

## 765kV 전력용 변압기 국산화 성공 소개

(주) 효성  
초고압변압기 설계팀장  
부장 박종우

### 1. 서론

최근 우리 나라의 전기기기 기술개발은 수입자유화 정책에 따라 국내시장에서도 선진국과의 경쟁이 불가피해짐에 따라 기업의 기술개발이 더욱 절실해지고 있다. 세계무역기구(WTO)의 출범은 전세계를 무한 경쟁시대로 돌입시키고 있으며 이러한 무한경쟁시대의 구도에서 살아남기 위해서는 국가나 기업모두 경쟁력을 갖추는 것만이 시급한 실정이다.

특히, 초고압 중전기기를 개발하기 위한 기술은 아직도 선진국형 기술이며 선진 외국에서도 기술이전을 이제는 기피하고 있어 자체적인 기술개발이 필요하였고, 또한 국내의 송전전압 격상에 따른 765kV급 기기는 선진국의 국내시장 진출로 수입에 의존할 수밖에 없는 실정이었다.

따라서 금번 765kV 변압기의 국산화는 수입대체 효과와 관련 모든 분야에서의 기술상승, 특히 관련해석기술의 향상과 경쟁력을 확보할 수 있게 되었다. 이에 765kV변압기의 국산화에 대해 그 결과를 소개코자 한다.

### 2. 765kV 변압기 개발 배경

#### (1) 변압기의 역할 및 중요성

발전소에서 만들어지는 전기에너지는 발전소용 송압변압기에 의해 전압이 고전압으로 상승된 후 송전선로를 통해 수요처인 각 공장 및 가정 근처에까지 공급된다. 여기서는 별도의 변전소용 강압 변압기, 배전 및 상변압기에 의해 필요한 저전압으로 강압되어 각종 전기제품에 전기에너지가 공급된다.

전기에너지의량은 전압과 전류의 곱으로서 계산이 되므로 같은 량의 전기에너지의 경우 전압이 두배로 증가하면 전류가 반으로 감해져 송전시 전류량의 제곱에 비례하는 손실이 4분에 1로 감소하게 된다.

발전소에서 만들어진 전기에너지는 전류량이 크거나 송전거리가 길어질수록 송전선로에서 허비되는 에너지 손실은 급격히 증가하게 되어 비효율적으로 운영된다고 할 수 있다.

특히 대량의 전기에너지를 장거리 송전을 하기



위해서는 손실을 줄이는 것이 필요하고, 이를 위해서는 전압을 높여서 송전하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

이렇듯 전기에너지의 전압을 변화시키면서 기기의 효율이 매우 높은(보통 99.9% 이상) 장치가 곧 전력용 변압기(Power Transformer)이다.

따라서 발전소의 용량이 증대되어 송전해야 할 에너지 단위가 커지게 되거나, 먼 지역까지 장거리 송전을 할 경우 송전선로에서 발생되는 손실 에너지를 줄이기 위해서는 전압을 높게 할 필요성이 요구되며, 이러한 요구에 부응하기 위하여 전력회사와 기기 제작사는 고전압 송전선로와 고전압용 변압기의 제작을 위한 연구 개발이 끊임없이 진행되는 것이다.

(2) 국내 송전 전압의 격상 현황

제 1차 경제개발 시점부터 국내의 산업 발전과 함께 전력의 소비량이 계속해서 증가하게 되었고, 이러한 수용에 대응하기 위하여 대규모의 발전소 건설 및 대용량의 전기에너지 송전이 필요하게 되었으며, 이에 따라 송전 전압의 격상도 불가피하게 되었다.

최초 66kV가 최고의 송전전압이었으나, 점차 154kV에서 현재의 345kV까지로 송전하게 되었고, 1991년도에는 드디어 765kV로의 격상이 결정되었다.

아래의 표는 국내 송전 전압의 격상에 대한 변천 과정을 보여주고 있다.

