

초고압 변압기의 현황과 전망

노철용

(효성중공업 중전기사업부 이사)

1. 서론

1879년에 에디슨에 의해 전등이 발명된 이래 전기 에너지는 일상생활에 필요한 주요 에너지원으로 자리잡게 되었고, 이로 인해 전력수요는 급속도로 증가하게 되었다. 대량의 전력수송을 위하여 변압기의 설계 및 제작기술도 괄목할 만한 발전을 이루어 왔다. 변압기의 개발 역사를 고찰해 보면, 1886년도에 미국의 Great Barrington이 최초의 교류를 이용한 전등을 밝힌 것이 계기가 되었다.

당시 사용된 변압기는 100V/500V의 Step-up 변압기로 W. Stanley에 의해 발명되었으며 이를 최초의 상업용 변압기라 할 수 있다.

이후 1890년도에 스웨덴의 ASEA사에서 최초의 3상 변압기가 개발되었으며, 1950년도 서독 M & C와 Traft-Union사에 의해 Mold변압기가 개발되었고, 1956년 미국 GE사에서 SF₆가스 절연 변압기를 개발하였다.

1980년도에는 미국의 Allied사에서 최초의 Amorphous 변압기를 개발하였다. 변압기의 발전 추세는 개발 역사를 통해서도 나타나듯이 초고압 대용량화와 함께 신뢰성 향상, Compact화, 저손실화로 집약되고 있다.

변압기의 발전은 송전계통의 변화추이와 밀접한 관계를 갖으므로, 본 논문에서는 송전계통 전압의 변화추이, 국내 변압기의 개발 역사, 변압기 정격전압 및 용량 현황, 변압기의 기술동향, 2000년대를

대비한 변압기 기술 연구과제에 대해 서술하기로 하겠다.

2. 송전계통전압의 변화 추이

국내의 송전계통은 1960년 이후 장기간 154KV 전압이 송전의 주요간선을 이루어 왔으며, 1976년에 여수-옥천간 송전을 최초로 345KV 최고압송전이 도입되어 현재에 이르고 있다. 그후 전력계통의 안정도 향상 장거리 대용량 송전 및 전력에너지의 효율적 이용을 위하여 송전전압의 승압계획이 검토되고 있으며 이에 따라 EHV(Extra High Voltage), UHV(Ultra High Voltage)급의 송변전기기 등의 설

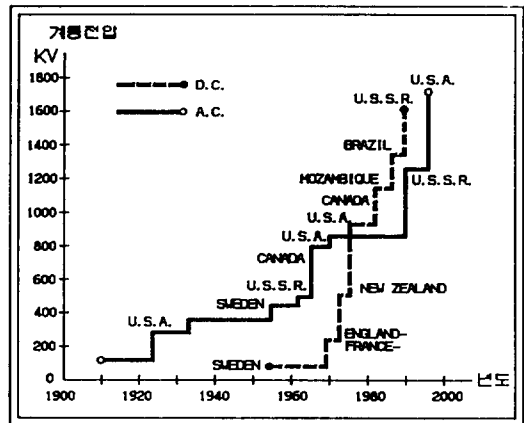


그림 1. 각국의 교류 및 직류 송전전압 추이

비특성 검토도 요구되고 있다. 일반적으로 EHV급은 교류 765KV, 직류 ±250KV까지를, UHV급은 교류 1,000KV이상, 직류 ±500KV이상을 말한다.

그림 1은 각국의 교류 및 직류 송전전압의 추이를 보여주고 있다.

교류 송전계통은 420KV급 초고압송전이 1952년 Sweden에서 최초 도입되었고, 현재 캐나다에서 735KV, 미국에서 765KV, 소련에서 극히 일부 1,200KV급이 운용되고 있다.

직류 송전계통에서는 100KV급 송전이 1954년 Sweden에 최초 도입된 이래, 1970년 미국에 ±400KV가 도입되었다. UHV급으로는 1,100KV급 이상의 교류 송전이 미국, 일본, 소련 등의 선진국에서 계획중이며, ±500KV 이상의 직류송전이 미국, 일본, 브라질에서 계획 추진중에 있다.

우리나라 송전계통의 변화는 1923년에 강원도에서 서울간의 66KV 송전을 필두로 하여 1935년 장진 평양간 154KV 송전, 1941년 청진-남포간 220KV 송전을 거쳐 1976년 여수-옥천간의 345KV 송전을 실시하였으며 현재 345KV 송전선이 우리나라의 주요간선을 이루고 있으며, 향후 765KV로의 승압을 검토중에 있다.

