

해외기술

해외
기술

直流送電用 變壓器 · 리액터의 개발

1. 머리말

현재 일본에서의 직류송전에 관한 실적은 직류 250kV, 송전용량 600MW이다. 광역연계를 염두에 둔 기간계통의 정비에 직류송전을 채용하는 데는 송전전력의 대용량화가 불가결하며 대용량화를 기하기 위해서는 직류고전압(500kV) 기기가 필요하다.

이와 같은 배경하에서 주요기기인 변환용변압기와 직류리액터에 대해서도 직류 500kV송전의 실현을 위하여 기기의 절연기술 확립, 저손실, 썩스페이스, 저코스트 및 고신뢰도의 기기를 위한 개발을 실시하였다.

그중에서도 절연의 개선은 콤팩트화·저손실화에 크게 기여하기 때문에 DC 500kV에 대응하는 직류절연기술의 확립이 중심과제라고 생각되어 이를 추진하였다.

여기에 직류 500kV화를 위해 추진한 절연기술개발과 그 성과인 기기의 콤팩트화·저손실화에 대한 기여에 대하여 기술한다.

2. 개발목표

$\pm 500\text{kV}$ 송전을 예상한 직류송전계통의 스케톤을 그림 1에 표시한다. 또 이번 개발에서 대상으로 한 변환용변압기·직류리액터의 사양을 표 1에 표시한다.

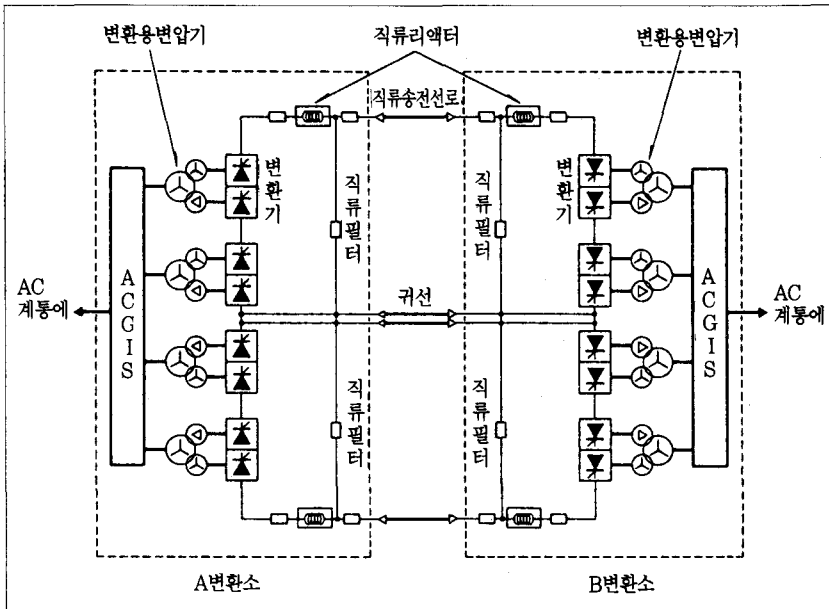
3. 직류절연의 특징

변환용변압기 및 직류리액터는 교류계통 변압기나 리액터에 비해 절연상 표 2의 특수성이 있기 때문에 충분한 배려가 필요하다.

4. 직류절연개발

직류송전에 관한 연구개발은 1980년~1982년도에 실시한 경위가 있으며, 절연에 관해서는 다음과 같은 내용의 연구가 실시되어 DC125kV, 300MW급의 직류기술이 확립되고 있다.

해외기술



〈그림 1〉 DC 500kV 3,000MW급 직류송전계통

시험에 의한 검증

(4) ±125kV계통용 기기에 의한 장기과전시험·전전류통전시험에 의한 종합검증

이번에는 전압이 500kV로 4배가 되기 때문에 절연거리는 비약적으로 증대한다.

그래서 절연거리의 증대를 억제하기 위하여 고전압의 직류송전용기에 대응한 직류절연기술의 개발을 위해 표 3의 스템으로 추진하였다.

다음에 각 스템에서의 개발내용을 기술한다.

〈표 2〉 변환용변압기·직류리액터의 절연상의 특수성

구분	변환용변압기	직류리액터
절연상의 특수성	· 밸브측은 全絶緣이 된다 · 밸브측 권선에는 상시 직류고전압이 가해진다. 또, 극성반전에 의하여 전압의 극성이 바뀐다	· 권선은 全絶緣이 된다 · 권선에는 상시 직류고전압이 가해진다. 또, 극성반전에 의하여 전압의 극성이 바뀐다.
현상의 특징	(1) 절연물의 전압분담이, 정상상태에서는 저항률비로 확정된다. (2) 절연물의 저항률에는, 온도 의존성, 電界의존성이 있다. (3) 극성반전시에 전하가 瞬時에 이동할 수 없기 때문에, 전압분담의 급격한 변화가 생긴다.	

- (1) 절연유와 유침지의 직류내전압, 직류저항률 등의 기초 절연특성의 파악
- (2) 절연물의 저항률·유전율을 고려한 직류과도전계해석 소프트웨어의 개발
- (3) ±125kV급 실절연구조의 직류내전압·극성반전 모의

〈표 1〉 변환용변압기·직류리액터의 목표사양

기 기		변환용변압기	직류리액터	
전압		500/110/110kV	DC 500kV	
전류		—	DC 2,800A	
용량		872/436/436MVA	—	
입피턴스		16%	1H(헨리)	
絶 流 側	交流側	雷임펄스내전압	1,300kV	
		교류내전압	645kV 5분	
	直 流 側	雷임펄스내전압	1,300kV	1,300kV (대지, 極間 공히)
		개폐임펄스내전압	1,175kV	1,300kV (대지, 極間 공히)
		교류내전압	645kV 5분	645kV 5분
		직류내전압	±750kV	±750kV
	직류극성반전내전압	±595kV	±625kV	
손실		0.3% 이하 (872MVA베이스)	0.15% 이하 (雙極 2,800MW베이스)	