〈표 1〉 국내 송전 전압의 변천사

송전개시년도	송전전압	발 전 량	비 고
1923 년	66 kV	-	서울 - 강원도 중대리
1935 년	154 kV	-	서울 - 평양
1976 년	345 kV	4,810 MW	여수 - 인천
2002 년	765 kV	57,766 MW	당진 - 신서산(예정)

(3) 국외의 송전전압 현황

송전 용량이 증대할수록 송전 전압의 격상이 필요하게 되나, 전압이 높을 수록 관련 기기인 변압기 뿐만 아니라 송전선로의 내절연 실현이 어려워 일부 선진국을 제외하고는 765kV급 이상의 관련 기기 개발이 전무한 실정이다.

아래의 표는 각 국의 송전전압에 대한 현황으로써 765kV 이상의 송전 선로를 보유한 국가에 대한 자료이다.

〈표 2〉 각 국의 송전 전압

국 가 명	최고 송전전압	차하위 송전전압
미 국	765 kV	500 kV 급
캐 나 다	765 kV	500 kV 급
일 본*	1,100 kV	500 kV 급
브 라 질	765 kV	500 kV 급
베 네 주 엘 라	765 kV	400 kV 급
남 아 프 라 카	765 kV	400 kV 급
인 도	765 kV	400 kV 급

주 ※ : 일본의 경우 1,100kV 송전은 현재 시험중임.

#### (4) 개발의 필요성

전력 소비량이 증가 추세에 있으며, 또한 신설 예정인 발전소의 단위 발전 용량이 대규모화됨에 따라 345kV로 송전하는 것이 능력면이나 효율성 측면에서 볼 때 거의 불가능한 것으로 판단되어져 한국전력공사 내부에서는 1991년도에 765kV로 격상하는 안이 결정되었다.

765kV 격상안이 확정되면서 전력회사인 한국전력공사와 기기제작사인 효성에 의하여 단계적으로 치밀한 사전 연구 활동이 시작되었다.

한국전력공사는 이미 765kV 송전시를 대비하여 송전선로에서 야기되는 각종 현상을 조사 연구하고 송전선로의 효과적인 설계자료를 확보하기 위하여 1992년도에 이미 765kV 모의 실증시험용 선로를 건설하여 꾸준한 실험과 연구를 진행하여 왔다.

중전기업체의 선두주자로 활약해 온 효성은 또한 765kV 격상 추진에 부응하기 위하여 적극적인 협조 체제와 연구 활동을 실시하여 765kV 모의 실증시험 선로에 소요되는 765kV 시험용 변압기 3대를 비롯한 관련 주변기기를 성공적으로 개발 납품하여 현재까지 운전 중에 있으며, 실규모 용량의 500MVA급 전력용 765kV 변압기를 1996년도에 개발 완료하기도 하였다.

765kV 격상 추진과 관련하여 송변전용 765kV 변압기의 구매 규격이 1996년 9월에 한국전력공사에 의해 확정 발표되면서 효성은 드디어 상용품으로써 실제 변전소에서 운용될 765kV 변압기의 개발을 추진하여 과거 두 차례에 걸친 개발 경험을 토대로하여 1999년 1월에 수요자인 한국전력공사와 공인 시험기관인 한국전기연구소의 입회하에 까다로운 개발시험 전 항목에 대해 성능확인을

성공적으로 완수하여 기기의 품질 및 765kV급 중전기에 대한 기술력을 재삼 확인하게 되었다.

### 3. 과거 765kV급 변압기 개발 내역

금번의 한국전력공사의 송변전용 표준 변압기를 개발하기에 앞서 설계, 제작 및 성능확인 시험적인 측면에서의 사전 기초기술 개발을 위하여 두 차례의 765kV급 변압기를 개발하여 상용품용 765kV 변압기 개발의 기반을 구축하였다.

#### (1) 단상 3MVA 765kV 시험용 변압기

송전전압을 765kV로 격상할시 고전압 송전선로에서 발생하는 각종 영향을 조사하기 위하여 한국전력공사 기술연구원에서는 1992년 전라북도 고창군에 약 2km에 이르는 765kV 실증시험 선로를 건설하였다.