3. 국내변압기의 개발 역사

우리나라의 변압기제작 시기는 외국에 비해 50년

표 1. 우리나라 변압기의 개발 역사

| 년 도 | 개 발 현 황 |
|-------|---|
| 1933년 | ○東京芝浦電氣에서 고압이하 변압기 생산 |
| 1959년 | ○22KV TR. 개발 |
| 1963년 | ○66KV TR. 개발 |
| 1969년 | ○154KV, 30/40MVA변압기 개발 |
| 1977년 | ○1φ, 345/√3KV, 500/3MVA변압기 개발 |
| 1982년 | ○원자력발전소용 주변압기 개발(3φ 345KV 1,200MVA/3) |
| 1986년 | ○ Amorphous 변압기 개발 (1φ 20KVA 22,900/230-460V) |
| 1990년 | ○SF ₆ 가스 절연 변압기 개발(1φ 1,000KVA 23/6.9KV) |

정도 뒤진 1933년도에 일본의 자본에 의해 이루어졌다. 이후 22KV, 66KV, 154KV, 345KV를 개발하였으며, 현재 높은 신뢰성을 요구하는 원자력 발전소용 변압기도 개발되어 운전중에 있다.

또한 손실저감, 콤팩트화, 신뢰성 향상 등의 추세에 발맞추어 Amorphous변압기, SF₆가스 절연 변압기 등도 개발 완료되어 있는 실정이다.

표 1에 우리나라 변압기의 개발 역사를 나타내었다.

4. 변압기 정격전압 및 용량 현황

EHV 변압기는 400,500,765KV급이 1960년대 중반

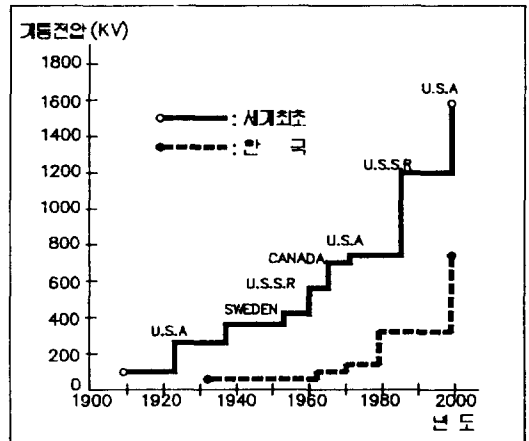


그림 2. 국가별 변압기의 전압 증가 추이

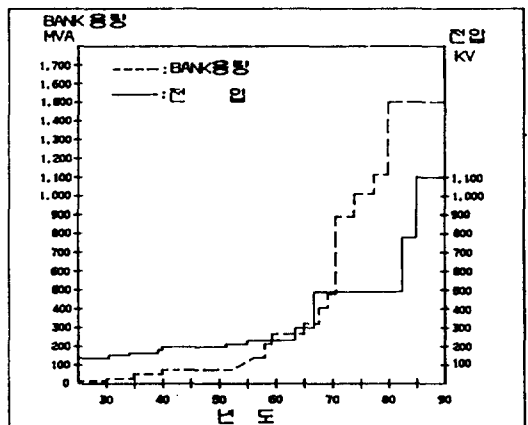


그림 3. 변압기의 계통전압과 Bank당 용량 추이

표 2. 제외국 EHV 변압기의 정격·사양 비교

| 국 명 | 전 압 Class별 정 격 | | | | |
|-------|-------------------------------------|--|--|---|--------------------|
| | 345KV 급 | 500KV 급 | 765KV 급 | 1,000KV 급 | 1,500KV 급 |
| 미 국 | 3 ϕ 60Hz 345KV 500MVA | 1 ϕ 60Hz 525/ $\sqrt{3}$ KV 1200/3MVA | 1 ϕ 60Hz 765/ $\sqrt{3}$ KV 1500/3MVA | 3 ϕ 1100KV | 1 ϕ 1600KV |
| 일 본 | | 1 ϕ 50Hz 525/ $\sqrt{3}$ KV 1000/3MVA | | 1 ϕ 1050/ $\sqrt{3}$ KV 3000/3MVA | |
| 독 일 | 1 ϕ 380/ $\sqrt{3}$ KV | | | 1 ϕ 50Hz 1150/ $\sqrt{3}$ KV 2000/3MVA | |
| 캐 나 다 | 3 ϕ 315KV 560MVA | | 1 ϕ 735/ $\sqrt{3}$ KV 1100/3MVA | | |
| 이탈리아 | 1 ϕ 50Hz 380/ $\sqrt{3}$ KV | | | 1 ϕ 50Hz 1000/ $\sqrt{3}$ KV 6000/3MVA | |