〈표 3〉 절연개발 스템과 내용

스텝	항목	내용
1	기초절연개발	1.1 기초절연 특성 현재의 유처리기술에 있어서 재료단체의 절연 기초데이터(절연유·절연지의 저항률, 절연유의 V-t특성, 절연지의 직류내전압)의 확인 1.2 복합절연 특성 상기 1.1의 데이터를 기초로 한 복합절연구조의 최적화(油和 프레스보드의 최적구성비율)
2	요소모델의 검증	·상기 성과를 반영하여 직류고전압의 절연구조를 필요로 하는 기기요소부(직류권선부, 리드 및 부싱실드부)의 실규모요소모델을 제작하여, 성능을 검증(油-氣中 부싱을 포함함)
3	실규모시작 검증	·실규모모델 검증 각 요소부(직류권선부, 리드 및 부싱실드부, 油-氣中 부싱)을 조립한 총합적인 절연성능을 검증

해외기술

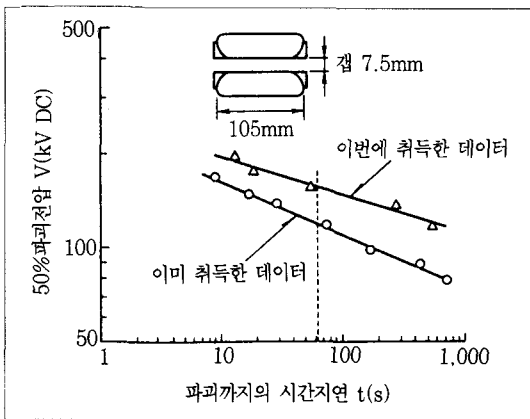
4.1 기초절연개발

4.1.1 기초절연 특성시험

절연유·유침지 등의 재료 單體의 직류기초절연특성에 대해서는 과거에 데이터를 취득하고 있다. 이번에 다시 데이터를 확인하는 배경으로는 근년의 제조기술의 개선, 즉 조립환경의 클린화가 있다. 클린화(최종적으로는 유중塵埃의 저감)에 의하여 절연능력이 개선된 것은 교류에서는 확인하고 있다. 직류인 경우도 마찬가지로 개선이 기대되기 때문에 최근의 제조환경하에서의 재료특성을 측정하는 것이다.

(1) 油갯의 V-t 특성

그림 2에 유갯의 직류 V-t 특성을 표시한다. 그림에서 클린화에 의하여 직류에서도 50%파괴전압이 향상되고 있음을



〈그림 2〉 油갯의 직류V-t 특성

알 수가 있다. 예를 들면 1分値의 비교에서는 약 30% 향상되었다. 이밖에 참고로 하기 위하여 동일조건에서의 교류 V-t특성도 측정하였다. 파괴전압의 직류와 교류의 관계는 당시와 변함이 없으며 직류파괴 전압은 교류(실효치)보다 낮고 1分値의 비교에서는 약 0.9 배였다.

(2) 유침지의 직류내전압

유침지(프레스보드, 크래프트지)에 대하여 직류내전압시험을 하였다. 유침지에 대하여는 기취득데이터와 변함이 없으며 다음과 같았다.

(a) 유침지의 직류내전압은 교류(실효치)보다 높고 프레스보드의 경우 5~6배, 크래프트지의 경우는 약 3배였다.

(b) 0.2~0.8mm 두께의 유침지에서는 직류파괴전계강도는 변함이 없었다.

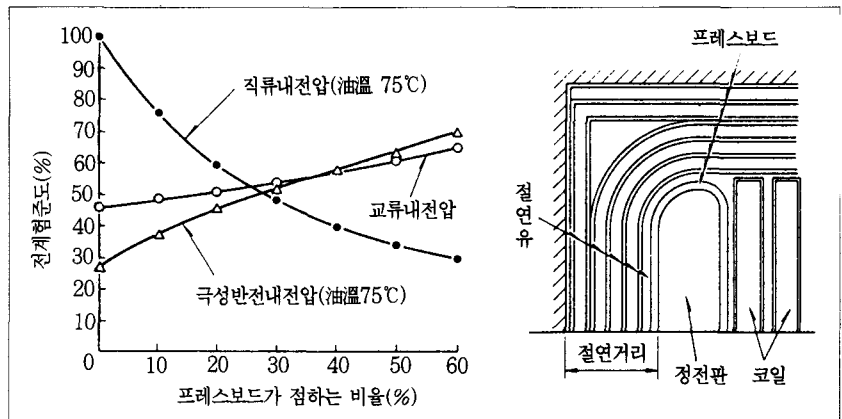
(3) 절연유 및 유침프레스보드의 직류저항

절연유 및 유침프레스보드의 직류저항을 측정하였다. 직류저항은 기취득한 데이터보다도 대체로 높은 결과였다. 이 결과도 클린화에 의한 특성이다.

4.1.2 복합절연 특성

변압기와 직류리액터의 절연은 절연유와 유침지로 구성되는 복합절연이 사용된다. 교류계통용 변압기와 같이 권선에 가해지는 전압이 교류인 경우에는 전압분담은 각 절연물의 유전율로 결정되지만 직류송전용과 같이 직류전압이 가해지는 경우에는 전압분담은 각 절연물의 저항률로 결정된다. 또한 극성반전시에는 반전전의 전압분담은 저항률로 결정되어 있으며 반전직후의 전압분담은 반전전의 분담전압에 유전율로 결정되는 전압이 중첩된다.

한편 기초절연특성향에서 기술한 바와 같이 절연지와 油는 내전압성능에 차가 있으므로 직류송전용권선기기의 절연



〈그림 3〉 복합절연의 절연구성과 절연유 함준도

은 여러 가지 전압에 대하여 가장 합리적인 구조를 생각할 필요가 있다. 여기서는 복합절연의 기초적인 검토내용을 기술한다.