따라서 효성은 시험선로에 전압을 인가하기 위한 시험용 765kV급 변압기를 순수 자체 기술로써 국내 최초로 개발하여 단상 3대(1뱅크분)를 납품한 바 있으며, 1992년 이후 현재까지 성공적으로 계속 운전되고 있는 상태에 있다.

#### (2) 단상 500MVA 765kV 변압기 개발

765kV 변압기를 상용화하기에 앞서 국가적인 차원에서 제작사의 사전 기술력 습득을 위하여 한국전력공사와 공동으로 연구개발 과제로 채택하여 대용량급의 765kV 변압기를 1996년도에 성공리에 개발 완료하였다.

이 변압기는 현재의 상용품용 변압기의 구매 규격이 개발이후에 확정됨으로 인해 기기의 용량 및

탭전압 절환방식을 제외하고는 거의 동등한 제원이다.

### (3) 기개발 765kV 변압기 제원 비교

호성에서 상용품 변압기 개발이전에 두 차례에 걸쳐 기개발된 765kV 변압기의 기기 제원은 다음의 표와 같다.

## 4. 765kV 개발 변압기의 사양 및 제원, 기술적 특징

### (1) 변압기의 사양 및 제원

송전용 변압기는 그 규격이 수요자인 한국전력 공사에 의하여 1996년 9월에 확정 및 발표되었으며, 이에 따른 개발품 변압기의 사양 및 제원은 다음과 같다.

### (2) 기술적 특징

#### ① 초고압화

변압기 운전시 기기 내부에서 발생하는 전압의

크기는 765,000V로써 기존 국내 최고 전압인 345,000V의 2.2배 이상이며, 일반 가정용 220V 전압의 약 3,500배에 달하는 초고전압에 해당된다.

또한 시험시 인가되는 전압으로서, 이상 전압의 크기가 205만V인 낙뢰가 침입하여도 충분히 견딜 수 있도록 초고압에 의한 내절연이 유지되도록 설계되어 있으며, 이러한 내절연 설계는 최첨단의 컴퓨터 분석 기법을 통하여 실현하였다.

한편 선진국에서 기개발된 변압기에 있어서 기기의 제원을 살펴보면, 일본의 1,100kV 변압기의 경우는 시험전압이 195만V이고, 미국의 경우 765kV 변압기의 시험전압은 180만V인 것에 반해 금번 개발품 변압기의 시험전압은 한 단계 높은 205만V에 견딜 수 있도록 개발되었다.

#### ② 대용량화

765kV 개발 변압기의 전기에너지 송전 용량은 단상 666.7MVA로서 차하위급 변압기인 345kV 변압기의 4배에 달하는 용량이며, 단상 3대를 3상으로 뱅크 결선시 삼상 2,000MVA의 전기에너지를 공급할 수 있는데, 이는 서울특별시 전체 가구의 조명을 충분히 감당할 수 있는 정도의 대용량에 해당된다.

〈표 3〉

765kV 변압기 제원 비교

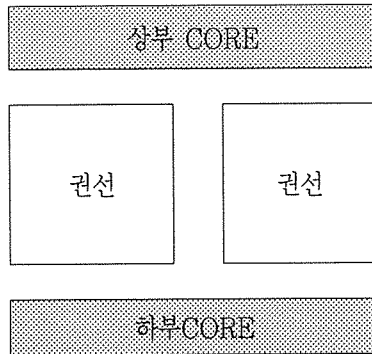
항 목	단상 3MVA 765kV 변압기	단상 500MVA 765kV 변압기
용 량	단상 3MVA	단상 500MVA
정격전압	765/23 kV	765/345/23 kV
탭전압 절환방식	없음	무부하시 탭절환기
충격 내전압	1,425 kV B.I.L.*	2,050 kV B.I.L.

주 ※ : B.I.L(Basic Impulse Insulation Level) ... 변압기의 절연등급을 구분하는 단위으로써 낙뢰가 갖는 전압의 크기를 나타낸다.

