 영역을 보여주는 것이라 할 만하다.

2.3.2 전력기기의 소형화를 통한 SF₆ 가스 사용량 감축

앞서 언급한 바와 같이 현재 GIS의 개발 경향 중 하나는 소형화, 집적화이다. 이것은 설치면적의 감소의 경제적인 면에서도 이점이 클 뿐만 아니라, 환경적인



〈구형 가스회수 장치〉



〈신형 가스회수장치〉

그림 1. 고 회수율 가스회수장치

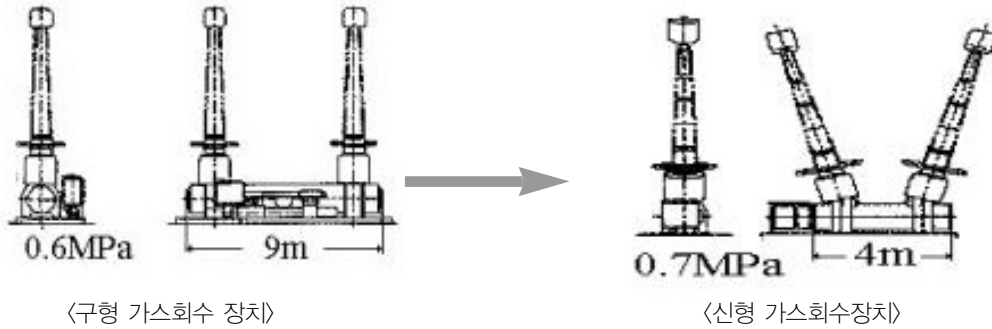


그림 2. 축소형 GCB 개발동향

측면에서도 SF₆ 가스의 사용량을 크게 줄일 수 있다. 일본의 경우 1970년대에 4개의 interrupter로 구성되어 있고, Tank의 길이가 8~9m에 달하던 550kV GCB가 현재는 1점절 550kV GCB가 개발되었고, SF₆ 가스의 체적은 50%이상 감소되었다. 일반적으로 550kV GIS는 2점절 GCB를 사용하지만, 최근 개발된 새로운 1점절 GCB를 사용한 GIS를 적용하여 30%까지 체적을 축소화 할 수 있다. 심지어 이보다 더 compact 한 GIS가 다른 정격전압에서 개발되고 있다.

2.3.3 가스구획 분리를 통한 SF₆ 가스 사용량 감축 구조적 외형 축소를 통한 SF₆ 가스의 사용량 감축은 팔목할만한 수치이다. 그러나 신뢰성이 뛰어난 해석기술 및 설계기술의 발달을 통해 지금까지 계속해서 설계 최적화가 진행되면서 점점 감축할 수 있는 SF₆ 가스의 사용량에는 한계가 있다. 현재까지 알려진 바에 따르면 SF₆ 가스의 아크소호 능력을 대체할 만한 마땅한 대체가스가 없지만, 절연성능에 대해서는 SF₆ 가스와 기타 다른 가스를 혼합한 혼합가스 혹은 대체가스 절연에 대한 연구결과 및 실적이 다수 있다. 초고압 GIS의 경우 GCB 구간에서 SF₆ 가스의 사용을 줄일

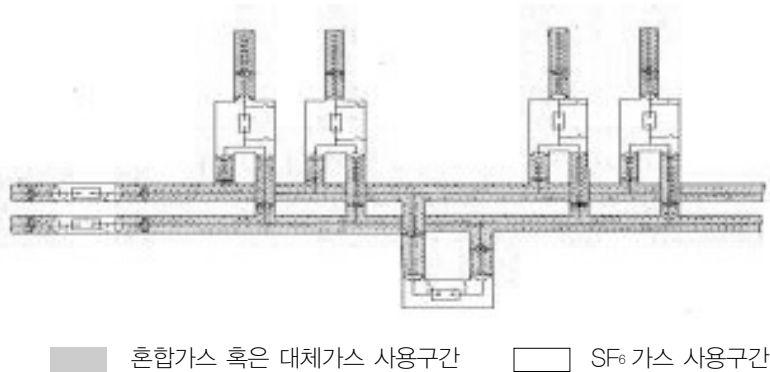


그림 3. 실 GIS의 혼합가스 혹은 대체가스 적용사례

수는 없지만 그 외 차단부와 관계가 없는 가스구획에 대해서는 혼합가스 혹은 대체가스를 사용함으로써 많은 양의 SF6가스를 사용을 줄일 수 있다.