(1) 복합절연에서의 절연구성비율

순절연거리를 油와 유침지(프레스보드)에 어떻게 배분하면 교류·직류 나아가서는 극성反轉 등의 전압에 대하여 밸런스가 취해진 절연성능이 되는가에 대하여 개략적인 검토를 하였다. 그림3은 이 문제에 대한 하나의 지표를 주는 것으로 다음과 같이 하여 얻은 것이다.

- (a) 절연거리를 가정하고 프레스보드가 접하는 비율을 바꾸어 표 1의 각종 전압을 가한다.
- (b) 복합절연의 절연강도는 일반적으로 절연유로 결정되기 때문에 절연유에 가해지는 전계를 기초절연특성시험결과의 절연유허용전계로 나누어 각각에 대한 힘준도로 평가한다.

순절연거리를 油로 充填한 경우의 직류내전압에 대한 힘준도로 正規化한다.

또 油의 절연내력은 油隙長에도 의존하는 성질이 있으나 여기서는 대략적으로 파악하는 것을 목적으로 하므로 이것을 무시하고 있다.

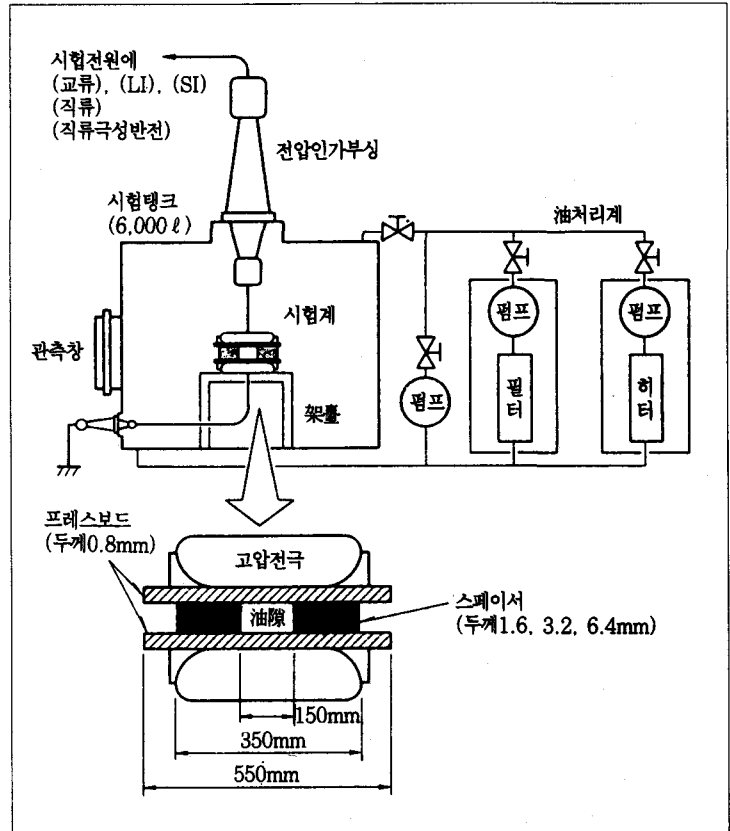
그림에서 전절연거리에서 접하는 프레스보드의 비율이 약 30%이면 각종 내전압에 대하여 힘준도의 밸런스가 취해진 절연구성이 되는 것을 알 수 있다.

(2) 복합절연모델의 절연특성시험

전술한 바와 같이 복합절연에서는 전절연거리에서 접하는 프레스보드의 비율을 약 30%로 하면 여러 가지 내전압에 대한 절연유의 힘준도의 밸런스가 취해진 구성으로 된다. 이를 바탕으로 프레스보드가 접하는 비율이 20~50%의 범위에서 복합절연을 구성하여 각종 전압에 대한 절연검증시험을 실시하였다.

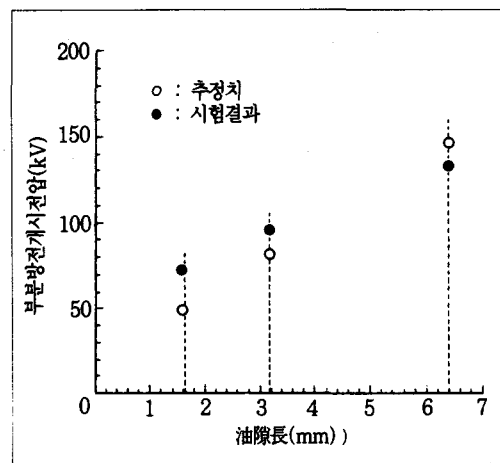
시험계구성을 그림 4에 표시한다. 이 시험에서 얻어진 여러 전압에 대한 결과를 다음에 든다.