특히, 3차측에 대한 단락용량의 증가로 인하여 방지기 위해 3차측에 한류 리액타(Reactor)를 적용, 단락 용량을 미연에 방지하였다. 높은 임피던스의 특성이 요구되며, 이를 자체 권선의 임피던스로 조정시 수송 및 중량이 증가됨을

〈표 4〉 개발 변압기 사양 및 제원

항 목		사 양	
상수 및 형식		1Ø, AUTO TRANSFORMER	
정격 전압		$\frac{765}{\sqrt{3}} / \frac{345}{\sqrt{3}} / 23$ kV	
탭 전압		1차 : $\frac{765}{\sqrt{3}}$ kV $\pm 7\%$ , 23 TAPs(VFVV 방식) 3차 : 20.19 ~ 23 ~ 26.02 kV	
용량 및 냉각방식	용량 (HV/XV/YV)	$\frac{2000}{3} / \frac{2000}{3} / \frac{60}{3}$ MVA	
	냉각방식	FOA1/FOA2/FOA3(400/520/667MVA)	
뇌 임펄스 내전압	HV	FW : 2050kV	CW : 2255kV
	XV	FW : 1050kV	CW : 1155kV
	YV	FW : 150kV	CW : 165kV
	H0	FW : 550kV(Floating) 150kV(직접접지)	CW : 605kV(Floating) 165kV(직접접지)
상용주파 내전압	HV	800kV(7200 Cycle), 690kV(1시간)	
	XV	360kV	
	YV	50kV	
	H0	50kV	
개폐임펄스 내전압	HV	1500kV	
	XV	870kV	
	YV	-	
	H0	-	
중 량	수송 중량	160 TON	
	총 중량	550 TON	
특 기 사 항		2탱크 2분할 구조	



- 권선의 2각 병렬구조 채택
- 상하 자기철드의 취부

( 한류 리액타의 구조도 )

③ 수송 중량 경감

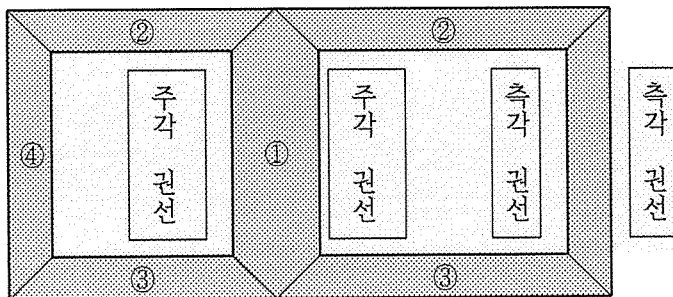
개발품 변압기가 설치 및 사용될 장소는 변전소이며, 이러한 변전소는 해안지방에 건설되는 발전소와는 달리 대개 수요가가 밀집한 내륙 지방에 위치하게 된다.

발전소의 경우 해안 지방에 위치한 관계로 대용량의 변압기를 해상으로 운송할 수 있기 때문에 수송에 있어서는 별다른 문제점은 없으나, 내륙 지방에 위치한 변전소의 경우 도로 및 교량의 안전 한계를 벗어나 대용량의 변압기는 거의 수송이 불가능하게 된다.

급변 개발된 변압기는 총중량이 550톤에 달하

는 대용량으로써 이러한 문제점을 해결하기 위하여 구조적으로 2분할하여 수송 중량을 160톤으로 최소화하였을 뿐만 아니라, 축수를 증가시켜 축당 하중을 감소시키는 것이 가능한 철도 수송용 특수 차량인 슈나벨-카(Schnabel Car)에 의해 수송이 가능하도록 수송 중량을 대폭 줄였다.

또한 철도 수송 시에는 곳곳에 터널이 많아 이를 통과할 수 있도록 수송 치수를 저감키 위해 철심 구조를 단상 3각으로 하여 수송높이의 저감을 실현하였으며, 탭 권선의 위치를 축각에 둬으로써 수송폭 또한 저감, 내륙의 변전소까지 운반이 가능한 구조로 개발하였다.