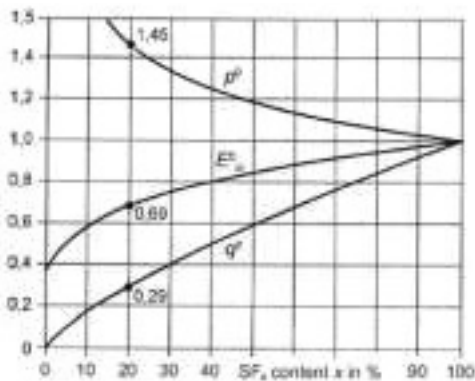
SF6 가스와 같은 매우 음전성인 가스를 포함하는 가스 혼합은 높은 절연과피전압을 유도하므로, 적은 양의 가스가 보통의 가스에 첨가되었을 때 절연성능은 비선형적으로 높다. SF6/N2, SF6/Air, SF6/CF4, c-C4F8, N2/O2 등 다양한 연구가 진행되어오고 있지만, 현재 SF6/N2혼합가스가 가스절연을 위해 SF6 가스의 대체가스로서 가장 유망하게 고려 되어진다. SF6/N2 혼합가스의 기본적인 절연특성은 다른 대체가스에 비해 잘 수립되어 있는 편이긴 하지만, 혼합가스의 상업적 적용을 위해서는 장비의 크기, 가스압력, 가스분리 시스템 등과 같이 해결해야 될 많은 문제가 여전히 남아있다. 아래의 내용은 SF6/N2 혼합가스의 대략적인 절연특성에 대해 요약한 내용이다.

● SF6/N2 혼합가스의 절연특성

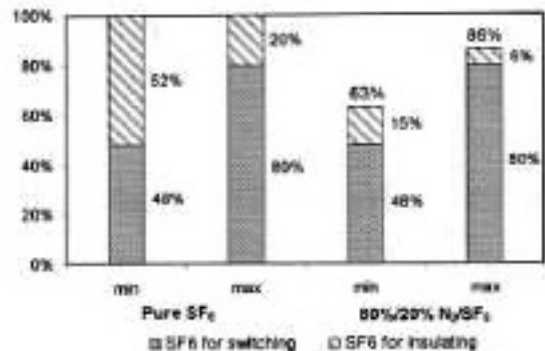
- 그림4(a)는 혼합가스에서 SF6 가스의 포함 비율

에 따른 절연강도, 압력, 사용량 등을 나타내고 있다. 예를 들어, SF6 content × in %(20%)의 혼합가스에서, 혼합가스의 절연강도는 순수 SF6 가스에 비해 69% 정도이다. 또 혼합가스가 순수 SF6 가스와 비교해 동일한 절연강도를 가지기 위해서는 원래 압력보다 45% 압력상승이 필요하며, SF6 가스의 사용량을 고려하면 원래 사용량의 29% 만으로(71% 절감) 절연성능 확보가 가능하다.

- 그림 4(b)는 GIS에서 개폐성능과 절연성능을 고려한 순수 SF6가스와 SF6 20% 혼합가스의 책무 비율을 나타내고 있다. 개폐성능에 있어서 SF6 가스의 양은 변화가 없고, 절연성능을 고려했을 때 혼합가스에서 SF6 가스의 양이 줄어들고 있다. 절연을 위한 SF6 가스의 양은 순수 SF6 가스에서 20~52% 이고, 혼합가스에서 6~15%이며, 만일 20% SF6 혼합가스를 GIS에 적용할 경우, 줄일 수 있는 SF6의 양은 14%~37% 정도임을 보여준다.
- 초고압 GIL에 적용할 경우 상업화가 가능하며,



(a) 혼합가스의 물성특성



(b) SF6 가스/혼합가스의 책무비교

그림 4. SF6가스와 혼합가스의 물성비교

기존대비 약 70%정도의 SF₆가스의 절감효과가 예상된다.

2.3.4 SF₆ 사용 금지

SF₆ 가스를 전혀 사용하지 않은 GIS 개발은 SF₆ 가스 대체기술의 핵심이라 할 수 있다. 현재까지의 개발 동향으로써 가장 대체절연가스로 주목 받고 있는 것은 질소(N₂)와 건조공기(Dry Air)이다.

