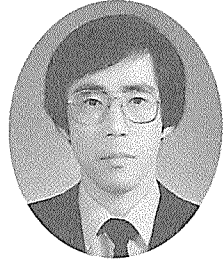


초전도 변압기의 개발동향



한국전기연구소 초전도응용 연구사업팀
오 봉 환 박사

1. 서 론

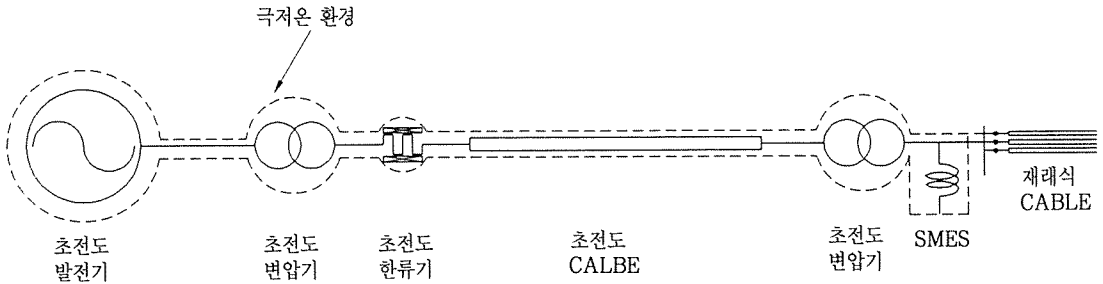
전기에너지는 동력, 조명, 통신 등 각 분야에 뛰어난 적합성을 갖고 있는 깨끗하고 안전한 에너지 형태이며, 또한 정보관련기기의 동작에 필요 불가결한 에너지원이다. 전기에너지의 수요는 산업의 발달과 더불어 급격히 증가하여 2010년경에는 현재의 약 3.3배에 이르리라 예상되고 있는 실정이며, 특히 과밀화한 대도시에서 현저하리라 생각된다. 이러한 대도시에 있어서의 전기에너지 공급에는 양적만이 아니고 품질성, 안정성과 공급의 신뢰성이 함께 요구된다.

전기에너지의 대부분이 대도시, 그 주변 위성도시 및 공업지대에서 소비되고 있는 반면에, 전원은 에너지자원의 장래, 입지조건 및 대도시의 환경 등을 고려해서, 대용량의 전원은 점점 수오지로부터 먼곳에 건설되고 있는 경향이다. 이러한 전원에 있어서의 발전용량은 수백만kW급에 달하고 있다. 따라서, 원격지에 있는 대용량의 전기에

너지를 장거리 송전선을 통해서 소비지까지 보내고 있다.

그러나 이러한 대전력을 장거리에 걸쳐서 송전함으로써, 계통안정도의 저하 및 번개 등에 의해서 탈락하는 문제가 발생할 우려가 있다. 이러한 문제점에 대한 해결책의 한 방법으로서, 초전도 기술을 전력전송시스템에 도입하는 초전도 기간송전시스템을 들 수 있다. 이것은 초전도발전기, 초전도변압기, 초전도한류기, 초전도케이블 및 초전도전력저장장치 등으로 구성된다. 이 시스템의 개념도를 그림 1에 표시한다. 이들의 초전도전력기기로 구성되는 초전도송전시스템은, 대전류화에 의한 대용량의 송전 가능, 자연과의 격리에 의한 사고요인의 배제, 저장기능에 의한 고안정화와 고품질화, 순시전압 강하의 저감 등의 이점이 있다.

초전도 현상이 발견된 이래 이상의 전력기기에 응용하고자 하는 연구가 활발히 행해졌으나, 직류에서는 저항이 영이되어 손실없이 대전류를 흘릴 수 있으나, 교류에서는 교류손실이 발생하여 응용에 한계가 있었다. 그러나, 1983년 프랑스에서 50/60Hz에서 사용해도 교류손실이 극히 적은 교



(그림 1) 초전도 송전시스템의 개념도

류용 초전도 선재를 개발한 이후, 초전도의 전력 기기에의 응용이 더욱 활발히 진행되고 있다.