- ① 주각(Center Leg)
- ② 상부 요크 (Upper Yoke)
- ③ 하부 요크 (Lower Yoke)
- ④ 축각(Side Leg)

( 개발 변압기의 철심 구조 및 권선 배치도 )

#### ④ 전압 조정

양질의 전원을 수요가에 공급키 위해서는 선로 혹은 2차 부하에 의한 어떠한 전압의 변동에도 일정한 전압을 공급해야 하는데 이를 실현키 위해 전압을 조정하는 탭 절환기(Load tap changer)를 사용하였으며, 특히 본 개발 변압기에는 부하 공급중에도 탭 절환이 가능한 OLTC(On-Load Tap changer)를 채택하여 적용하였다.

이때, 1차 전압을 조정키 위하여 직렬권선에 OLTC를 취부시 탭권선, 탭리드 및 Tap changer에 대한 절연처리의 난이함과 적용 OLTC의 부재 등으로 분로 권선의 중성점측에 위치킴으로써 내절연 처리를 용이하게 하였다.

한편 탭권선이 고압 및 중압 권선의 중성점측에 위치하며 고압에 대한 전압을 조정, 일정한 중압 전압을 유지키 위한 VFVV(Variable Flux Voltage Variation)적용하였다

### 5. 개발 내역

#### (1) 개발 기간

1996년 9월 한국전력공사로부터 변압기의 제원이 확정되었으나, 효성은 同年 6월부터 개념설계를 실시하여 1999년 1월 시험이 완료되기까지 총 2년 7개월간에 걸쳐 연구 개발이 완료되었으며, 설계 및 도면 제작기간 약 1년 3개월, 피서품 제작기간 1년 2개월 및 성능 확인시험에 약 2개월이 소요되었다.

#### (2) 개발시 적용 핵심 기술

##### ① 핵심 설계 기술

##### a) 전계 해석에 의한 내절연 설계

외부로 부터의 낙뢰, 차단기 투입에 따른 개폐서 어지 및 송전선 지락사고시 전압상승 등 이상 전압 침입시 절연적으로 충분히 견디도록 하기 위하여 컴퓨터에 의한 전계 분석을 철저히 실시하여 어떠한 과전압이 인가되어도 충분히 견딜 수 있도록 내절연 설계를 구축하였다.

##### b) 자계 해석에 의한 내단락기계력 설계

단락시 단락전류에 의한 전자기계력 계산을 컴퓨터를 사용하여 자계해석을 실시하고, 이에 따른 기계력에 충분히 견딜 수 있는 강도를 갖도록 하였으며, 운전 중 대용량의 대전류에 의한 변압기 내부의 국부적인 과열을 억제시키기 위하여 전류에 의한 온도 분포를 자계 해석을 통하여 분석하였으며, 과열 예상 부위에 쉴딩(Shielding)을 처리하여 장시간 운전 시에도 온도적으로 문제가 없도록 하였다.

##### c) 고강도 탱크 설계

지진 발생에 의한 진동에 충분히 견딜 수 있도록 모든 구조물을 설계하였으며, 슈나벨-카에 의해 철도 수송 시 탱크의 처짐이 없도록 충분히 강도를 보강하였다.

또한 탱크 내부에 침투한 수분을 추출하기 위하여 0.05 Torr의 진공도에서도 변형이 없도록 제작되었다.

#### ② 핵심 제작 기술

##### a) 철저한 공차 관리

내부 부품의 수평도, 직각도 등의 관리를 철저히 하였고, 이를 실현하기 위한 정반 사용 등 특수한 지그(Jig)류가 동원되었다.

또한 조립 공차는 엄격히 준수하므로써 날 개의 부품이 조립된 후의 변압기 특성에 변화가 없도록 하였다.

공정 중에서도 각종 부품류의 온도 및 습도에 의한 치수 변형을 방지하기 위하여 조립장 내를 항온항습이 되도록 관리하였다.