통상적으로 N₂가스와 Dry-Air의 절연 성능은 SF₆ 가스의 1/3 정도로 알려져 있다. 그림 5에서 보면 Dry-Air의 절연성능이 N₂ 가스보다 약간 높다는 것을 알 수 있다. 3가지 절연가스에 대해서 절연내력을 비교하면 SF₆가스를 100이라 했을 때, 대략 N₂가스가 33, Dry-Air가 37정도로 요약할 수 있다.

그림 6은 SF₆가스와 N₂가스의 압력에 따른 절연 파괴전압을 나타낸 것이다. SF₆가스를 사용했을 때의 설계압력 0.17MPa.abs와 동일한 절연내력을 확보하기

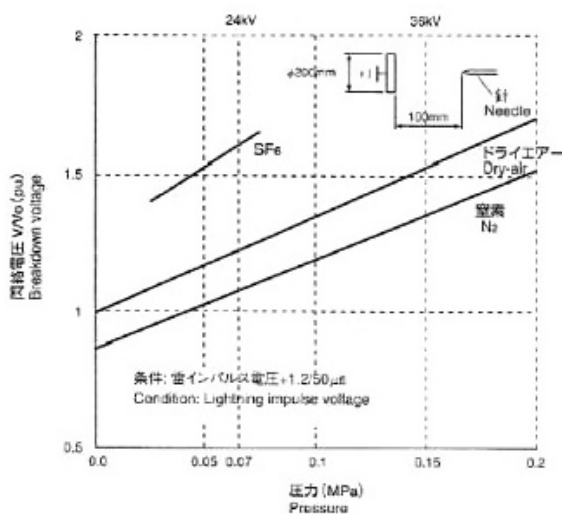


그림 5. SF₆/N₂/Dry Air가스의 절연특성

위해서는 N₂가스 0.4MPa.abs의 압력이 필요한 것을 보여준다.

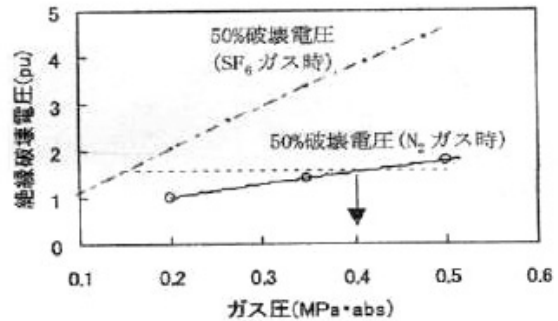


그림 6. SF₆/N₂가스의 절연파괴전압 비교

앞서 언급한 바와 같이 GIS에 있어서 SF₆를 Dry-Air로 대체하는 것은 아크소호 능력과는 관계가 없어 야 한다는 전제조건이 따른다. 이러한 사유로 GCB가 아닌 VCB를 사용하는 GIS에 Dry-Air를 절연매질로 사용한다면 충분히 성능확보가 가능하리라 예상된다. 2.4절에 소개하겠지만 현재 상용화하고 있는 선진업체의 경우도 대부분 VCB를 사용하는 Medium Voltage급의 GIS에 N₂ 가스, 혹은 Dry-Air를 이용한 대체방식을 채택하고 있다.

초고압 GIS의 경우는 여전히 GCB를 통한 전류차단 능력 확보의 문제점을 안고 있다. 그래서 기본적인 문제의 해결방안으로 V.I 개발을 통해 대용량 VCB를 개발하여 초고압 GIS에 응용하는 사례도 있지만, 그나마도 145kV급 정도에 국한되어 있다. 현재 CO₂가스를 이용해 GCB에 적용하고 부족한 성능에 대해서는 Hybrid Puffer를 이용한 차단부 압력상승과 Ablation 소자적용을 통한 차단성능 향상에 대한 기초연구가 일본을 중심으로 진행 중에 있다. 결론적으로 SF₆ gasless는 MV GIS에서 활발하게 이루어지고 있으며, 초고압 기기에서는 GIL 부문에 대해서만 상

용화가 이루어지고 있다.

GIS에 있어 대체가스를 적용하는 것은 필요한 내전압을 얻기 위해 고압가스 구조를 취하는 방식이지만, 가스탱크의 기계적 강도 확보를 위해 더욱 두꺼워지고, 고압력용 V.I를 다시 개발해야 하는 등 제한적 요소가 많다. 따라서, SF₆ 가스를 적용한 중래 C-GIS와 같이 Compact화 하기 위해, 차단기에는 차단성능이 우수한 VCB를 적용하고, VCB외부, 모선, 단로기, 접지 개폐기 등은 고기압 가스 절연을 적용한다. 그런 이유로, 각 구성기기를 고기압 가스 절연에 적합한 치수, 제원으로 설계하기 위해 고기압 가스 절연특성에 대한 기초연구가 선행되어야 한다.