(a) 교류내전압시험



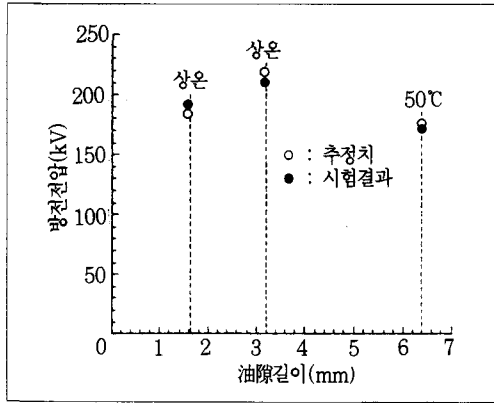
〈그림 4〉 복합절연의 내전압시험계

그림 5에 교류부분방전특성을 표시한다. 전압의 상승은 5분간 스텝압에 의하였다. 추정전압은 교류V-t 특성의 5분치



〈그림 5〉 복합절연모델의 교류부분방전특성

해외기술

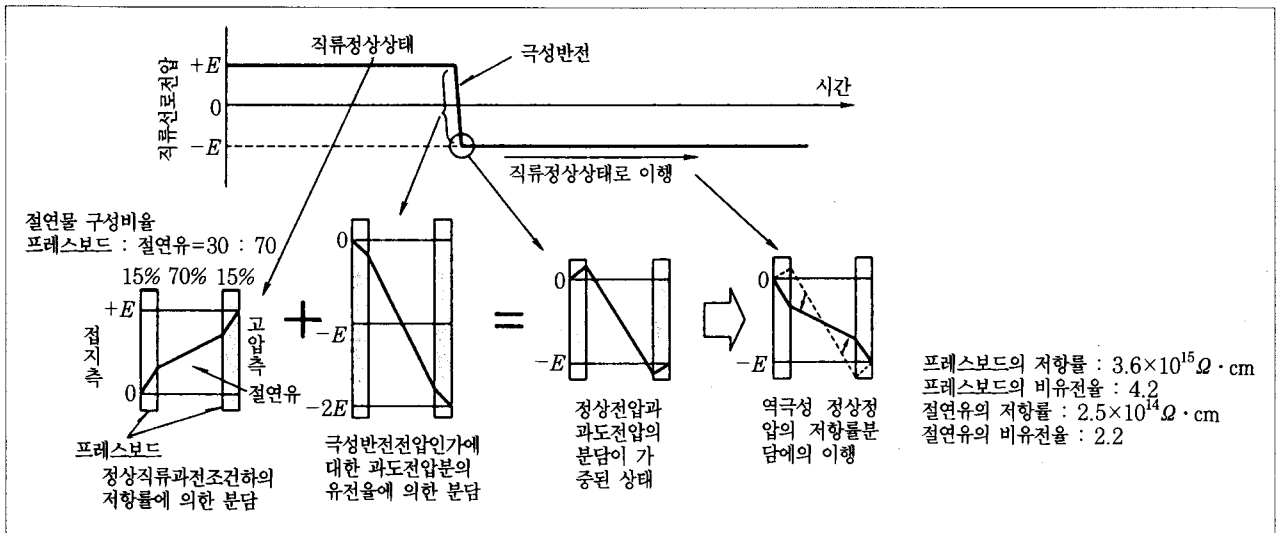


〈그림 6〉 복합절연모델의 직류내전압특성

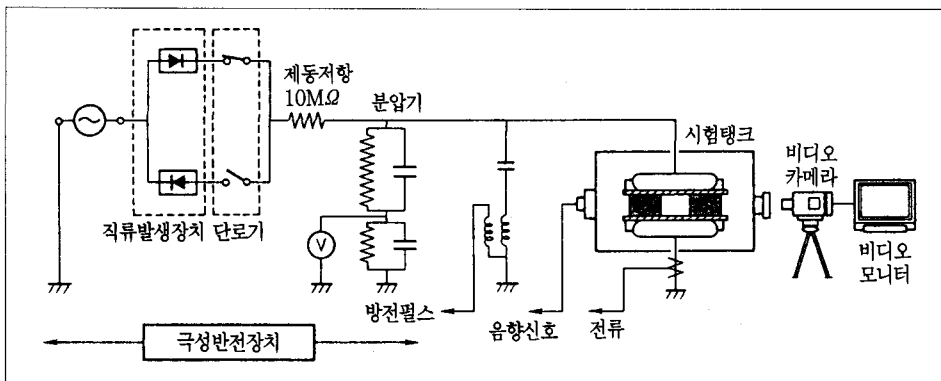
에 의하여(油隙길이 7.5mm). 油隙길이 짧은 영역에서는 추정전압쪽이 낮고 긴 영역에서는 높아지는 경향이 있는데 이것은 油가 갖는 부분방전개시 전압의 油隙長(길이)依在性에 의한 것으로 해석할 수 있다.

(b) 직류내전압시험

그림 6에 직류내전압 특성을 표시한다. 직류인 경우는 인가전압을 60분 홀드하여 파괴가 생기지 않으면 다음의 전압 스텝으로 상승시켰다. 이 경우 전압의 상승에 의한 교류성전압의 중첩이 있는 점, 또 온도가 낮은 경우에는 전극의 전압은 설정전압이 되어도 절연물의 분담전압이 정상상태에 달하기까지에 시간을 요하는 점 등에 주의하여 시험함과 동시



〈그림 7〉 극성반전시의 절연물의 분담전압변화



〈그림 8〉 극성반전시험회로

에 결과를 평가할 필요가 있다. 油隙길이 6.4mm인 경우는 온도를 높여 분담전압이 정상에 달하는 시간을 짧게 한 것이다. 이상과 같은 직류 시험 특유의 현상을 평가하면 추정전압과 시험치는 잘 일치하였다.

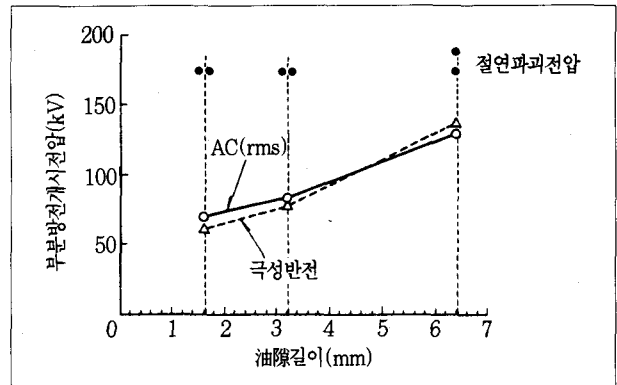
(c) 극성반전 내전압시험
직류송전에서는 송전전력의

방향변경은 전압의 극성반전에 의하여 행해진다. 이때 변환용 변압기의 직류측권선이나 직류리액터에는 가하여지는 전압에 급격한 변화가 있게 된다. 반전시간은 약 0.5초 정도로 되어 있으며 이 사이에 가해지는 전압의 극성이 +500kV에서 -500kV로 바뀐다. 그림7은 극성반전시의 복합절연계의 전압분담 변화를 나타낸 것이다. 이와 같은 현상에 대한 복합절연계의 내전압을 검증하였다.

그림 8에는 극성반전시험회로를, 그림 9에는 이 시험을 위하여 특별히 제작한 극성반전장치치를 표시한다.