주) 계통에 기설치 혹은 설치 계획중인 전압을 선정

에 이미 실용화 되어 상업운전 중에 있으며, 1,000KV 급 이상은 선진국에서 계획중인 상태로 Prototype TR. 제작 정도의 단계에 있다. 국가별 변압기의 전압증가 추이를 그림 2에 나타내었으며, 표 2에는 제외국 EHV 변압기의 정격과 사양을 비교하였다.

그림 3.에서 알 수 있듯이 70년대 이후 변압기의 Bank당 용량은 급속도로 증가하고 있다.

용량의 증가는 변압기의 치수 증가요인이 되며 이로 인한 여러가지 문제를 발생시킨다. 1,000KV급 이상의 변압기에 있어서는 중량(200Ton 이상) 및 운송 등의 문제점으로 인하여 1상 2분할 혹은 1상 3분할 등의 구조를 채택하고 있는 경향이며, 제작분야에 있어서는 미국, 일본, 스웨덴이 상당한 진전을 보이고 있다.

5. 변압기의 기술 동향

변압기 관련 기술의 방향은 다섯가지로 축약할 수 있다.

첫째로 전압과 용량의 증대를 들 수 있는데 미국,

일본, 이태리, 소련에서는 1,000~1,200KV 전압계통을 계획중에 있으며, 특히 미국에서는 1,500KV~1,600KV 범위의 송전전압까지도 고려하고 있다.

둘째로 손실저감 기술을 들 수 있다. 에너지 파동 이후 연료가격의 상승이 전력에너지의 가격상승을 초래하여, 80년대 이후에는 Loss-Evaluation 등 손실저감 압력이 가중되고 있으므로, 무부하손, 부하손, 보조기손 등의 손실을 줄이기 위한 노력이 계속되고 있다.

셋째로는 콤팩트화 기술로서 소재개발 및 절연구조, 권선배열, 철심구조, 탱크구조의 개선을 통하여 치수축소에 주력하고 있다.

네째로 환경과의 조화이다. 산업의 발달로 인해 공해문제에 대한 관심이 높아지고 있으며, 변압기에서도 소음저감, 내진설계, 무공해 재료, GIS화, 유지보수의 용이성 등이 주요문제로 떠오르고 있다.

다섯째로는 신뢰성 향상을 들 수 있다. 변압기 사고는 그 파급효과가 매우 크기 때문에 예방진단기술의 확립, 단락용량의 증대, 해석기술 확립 등이 중요하다.

5.1 초고압 대용량화 기술

현재 상업적으로 운전되고 있는 변압기의 최고전압은 765KV급으로 Bank당 용량은 1,000~1,500 MVA에 이르고 있으나, 미국, 일본, 이탈리아, 소련 등에서는 1,000~1,600KV의 전압과 1,500~3,000MVA용량의 변압기 개발을 추진중이며, 2,000년대에는 실용화 단계에 진입할 것으로 예상된다.

5.2 손실저감

1970년대와 80년대 초에 걸친 에너지가격의 급등 이후 세계각국에서는 변압기의 효율향상에 지대한 관심을 갖고 있어, 손실평가제(Loss Evaluation)를 도입하여 효율이 높은 변압기의 개발을 유도하고 있다.

변압기의 손실을 줄이는 방법으로는 Fringing Leakage Flux Path해석을 통한 절연구조의 변경.