그림 1에 표시한 초전도 전력기기 중에서 변압기는 초전도화가 비교적 쉬운 기기의 하나로 인식되고 있다. 그 이유는 변압기가 정지기기이고, 철심을 사용하기 때문에 권선에 걸리는 자계의 세기가 비교적 작다는 등의 이유에서이다. 본 고에서는 초전도 변압기의 개발의 및 개발동향, 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀에서 개발한 소형 초전도변압기의 시험결과 및 초전도 변압기의 실용화를 위한 개발 과제에 대해서 기술한다.

초전도 전력기기에는 액체헬륨 냉각의 금속계 초전도체가 사용되고 있으나, 1986년 액체질소 냉각의 산화물 고온초전도체를 발견한 이후, 이 초전도체를 이용한 전력기기의 개발도 생각하게 되었다. 그러나 현 시점에서는, 산화물 고온초전도체를 이용한 선재의 개발이 충분한 단계에 달해있지 않으므로 전력기기용 선재로서 사용하기에는 아직 미흡한 실정이다. 특히, 흘릴 수 있는 전류용량이 극히 작아서 전력용으로서 불충분하다. 이러한 점에 있어서, 금속계 초전도 선재는 충분한 전류용량을 갖고 있으며, 복합형 극세다심구조에 의해 교류에도 사용할 수 있는 기술이 확립되어 있다.

따라서, 이후는 액체헬륨 냉각의 금속계 초전도체를 전제로 해서 논한다.

2. 초전도변압기 개발의 장점

금속계 초전도선재의 복합형 극세다심구조에 의해, 교류용 초전도선재도 실용화의 영역에 도달해 있으며, 교류용 초전도전력기기의 개발이 행해지게 되었다. 전력기기 중에서도 변압기는 초전도화가 비교적 용이한 기기의 하나로 인식되었다. 그 이유는 변압기가 정지기인 것, 철심을 이용하기 때문에 권선에 인가되는 자계가 0.5T 정도로 비교적 낮은 것, 냉각체적이 비교적 작은 것 등에 의한 것이다.

초전도 변압기의 개발이점으로, 주로 손실저감에 의한 효율향상 및 소형·경량화를 들 수 있다. 종래 상전도변압기의 손실의 대부분은 동손이다. 이 동손은 초전도선을 이용함으로써 영에 가깝게 할 수 있어서 효율향상이 기대된다. 또한, 초전도선은 현재의 동선보다도 훨씬 큰 대전류를 흘릴 수 있으므로 기자력을 증가시켜 철심의 단면적을 작게 하므로써 소형·경량화를 도모할 수 있다.

초전도변압기 개발의 장점으로 다음과 같은 사항 등을 들 수 있다.

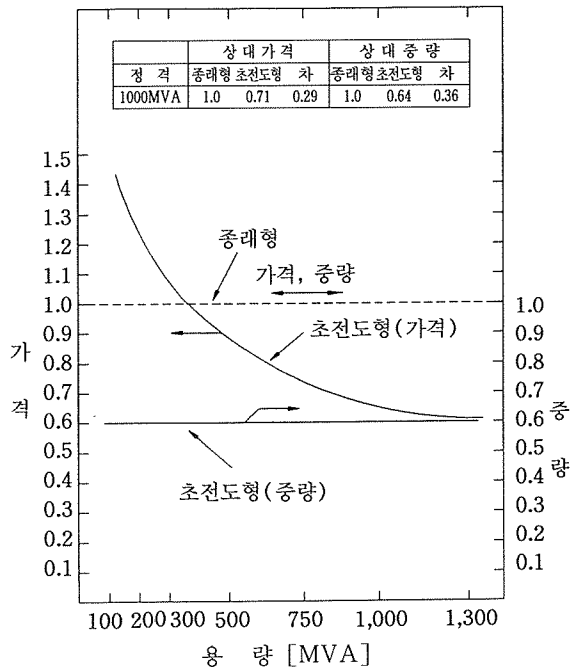
(1) 효율 : 초전도변압기의 효율은 철심을 이용하는가? 그리고 철심을 이용할 때 그것이 놓여있는 주위온도 및 냉동기의 효율 등에 의해 크게 좌우된다. 현재의 상전도변압기의 효율은 상당히 높아 소용량기인 수십kVA급의 97% 이상으로부터 수백MVA급의 대용량기에서는 약 99.5% 이상까지 달하고 있다. 이러한 변압기를 초전도화하므로써 얻을 수 있는 손실저감에 의한 효율향상은 0.15~2.0% 정도로 평가되고 있다. 손실저감에 대한 연구로서, 275kV~1000MVA기의 개념설계에서는 총 손실이 종래기의 35.8%로, 275kV~300MVA기의 개념설계에서 40.8%로 4kV~220KVA기의 시작품에서는 54.2% 등으로 용량이 클수록 손실이 줄어들음을 알 수 있다. 이들의 연구에서 철심은 상온공간에 놓여져 있는 것으로 되어 있다. 220kVA기 초전도변압기의 종래기와의 특성비교를 <표 1>에 표시한다.