#### b) 엄격한 이물질 관리

기기의 사용 전압이 높아질수록 취약 분야로 대두되는 것은 변압기 내부로의 수분과 이물질이 유입되는 경우이며, 이를 철저히 배제시키기 위하여 모든 조립 작업은 방진실 내에서 실시되었고, 이러한 조건들이 충분히 유지 및 관리될 수 있도록 작업자 및 출입자에게는 방진복을 착용토록 하였으며, 방진실 출입시에는 외부로 부터의 이물질이 혼입되지 않도록 출입구에는 에어샤워(Air-Shower) 장치를 가동하여 이물질 관리가 가능하도록 하였다.

#### c) 공정별 품질 관리 기준 강화

기존의 345kV 변압기보다 더욱 더 엄격하고, 철저한 품질관리 기준치를 설정하여 각 공정마다 적용하였으며, 공정 간 이동시에는 품질관리 기준치를 만족하는가를 충분히 검토한 후 다음 공정으로 진행시킴으로써 고전압에 대한 절연 신뢰성을 확보 및 유지되도록 하였다.

## 6. 개발에 따른 효과

765kV 전압으로 송전 시 필요한 전력용 변압기를 국산화시킴으로써 수입 대체 효과를 이룩할 수 있을 뿐만 아니라, 기술력에 있어서도 외국업체에 비해 경쟁력을 확보할 수 있게 되었으며, 수요가인

한전과 더욱 유기적이고 효율적인 협조체제를 구축하여 성공적인 765kV 송전사업을 추진할 수 있게 되었다.

또한, 765kV 계통은 일본에서 운전 예정 중에 있는 1,100kV 계통을 제외하고는 전세계적으로 가장 높은 전압이므로 금번 765kV를 성공적으로 개발하여함으로써 해외시장의 어떠한 전압 계급의 변압기도 수출 가능한 기반을 확보할 수 있게 되었으며, 개발 시 적용되었던 핵심 기술로써 설계에 적용된 첨단 분석 기법 및 제작시 적용하였던 청결유지, 공차관리 및 품질 요구수준을 하위급인 기존의 제품에도 공히 적용함으로써 보다 나은 품질의 증전기기를 생산할 수 있게 되었고, 아울러 관련 모든 분야에서의 기술상승 및 신뢰성을 한층 제고시키는 데 밑거름이 되었다고 할 수 있다.

## 7. 향후 전망

우리나라의 변압기 기술개발은 송전전압의 증가와 더불어 추진되어왔고 그 용량 역시 발전기의 단위용량의 증가와 더불어 증대 되어왔다. 향후 변압기의 발전방향은 765kV급 변압기의 상용화에 따른 변압기의 이상징후 및 이상원인과 이상위치판단 등의 예방진단 기술과 애폭시 몰드변압기의 대용량화 및 SF6 가스 및 불연변압기의 개발을 들을 수가 있으며 저손실 변압기로는 아몰퍼스 코어의 생산기술과 경제성 개선이 예상되어 아몰퍼스 변압기의 생산기술 및 대용량화와 초전도 변압기의 개발도 기대할 수 있다. 기술적인 측면으로는 지금까지와 같이 기술도입에 의한 기술소화수준을 벗어나 전계, 자계, 유동대전, 열, 서지 등의 분포를 해석하는 기초설계기술과 대용량화에 따른 운



반, 설치 등을 고려한 구조설계기술 등이 개발되어 경쟁력 확보를 위한 기초설계기술의 자립 등이 기대된다.

## 8. 결 론

세계적인 개방화의 흐름은 국내시장의 개방화와 공업선진국들의 기술보호주의 정책으로 이어져 국내업체들에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상되며, 중전사업부문에서도 첨단기술을 사용한 대용량

화, 고성능화, 고신뢰성화 되는 시점에서 본 765kV 전압으로 송전 시 필요한 전력용 변압기를 국산화시킴으로써 수입 대체 효과를 이룩할 수 있을 뿐만 아니라, 기술력에 있어서도 외국업체에 비해 경쟁력을 확보할 수 있게 되었다. 따라서 중전업체도 이제는 세계적인 경쟁우위를 확보하기 위해 적극적, 공격적 전략으로 위상과 경쟁력을 높여 나가야 할 때이며 모든 전략은 대·중소기업간의 협력은 물론 산·학·연이 상호 협력할 때 가능해질 것으로 본다.