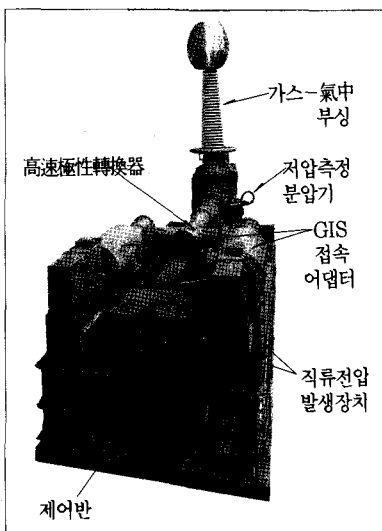
시험결과를 그림 10에 표시한다. 그림에는 비교하기 위하여 교류의 부분방전발생 전압도 함께 표시하였다. 그림에서 극성반전에서는 油隙길이가 짧을수록(절연거리에서 접하는 프레스보드의 비율이 클수록) 동일전압의 교류실효치보다 낮은 値에서 부분방전이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림은 또 내전압시험방법에 대한 하나의 지표도 제시해 주고 있다.

실제품의 극성반전시험은 시험전압이 높기 때문에 장치자체는 대단히 큰설비가 된다. 이것을 교류계통용기기의 내전압시험으로, 부분방전검출방법도 확립된 교류시험으로 대체할 수 있으면 편리하다. 극

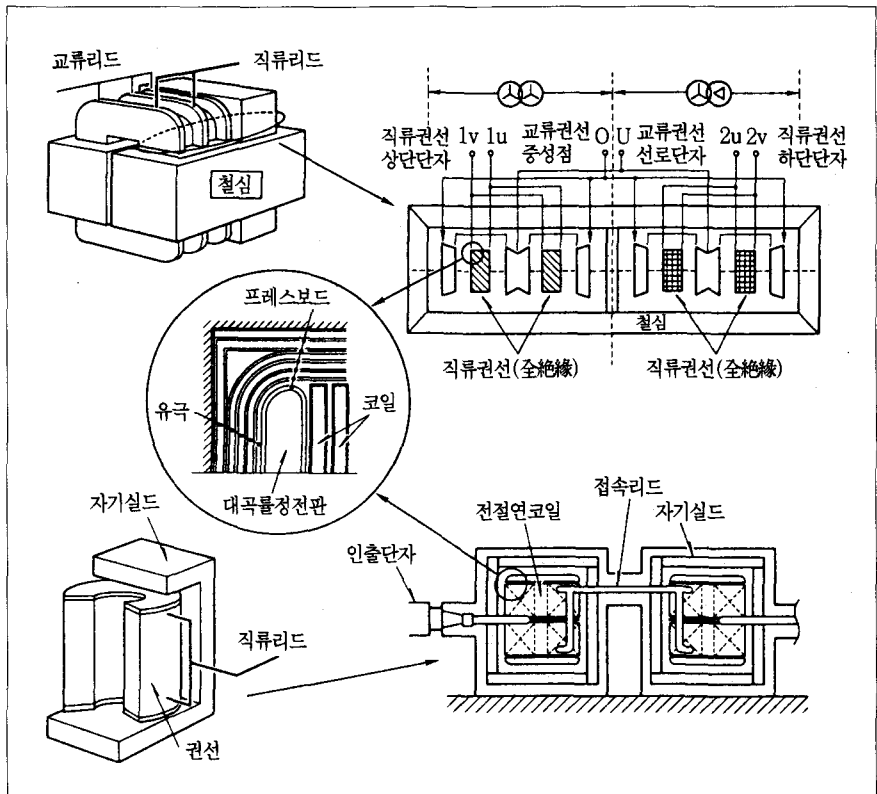


〈그림 10〉 극성반전의 부분방전개시전압

성반전 내전압시험을 교류로 한다면 예를 들어 절연거리에서 접하는 프레스보드의 비율이 33% 정도(그림에서 油隙길이 3.2mm)일 때 검증에 요하는 등가적인 교류전압은 극성반전전압의 1.03배가 되는 것을 그림에서 알 수 있다.



〈그림 9〉 제작한 극성반전시험장치



〈그림 11〉 권선모델의 검증 대상

해외기술

4.2 要素모델 검증

앞절에서 절연재료의 기초특성, 복합절연의 각종 전압에 대한 절연특성을 확인하고 파악하였다. 여기서는 이것을 기초로 직류고전압절연을 요하는 기기 각부의 요소(직류권선부, 리드 및 부상실드부)에 대하여 절연설계를 하여 실절연구조에서의 성능을 검증한 내용을 기술한다.

〈표 4〉 기초절연개발 성과와 반영 내용

구분	기초절연개발 요점	설계의 반영
기초절연특성	· 클린화에 의한 절연유의 특성이 30% 향상	· 절연유의 내전압을 30% 향상 반영하여 절연거리를 종래 설계에서 15% 저감한다.
조합절연의 절연물구성비율	· 절연물구성비율로서는 30% 전후가 적절 · 각종 절연구성비율에서, 복합절연으로서의 성능을 확인	· 절연물구성비율을 30% 전후에서 설계
설계의 타당성		· 실절연구성에서 각부의 전계를 해석하여 확인한다.

4.2.1 절연구성설계

권선·리드 등의 주요절연부분의 설계검토에 있어서는 기초절연개발에서 얻은 성과를 반영하였다. 그 결과와 반영한 내용은 표 4와 같다.

한 결과를 등전위 선도로 표시하였다. 직류인 경우에는 전계는 프레스보드에 집중 되고 교류, 극성반전 직후의 경우는 전계는 油隙에 집중되고 있는 특징적인 현상을 알 수 있다.