<표 1> 220kVA 초전도변압기와 종래기와의 특성 비교

제 원	초전도기	상전도기
자 속 밀 도	1.8T	1.5T
철손(상온공간)	100W	694W
철 심 중 량	52.5kg	610kg
동 손	0.4W×500	1733W
전 류 리 드 손	2W×500	-
총 중 량	100kg	1000kg
총 손 실	1300W	2400W
효 율	99.4%	98.9%

(2) 소형·경량화 : 초전도변압기는 전류밀도가 큰 초전도선을 이용하기 때문에 절연을 포함한 권

선부의 전류밀도는 종래기의 10~20배로 할 수 있다. 이 때문에 권선 단면적이 작게 되고, 또한 암페어턴이 크게 되므로 철심의 단면적도 작게 할 수 있어서 소형화가 가능하다. 1981년 미국의 Westinghouse사의 1000MVA기의 개념설계에 의하면, 종래기의 중량을 100으로 하였을 경우 초전도기는 전용량에 걸쳐서 64로 36%나 가벼워진다. 이 개념설계에서 중량을 종래기와 비교한 결과를 그림 2에 표시한다. 또한, <표 1>에 표시한 연구에서는 철심자체만으로도 1/10 이하, 총 중량에서 1/10로 되는 것을 알 수 있다. 일본 구주대학의 72kVA기의 시작품에서는 냉각용기를 제외한 철심중량이 1/7로 되어 있다.



(그림 2) 1000MVA 초전도변압기의 종래기와의 비교

(3) 경제적인 측면 : 경제적인 측면에서 본 경우, 초전도변압기는 값비싼 초전도재료, 저온용기 및 냉동기 등을 필요로 하므로 초전도변압기 자신의 가격을 종래형보다 낮추는 것은 바라기 힘들 것으로 사료된다. 그러나 앞에서 살펴본 바와 같이 손실을 대폭 줄일 수 있으므로, 그것에 따르는 전원 설비비, 연료비 및 운전비 등을 낮출 수 있는 가능성이 있다. Westinghouse사의 1000MVA기의 개념설계에서 손실에 의한 비용 및 운전비용 등을 포함한 전체비용에 대해서 초전도기와 종래기를 비교하였다. 이 결과를 <표 2> 및 그림 2에 표시한다.

<표 2> 1000MVA기의 초전도기와 종래기와의 비용 비교

	초전도기	상전도기
일 반 재 료	3.0	5.7
초 전 도 재 료	4.1	-
냉 각 장 치	14.7	-
손 실 환 산	48.4	94.8
전 비 용	70.2	100.0

이들에 의하면 전체비용에 있어서 종래기의 비용을 100으로 하였을 경우 초전도기는 70.2로 작아지며, 손실만에 의한 비용은 초전도기가 종래기의 51%로 되는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 2로부터 300MVA 이상의 변압기라면 경제적으로 초전도기가 유리하다는 것을 알 수 있다. 더욱이, 도시의 지하변전소용 변압기로서 사용하는 경우 소형·경량화할 수 있는 초전도변압기는 변압기만이 차지하는 면적, 즉 건설비를 대폭 삭감할 수 있다. 특히, 냉동기의 기술개발에 의해 대용량의 소형·고효율의 냉동기가 개발되면 초전도변압기와 초전

도케이블, 초전도변압기와 초전도한류기를 접속하는 부분에 냉동기를 설치하여, 2대의 초전도기기를 1대의 냉동기로 충당하게 되면 설치면적을 효과적으로 이용할 수 있으리라 사료된다.