"SF₆ 가스의 대체"라는 명제는 SF₆가스 대신 다른 대체물질을 찾는 단순 명제가 아니라, 대체물질이 SF₆가스에 비해 부족한 성능을 현재 개발 경향에 맞

추어 축소화, 고용량화, IT기술을 접목한 추가 기능들을 포함하면서 보완해 가야 한다는 복합 명제임에 틀림없다.

2.4 실제기기 적용사례(Medium Voltage급)

2.4.1 일본 NISSIN사

일본의 NISSIN사에서는 Dry-air와 고체절연을 혼합 적용하여 복합절연타입으로 그림 7과 같은 Layout을 가지고 있다.

주요 특징을 살펴보면 PMA조작기를 사용하여 Compact와 경량화를 실현하였고, 3Position 단로기 / 접지개폐기를 적용하였으며, 고체절연 모선의 채용으로 설치면적축소와 편리성을 도모하였다.

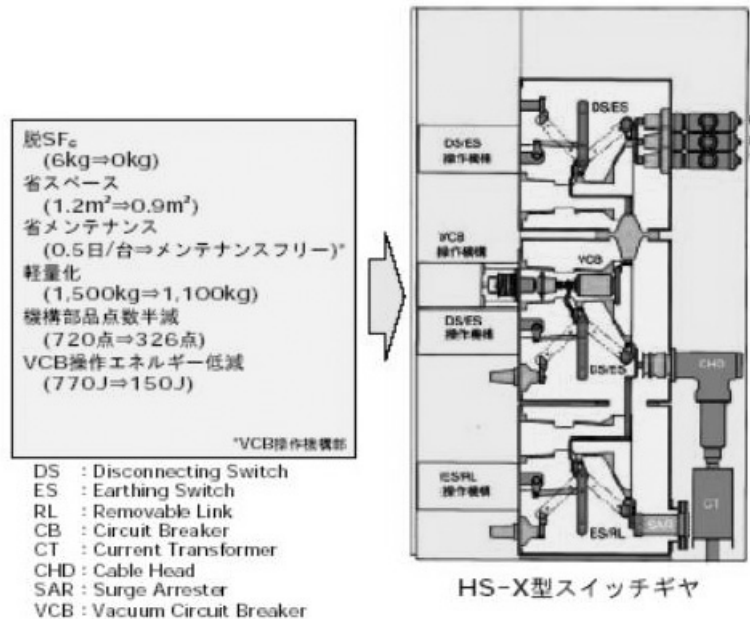


그림 7. Nissin사 24kV C-GIS Layout

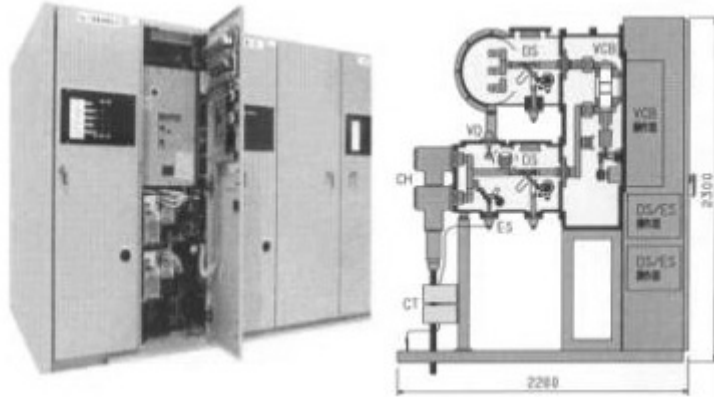


그림 8. JAEPS사(구 Hitachi사) 24kV C-GIS Layout

2.4.2 일본 JAEPS사

JAEPS사는 N₂ 혹은 Dry-Air를 적용하여 동일구조에서 사용되는 가스 종류에 따른 가스압 변화를 통해 성능을 확보한 24kV C-GIS를 개발하였다.

2.4.3 일본 TOSHIBA사

일본의 TOSHIBA사에서는 고체절연을 적용한 24/36kV SIS(Solid Insulated Switchgear)를 개발하였고 그 상세사양은 아래와 같다.