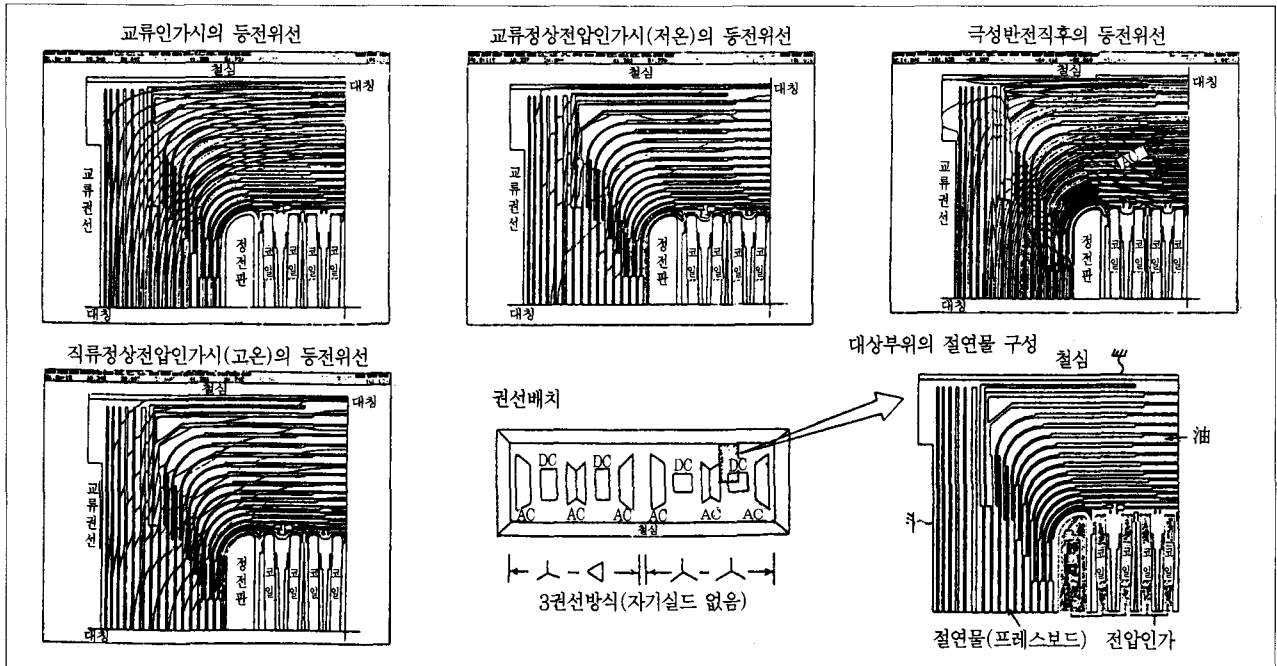
4.2.2 권선절연모델

권선절연모델이 검증 대상으로 하는 부위는 그림 11에 표시하는 것과 같이 변환용변압기의 직류권선단부와 직류리액터의 권선단부이다.

4.2.3 리드 및 부상실드 모델

리드 및 부상실드모델에서 검증의 대상으로 하는 부위는 직류리액터를 예로 하면 그림 13에 표시하는 것과 같이 탱크間 접속리드部와 부상의 油中실드部部分이다. 그림 14에는 이들 권선단부의 절연설계를 하여 전계해석을 한 결과를 등전위선도로 표시하였다.

그림 12에는 이들 권선단부의 절연설계를 하여 전계해석



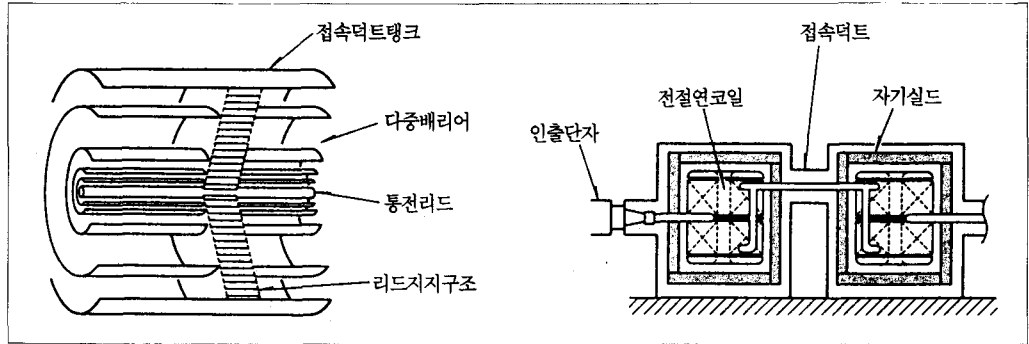
〈그림 12〉 권선절연모델의 전계

4.2.4 절연검증 결과

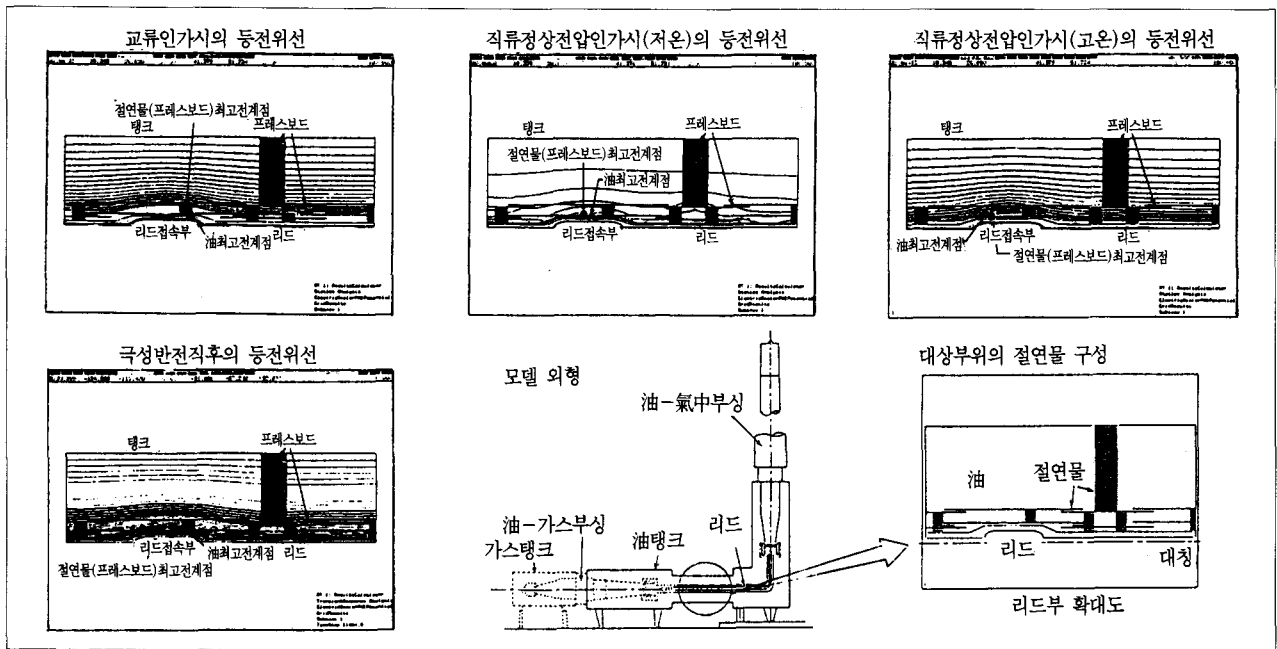
시험은 우선 설계전압을 클리어하는 것을 대충 확인하였다. 모두 양호한 결과였다. 그후 교류와 직류에 대하여 다시 과전압시험을 실시하여 설계의 타당성을 확인하였다. 이들 시험결과를 표 5에 표시한다. 또한 표에 표시된 설계전압은 모델설계시점에서 상정된 전압이다.