표 3. 해외 각국의 초고압 변압기 개발품 현황

| 제작사 (국명) | 연도 | 전 압 (KV) | 용량 (MVA) | 비 고 |
|--------------------------------------|------|--|----------|---------------|
| Alsthom(프랑스) | 1966 | $\frac{1,505}{\sqrt{3}}/21$ | 5 | Edf 시험선 |
| Westinghouse (미국) | 1970 | $\frac{1,150}{\sqrt{3}}/\frac{184}{\sqrt{3}}$ | 40 | Waltzml 시험선 |
| Westinghouse (미국) | 1977 | $\frac{1,250\sim 1,100}{\sqrt{3}}/\frac{2,415\sim 235}{\sqrt{3}}$ | 50 | BPA 시험선 |
| G. E(미국) | 1971 | $\frac{1,500}{\sqrt{3}}/143$ | 33 | Project UHV. |
| Trafo Union (서독) | 1972 | $\frac{1,200}{\sqrt{3}}/\frac{525}{\sqrt{3}}/30$ | 400 | Prototype |
| ASEA(스웨덴) | 1971 | $\frac{1,500}{\sqrt{3}}/\frac{765}{\sqrt{3}}/\frac{420}{\sqrt{3}}$ | 333 | Prototype |
| | 1976 | $\frac{1,785}{\sqrt{3}}/\frac{835}{\sqrt{3}}/\frac{420}{\sqrt{3}}$ | 210 | AEP 시험선 |
| All-Union Transformer Institute (소련) | 1972 | $\frac{1,150}{\sqrt{3}}/\frac{500}{\sqrt{3}}/15$ | 400 | Prototype |
| Ital Traft (이탈리아) | 1983 | $\frac{1,000}{\sqrt{3}}/\frac{400}{\sqrt{3}}/24$ | 200 | ENEL 시험선 |
| Fuji Denki (미국) | 1981 | $\frac{1,555}{\sqrt{3}}/25$ | 6 | UHV 송전 적성 시험장 |

Split Winding, Flat Ribon Cable Winding등의 권선 방법을 사용한 권선배열의 변경, 철심구조 및 접합 방법의 변경을 통한 자기회로의 개선, 고투자율구조 강판이나 아몰포스 코아 등 저두께 철심을 사용하여 자성재료의 효율을 높이는 방법 등이 있다.

변압기의 손실은 무부하손과 부하손으로 나누어진다. 각각의 저감기술을 표 4와 표 5에 나타냈다.

5.3 콤팩트화 기술

변압기의 대용량화로 인해 중량과 치수의 축소는 운송여건 등을 고려할 때 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 표 6에 콤팩트화 기술동향을 나타냈다.

5.4 환경과의 조화

5.4.1 소음저감

표 4. 무부하손(Hysteresis Loss, Eddy Current Loss) 저감기술

범례 : () 1.7T/60Hz 손실

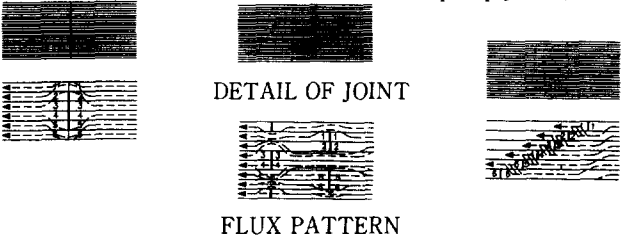
| 항목 | 기술 동향 | | 비고 |
|------|--|---|----------------------------------|
| | → 2000년대 | | |
| 철심재료 | ○G10-0.3 ^T (1.76W/kg) | | ○방향성규소강판 |
| | ○ZH(Trancor) -0.3 ^T (1.28W/kg) 0.27 ^T (1.25W/kg) 0.23 ^T (1.20W/kg) | | ○High Permeability Core |
| | ○ZDKH -0.3 ^T (1.22W/kg) 0.27 ^T (1.16W/kg) 0.23 ^T (1.03W/kg) | | ○Laser-Scribed Core |
| | ○Amorphous Metal-0.03 ^T (0.21W/kg) | | ○1.4T/60Hz (2605S ₂) |
| 접합방법 | <p>○Butt Joint (손실 100%)</p> <p>○Butt Lap Joint (92~94%)</p> <p>○Step Lap Joint (84~86%)</p>  | <p>* Joint 특성</p> <p>○Reluctance Unbalance</p> <p>○Saturation of Shunt Steel</p> <p>○Cross Fields</p> <p>○Rotation Flux</p> | |

표 5. 부하손 저감기술

| 항목 | 기술 동향 | | 비고 |
|--|--|--|------------------------------|
| | → 2000년대 | | |
| ○저항손 (I ² R) | ○최소전류밀도 ○최소턴수 ○최소 코일평균장 | ○Superconducting Winding | * Low Temperature Technology |
| ○와전류손 (Eddy Loss) ○순환전류손 (Circulation Current Loss) | ○Multi Conductor Wire ○Continuous Transposed Cable(CTC) | ○Transposed Ribbon Cable | |
| ○표류부하손 (Stray Loss) | ○Tongue Wedge Loss ○Tank Stray Loss ○End Frame Loss ○Pressure Ring Loss | ○Leakage Flux Control 규소강판, Al, Cu, Non-Magnetic Steel(Shielding) | |
| ○보조기기술 | ○Motor Fan Blade ○Oil Pump | VVVF(변압기 냉각제어 시스템) | |