정격전압(kV)	24		36
정격전류(A)	630/1250		
정격차단전류(kA)	25		
정격내전압	AC	50	70
	LI	125	170
정격단시간내전류(kA-s)	25(3초)		
절연방식	고체절연 - SIS		
VCB/DS 조작방식	Balance형 전자조작기구(BMA)		
기준규격	JIS, JEM, JEC, IEC		

이와 같이 MV급에서는 여러 방식의 적용이 시도되고 있으나, HV급에서는 SF₆ 가스를 대체할 수 있는 차단 및 소호능력을 가진 절연매질 연구가 활발히 이루어지고 있으며 아직까지는 상용화가 이루어지지 않고 기초 연구만이 진행되고 있는 실정이다.

2.5 신Type의 조작기 적용

신절연 개폐장치의 Compact화를 도모하고자 New



그림 9. Toshiba사 24kV C-GIS 사양 및 Layout

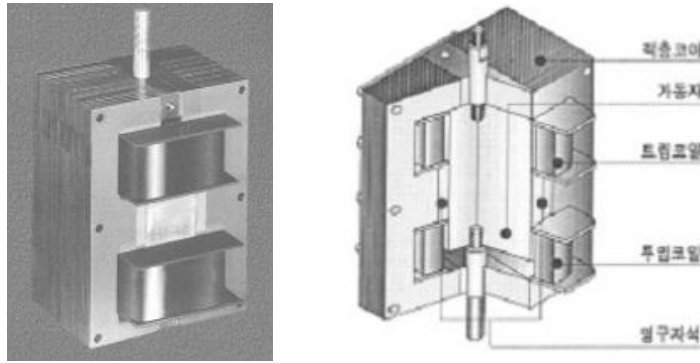


그림 10. PMA 내부구조

Type VCB Mechanism으로써, PMA(Permanent Magnetic Actuator)조작기 적용이 확대되고 있다.

로 유지하며, 조작코일 에너지로부터 생성되는 영구자석의 보자력을 초과하는 구동력에 의해 움직인다.

2.5.1 PMA Mechanism의 특징

(2) PMA의 동작원리

(1) PMA의 구조

PMA는 'Bistable Magnetic System' 을 갖는 조작기로, 적층코어(철심) 중간에 고품질 NdFeB 계열인 1T(Tesla) 이상의 영구자석 2개를 넣고 가동자의 전환을 위한 조작코일로 이루어진 단단한 단일구조의 구동부로 구성되어 있다. PMA의 가동자는 영구자석의 보자력(Coercive Force)을 이용하여 동작 상태를 스스

① Open(트립) 위치

Open 위치에서는 자기저항이 작은 방향인 가동자가 코아에 접촉된 부분으로 영구자석의 자속이 집중하여 흐르며, 자기저항이 큰 가동자의 밑부분은 자속의 흐름이 거의 없다. 따라서, 영구자석의 자속은 가동자와 코아가 접촉된 부분에서 큰 흡인력을 만들며, 이 흡인력은 V.I에 연결된 Change Lever(구동 Lever)에 전달된다.

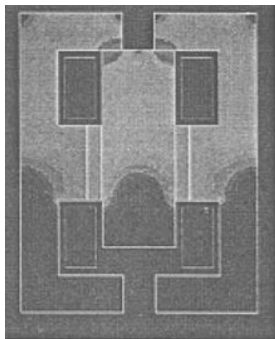


그림 ㉑

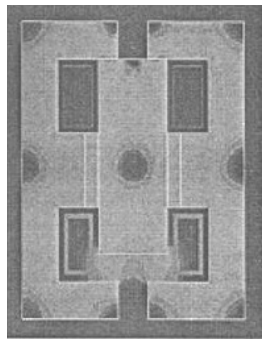


그림 ㉒

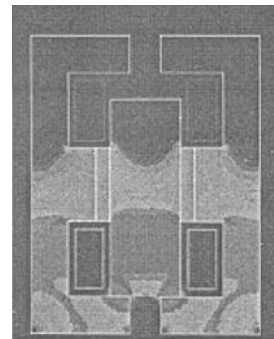


그림 ㉓

그림 11. PMA 동작시 자속밀도 분포도

㉞ Motion 직전

하부 코일에 의해 추가되는 자기 에너지는 공극의 높은 자기저항을 보상하여, 자속선을 점점 더 하부 방향으로 향하게 만든다. 윗부분의 유지력은 줄어들며 밑부분의 흡인력은 증가한다. 코일의 전류가 어느 수준을 넘어서면 가동자는 움직인다. 그림은 가동자가 움직이기 직전의 자속선을 보여준다.