〈표 5〉 절연모델의 검증시험결과

시험항목과과전압	모델	권선절연모델		라드 및 부상실드모델
		#1	#2	
시험항목	설계전압	설계전압을 클리어하는 것을 확인		
교류내압	745kV 1분			
뇌임펄스	1,425kV			
개폐임펄스	1,175kV			
직류내압	±750kV 60分	설계전압을 클리어하는 것을 확인		
극성반전	+625kV -625kV			
과전압시험	교류내전압	1.45TV * 부분방전 발생	1.40TV 부분방전 없음	1.35TV 부분방전 발생
	직류내전압	1.30TV 부분방전 없음	1.30TV 부분방전 없음	1.35TV 부분방전 없음

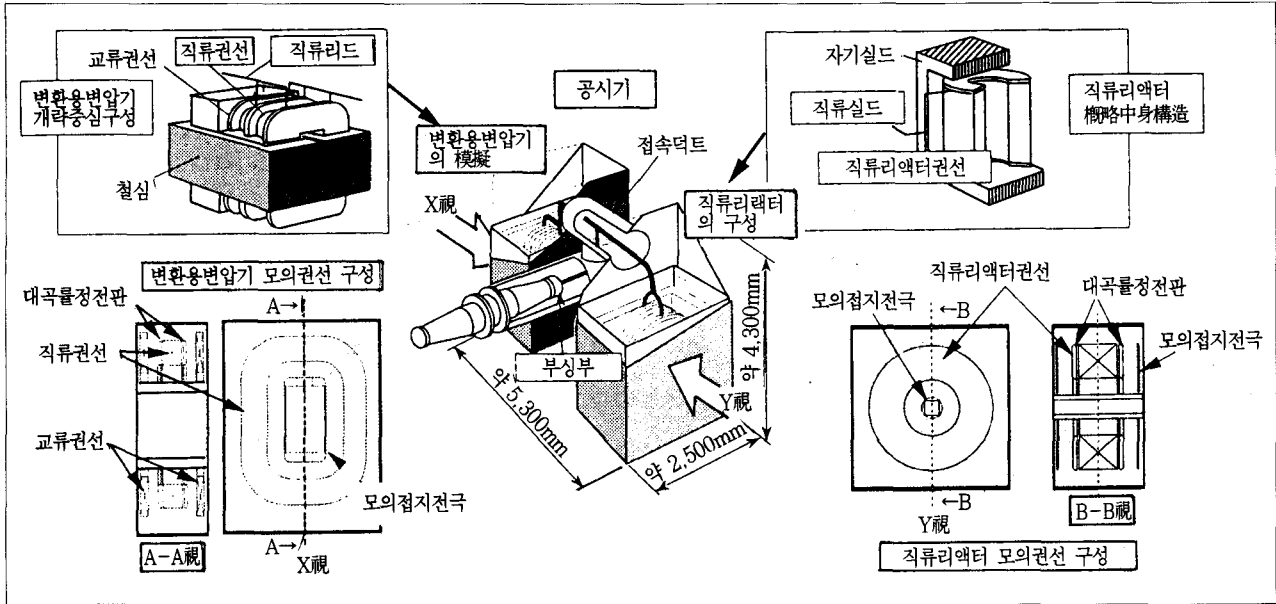


〈그림 13〉 직류리액터의 탱크간 접속구조



〈그림 14〉 리드, 부상실드부의 전계

해외기술



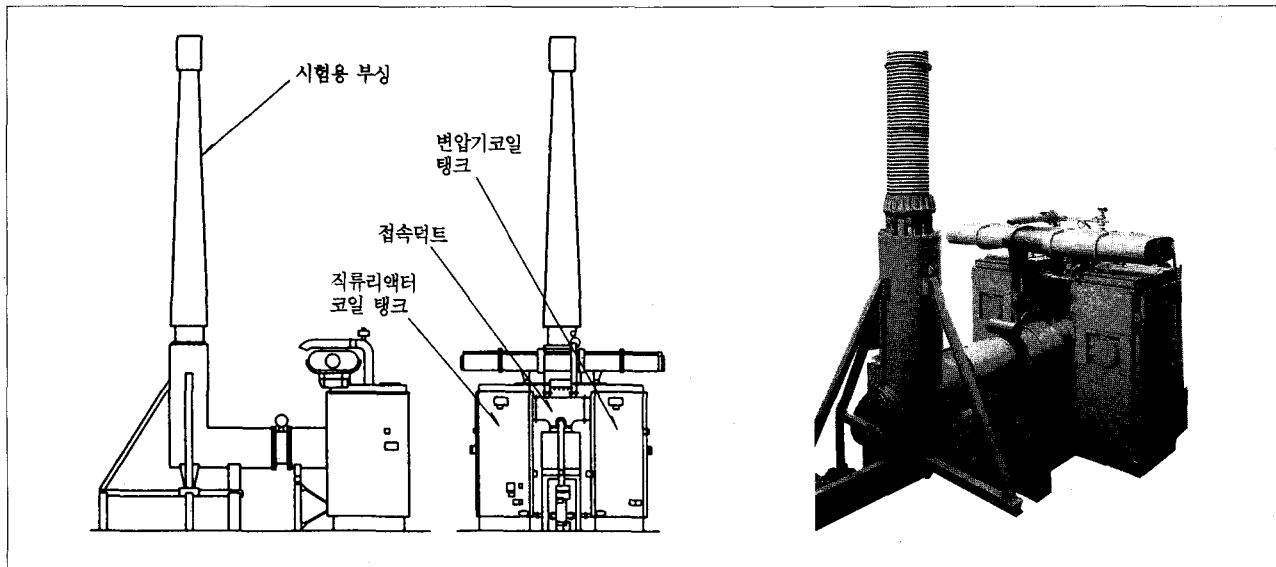
〈그림 15〉 종합절연모델의 기본구조

4.3 實規模試作 검증

요소모델에 의하여 권선부분, 리드 및 부상실드부분을 각각 단독으로 절연성능 검증을 하였다. 또 이들을 조합하여

전체로서 실제구성에 가까운 형태로 하여 종합적인 검증도 하였다.

시험전압, 검증대상부위, 요소모델의 반영 등, 일련의 사양은 표 6 과 같다. 또 이들 사양에 맞춘 모델의 기본구조를



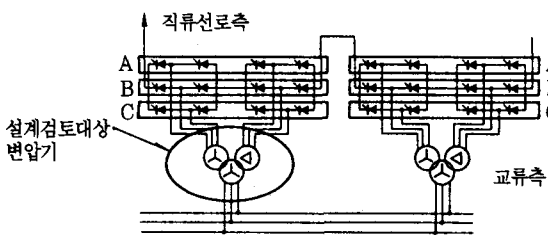
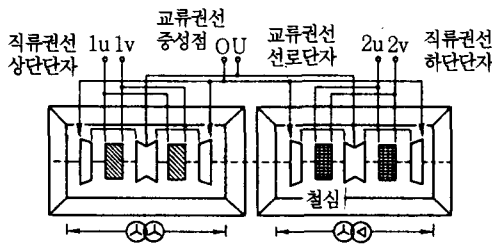
〈그림 16〉 종합절연 모델의 외형

〈표 6〉 시험전압, 검증대상부위, 요소모델의 반영

시험 전압	검증 대상부위
뇌임펄스 : 1,300kV 개폐임펄스 : 1,300kV 직 류 : ±750kV 60분 교 류 : 559kV(1.5E) 30분 645kV(√3E) 5분 559kV(1.5E) 30분 직류극성반전: ±625kV 2시간 625kV 30분	변환용변압기의 대상부위 ① 직류권선의 교류권선에 면하는 端部 ② 직류권선의 철심에 면하는 端部 ③ 직류권선의 리드인출부 ④ 리드의 굴곡, 분기부 ⑤ 부상실드부 직류리액터의 대상부위 ① 軸방향의 자기실드에 면하는 단부 ② 經방향의 자기실드에 면하는 단부 ③ 권선의 리드인출부 ④ 리드의 굴곡, 분기부 ⑤ 부상실드부