표 6. 콤팩트화 기술의 동향

| 항 목 | 기 술 동 향 | | 비 고 |
|------------|---|--|-----|
| | → 2,000년대 | | |
| ○ 절연구조 최적화 | ○ 전계해석 기술 2D → 3D | | |
| ○ 절연물 | ○ Oil-Paper Insulation System → Gaseous Insulation System | | |
| ○ 성능개선 | - Nomex Paper(Cellulose Material) → PET | | |
| | - 성형품(Pulp-Mold Insulator) | | |
| | - 저유전율 P. B(Low Permittivity P. B) | | |
| ○ 권선배열 적정화 | ○ Split 권선 | | |
| ○ 철심 구조개선 | ○ Ribon Cable 권선 | | |
| ○ 탱크구조 | ○ 3상 3각 철심 → 3상 5각 철심 | | |
| | 3상 7각 철심 | | |
| | ○ 상분리형 구조 | | |
| | ○ CGPA | | |
| | (Coil Group Packed Assembly) | | |

변압기의 소음저감을 위해서 기존에는 자속밀도를 저감시키는 방법이나 콘크리트 방음벽을 설치하는 방법을 사용하여 왔으나, 최근에는 철판 방음벽을 사용하는 추세이며 일본에서는 고효율 차음판을 개발하여 사용하고 있다.

5.4.2 내진설계

변압기 본체는 탱크구조물 속에 내장되어 있는 상태에서 단락기력, 수송시의 외력(Impact Load)에 충분히 견딜 수 있는 강도로 설계되어 있으나 고유진동수가 높은 지진동에 대하여 공진할 가능성이 없고 지진상 견딜 수 있는 충분한 강도를 가져야 한다.

현재의 유입 변압기에서는 수평가속도 0.5G로서 정적(변압기본체)상태는 물론 동적(붓싱)해석을 하고 있으나 향후 더 진보된 지진해석기술에 의해 변압기 전체를 동적인 상태로 해석이 가능하게 될 것이다.

5.4.3 공해저감 및 화재예방

대도시에 전력수요가 집중화하여 도심부에 고전압·대용량 변전소의 필요성이 매우 높아지고 있다. 이러한 변전소에서는 주택지가 근처에 있어 불연화, 저소음화 등 환경 조화성과 소요용지의 취득난으로 해서 필요공간의 유효활용을 위해 지하변전소가 건

설되고 있다.

이러한 수요에 부응하여 종래의 유입변압기보다 화재예방 및 공해저감을 할수 있는 건식 및 가스절연 변압기 수요가 증가하고 있다.

현재는 옥내변전소, 지하철 등에서는 Mold변압기가 사용되고 있으나, 에폭시 자체의 절연내력 및 냉각문제로 인해 고전압·대용량이 가능한 가스절연변압기가 최근 등장하고 있다.

외국에서 제작하는 가스 절연변압기는 전체를 가스로 충전한 변압기와 가스와 냉매(액체)를 분리하거나 혼합한 3가지 타입이 생산되고 있고, 사용가스의 종류는 SF₆, C₂Cl₄ 등이 있고, 냉매로는 C₃F₈O, PFC, 절연유가 있다. 미국에서는 ABB(WECO)가 C₂Cl₄ 절연유의 가스가 냉매를 분리한 분리식 액냉각 변압기가 일부 제작되고 있으며, 고전압(275KV) 급은 신뢰성 시험중에 있다. 향후 고전압·대용량 가스변압기가 실용화 될 예정이다.

5.5 신뢰성 향상

변압기 신뢰성의 향상을 위해서는 해석기술과 예방진단 기술의 확립이 무엇보다도 중요하다. 컴퓨터의 처리속도가 급속도로 발전하고 있는 오늘날에는 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM)등을 이용하여 변압기 내부의 여러가지 문제를 해석할 뿐만 아니라

시물레이션도 가능하게 되었다.