㉟ Motion 후 Close(투입) 위치

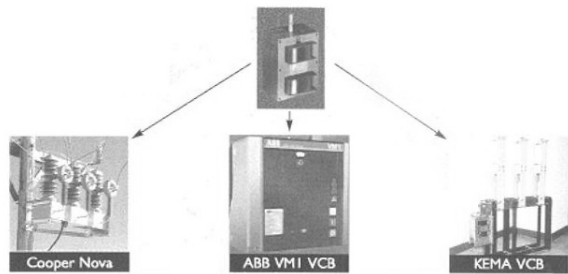
Close 위치에 도달했을 때, 코일의 유지전류는 Latching Process를 향상시킨다. 영구자석의 자속과 전자기 자속의 합에 의해 매우 효과적으로 기계적인 진동을 줄이는 큰 힘을 생성한다. 수 ms가 지난 후 코일전류는 Off되며 자속선의 분포는 그림11의 ㉠와 비슷해진다. 이 순간 가동자는 영구 자석에 의해 생성되는 상태 유지력으로 Latching된다.

(3) 해외동향

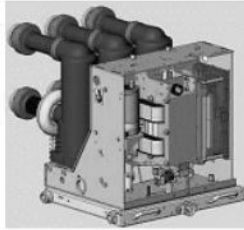
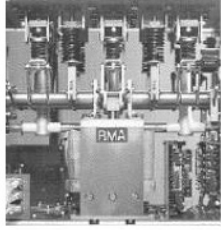
① BMA사

- BMA사는 영국의 PMA 전문업체이며, PMA에 관한한 세계 최고의 선진사

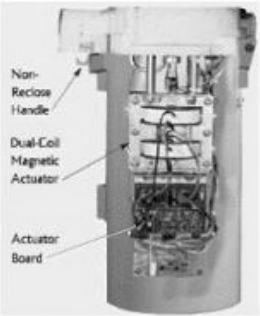
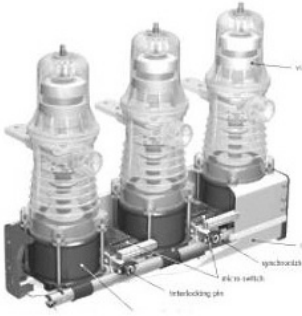
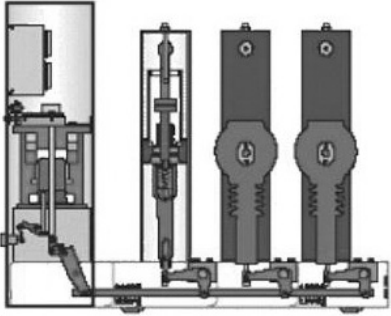
- 국내 대부분의 업체가 채택하고 있음
- 다양한 Switchgear에 적용사례가 있음



② AMVAC(ABB) / TOSHIBA

ABB	TOSHIBA
	
<p>(5kV / 15kV / 27kV) 가격 : Spring 조작기 대비 120% PMA 조작기 적용 비중 : 전체 생산량의 10% 미만</p>	

③ COOPER / TAPRIDA / ALSTOM

COOPER	TAPRIDA	ALSTOM
		

3. 결론

최근 환경문제로 대두되고 있는 SF₆가스에 대한 친환경 전략이 요구되고 있으며, 관리 시스템 강화를 통한 SF₆ 가스 손실을 감소, 기기 축소화에 따른 SF₆ 가스 사용량의 감소, 마지막으로 SF₆ 가스 대체가스 연구가 진행되고 있다. 그러나 상용화 측면에서 SF₆ 가스를 완전 대체할 수 있을만한 단독가스는 아직까지

없다고 할 수 있겠다. 특히 MV급을 제외한 HV급에 대해서는 SF₆ 가스를 대체할 수 있는 기술보다는 우선적으로 사용량을 줄이며 동일한 성능을 확보할 수 있는 방안을 찾고자 하는 노력에 집중해야 한다. SF₆ 가스는 전기산업에서는 반드시 필요한 가스이므로 SF₆ 가스 대체기술에 대해서는 장기적이며 조직적인 연구와 개발의 노력이 필요하다.