요소 모델의 시험 결과 반영	

· 요소모델의 권선절연모델은 #1, #2 공허 1.4×745kV 5분간, 부분방전이 없고, 시험전압의 645kV 5분에 대하여 1.6배 이상의 絶緣裕度가 있기 때문에, 검증 대상부위의 ①과 ②부분의 절연거리를 요소모델에 대하여 15% 저감한다.

〈표 7〉 연구성과 반영 설계

구 분	이제까지의 전 연구성과 반영설계
설 계 사 양	형 식 : 6분할 특별삼상(코일 4H-L 구성)×1 용 량 : 872MVA/436MVA/436MVA 전 압 : 500kV/110kV/110kV 결 선 : 星形/星形/삼각형 %임피던스 : 16%(436MVA 베이스) 소 음 : 70dB(A) 수송제한 : 170톤(철도수송) ^(주1)
스 케 일	
권 선 배 치	
설치치수·총질량 ^(주2)	(W)23.6×(D)17.8×(H)10.8(m) 1,110톤
최대수송치수·질량	(W)3.1×(L)4.5×(H)4.1(m)
손 실 ^(주3)	3,070kW

(주1) 설계조건으로서, 분할수송(조립수송)을 설정. 분해수송(CGPA)인 경우에는, 더욱 콤팩트화가 가능
 (주2) 機器最外치수를 나타낸다(D치수는 기기 전면과 밸브홀 벽 사이의 거리).
 (주3) 손실은, 펄드운전시(INV운전에서의 직류편차, 고조파손실을 포함한 손실)

그림 15에 표시한다. 또한 모델의 외형은 그림 16과 같다.

절연시험검증결과는 모두 양호하였다.

5. 맺음말

이상 500kV 직류송전선에 사용되는 변환용변압기·직류리액터에서 중심과제였던 DC500kV에 대응하는 절연구조에 대하여 최종적인 종합절연검증모델로 일련의 절연검증을 종료하고 기술을 확립할 수 있었다. 종합절연검증모델은 關西電力 山崎實驗센터에서 1995년 10월부터 1년 예정으로 장기절연성능 검증에 들어가 있다.

이 개발로 개발착수전에 예상했던 절연거리를 저감할 수 있음이 검증되었다. 변환용변압기를 예로 설계를 하면 크기, 손실 등은 표 7과 같이 된다.

이 원고는 日本 三菱電機技報를 번역, 전제한 것입니다. 本稿의 著作権은 三菱電機(株)에 있고 번역책임은 大韓電氣協會에 있습니다.