변압기의 전계 및 자계, 단락기계력, 국부과열현상 해석 등을 통해 최적화 된 결과를 설계에 적용하고 있다. 또한 예방진단기술도 거의 확립단계에 이르고 있다. 유증가스분석, 부분방전 측정, 절연유 계면장력 측정 등을 통한 진단수준을 넘어 전체 변압기의 상태를 파악할 수 있는 TMS(Transformer Monitoring System)가 개발완료된 상태이다.

6. 2000년대의 변압기 기술 연구 과제

6.1 Gas 및 Gas-Vapor 절연시스템

기존변압기의 절연유는 가연성과 폭발성을 지니고 있으므로 이를 방지하기 위하여 불연성 절연물로 대체해야 한다.

가스절연 변압기의 절연시스템은 절연유와 달리 가스는 절연구조물의 형상과 압력에 따라 절연물의 절연내력이 달라진다.

따라서 현재에 사용되는 가스충진식, 가스와 냉매의 혼합식, 가스와 냉매분리식 등에 사용되는 가스는 SF₆, C₂Cl₄등과 냉매(액체)로서 C₆F₁₀O, PFC, 절연유가 사용되고 있다.

도체절연 재료는 폴리아미드 필름(노멕스지), 폴리피렌셀룰로이드(PPS), 폴리에틸렌테레페탈레이트(PET)필름과 부재로서 FRP수지, ABS수지 등을 사용한다. 좀 더 축소화를 위해 가스중에서 고절연내력을 갖는 절연재와 고냉각매체인 냉매를 포함한 복합적 절연시스템을 연구해야 한다.

6.2 자성재료

변압기의 철심으로 사용되는 규소강판도 꾸준한 개선을 통해 저손실화 되어가고 있지만, 비정질 Amorphous메탈의 경우 기존의 전기강판보다 1/5 정도로 무부하손을 줄일 수 있다. 그러나, Amorphous메탈은 대용량 변압기를 제작하기에는 두께가 너무 얇아, 대용량 적철심 변압기로 제작하기에는 문제점이 많이 있다. 그러므로 더 두껍고 폭이 넓게 제작하는 기술과 포화자속밀도를 증가시켜 철심의 크기를 축소 시키는 문제가 절실하다.

6.3 초전도 기술

전력용 변압기의 초전도체 권선에 대한 연구가 계속되고 있다.

현재로서는 수년내에는 완성기 어려운 기술이지만 변압기 기술에는 매우 중요한 문제가 될 것이다.

6.4 절연기술

변압기가 고전압·대용량화 함에 따라 Oil-Paper 절연시스템에 대해서도 현재는 저유전율 프레소브드, 고성능절연유 등을 사용하고 있으나, 향후의 절연재는 내 전압 특성은 물론 내열성, 기계적 특성이 향상된 절연물을 다양하게 연구해야 할 필요가 있다.

7. 결 론

변압기와 관련하여 전압과 용량의 추이와 기술동향에 대해 고찰해 보았다. 전력 수요증가와 함께 고전압 대용량 변압기의 필요성이 증가하고 있지만 전압이 높아질수록 필요한 기술의 수준은 고도화 되어야 하고, 사고시 과급효과가 크므로 신뢰성에 대한 요구가 커지고 있다.

또한 용량증가와 함께 변압기의 외형치수도 증가하지만 운송조건의 제약 등으로 인하여 치수증가에도 한계가 있다.

현재의 급격한 전력수요 증가에 대응하기 위해 한전도 765KV 송전 시스템을 적극 검토하여 계통에 적용할 준비를 가속화 해야 할 것이다.

향후의 전력용 변압기에 대한 사회적 요구는 양적인 확대보다는 신뢰성 향상, 저손실화, 콤팩트화 등의 질적인 향상으로 방향이 전환되고 있으며, 용도에 따라 절연방식이 다른 다양한 품목의 변압기 개발이 요구되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] “向後 大電力輸送을 爲한 長期系統 構成對策에 關한 研究” 中間報告書 附錄Ⅲ, 韓國電力公社 電源計

-
- 劃處, pp. 87~134, 1990.6
- [2] 電氣年鑑, 大韓電氣協會, 1990
- [3] "Recent Noise reduction Techniques for Power Transformers", 日立評論 Vol. 67, NO. 2, 1985
- [4] "Improvement of Seismic Performance of Industrial Substation", 日立評論 Vol. 67, NO. 2, 1985
- [5] "Present & Future Trends in the Development Design and Operation of Large Power Transformers and Shunt Reactor", CIGRE, 1982
- [6] "ASEA Transformer Story", ASEA Catalogue