(4) 초전도송전시스템의 한 요소 : 그림 1에 표시한 가까운 장래에 도래하리라 예상되는 초전도기간송전시스템의 한 요소로서 볼 경우에는 별도의 효과를 기대할 수 있다. 즉, 초전도발전기, 초전도케이블, 초전도한류기 및 이외의 초전도기기로 구성되어 일괄해서 초전도 환경하에 있는 시스템을 구성하게 되면, ① 외부로부터의 열침입을 작게 할 수 있고, ② Lighting Surge, 개폐 Surge 등을 상당히 작게 억제해서 절연강도를 저감할 수 있고, ③ 자연계로부터의 위협에 보호할 수 있고, ④ 초전도케이블의 대용량화에 대응할 수 있는 것 등의 이점이 있다.

3. 초전도변압기의 기본구조

초전도변압기라 하여도 변압기의 기본구조는 종래기와 다름이 없다. 초전도선은 큰 전류를 흘릴 수 있으므로 철심을 이용하지 않는 공심형으로 하여, 철손마저도 영으로 하는 연구도 행해지고 있다. 그러나 이 경우 여자전류가 정격전류에 가깝고 과대하게 되어 분로리액턴스의 대응효과를 고려하였을 때 처음으로 존재 가치가 있는 것으로 평가되고 있다. 더욱이, 공심형에 대한 Harrowell의 개념설계에 의하면 600MVA급의 초전도변압기에서 직경이 100~200m로 된다. 이러한 크기는 비현실적이며, 대형이므로 초전도선재의 사용량도 많아 가격이 비싸지므로 불리하다. 또한, 일본의 300V/150V-2.5kVA의 시작품에서는 무부

하 여자전류가 정격전류의 약 45%에 달하고, 누설리액턴스가 증가해서 28%에 이르고 있다. 이러한 큰 무부하전류에 의한 교류손실이 문제로 대두된다. 즉 이 교류손실을 냉동기를 이용하여 제거할 경우, 냉동기의 효율을 고려하면 무시할 수 없는 양이 될 것이다. 그러므로 공심형변압기의 실현에는 여자전류에 의한 권선의 교류손실이 종래기의 철손보다도 작아야 한다. 따라서 현재로서는 초전도변압기의 구조는 철심을 이용하는 형태가 적절하리라 생각된다.

종래형 변압기는 절연유를 채운 탱크 내에 권선 및 철심으로 이루어지는 변압기 본체를 넣는다. 초전도변압기의 경우에는, 이와 같은 구조로 하면 철손에 의한 열을 액체헬륨으로 제거하게 되어 비경제적으로 된다. 이것에 대해서는 철심을 상온공간에 놓고, 권선만을 저온용기(Cryostat)에 넣어 냉각하는 구조도 연구되고 있다. 그러나 이 경우에는 철심이 저온용기를 크게 둘러싸기 때문에 철심의 용적이 크게 되므로, 종래의 유입변압기와 동일한 형태로 하는 경우도 있고, 아직 최적의 형

태가 정해져 있지 않은 실정이다.

4. 초전도변압기의 개발동향

초전도변압기에 대한 연구는 1961년 미국의 R. Mcfee가 120MVA 초전도변압기의 개념설계를 한 이래, 1970년대에 걸쳐서 연구개발이 활발히 행해졌다. 그 결과, 종래 변압기와 비교해서 신뢰도, 효율, 경제성은 물론 크기, 중량적으로도 초전도화에 의해서 얻어지는 장점이 없는 것으로 결론지어졌다. 그러나 1981년 미국의 Westinghouse사에서 1000MVA용량의 초전도변압기의 개념설계를 통해서 그 당시의 통설을 깨고 초전도변압기의 우위성을 밝혔다. 이와 더불어 1983년 프랑스의 Alsthom사에서 50/60Hz 교류에서 사용해도 손실이 극히 적은 교류용 극세다심 초전도선을 개발한 이후, 세계 각국에서 초전도변압기에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 1980년대 이후의 초전도변압기의 주요한 개발·검토 예를 <표 3>에 표시한다.

<표 3> 1980년대 이후의 초전도변압기 개발·검토 예

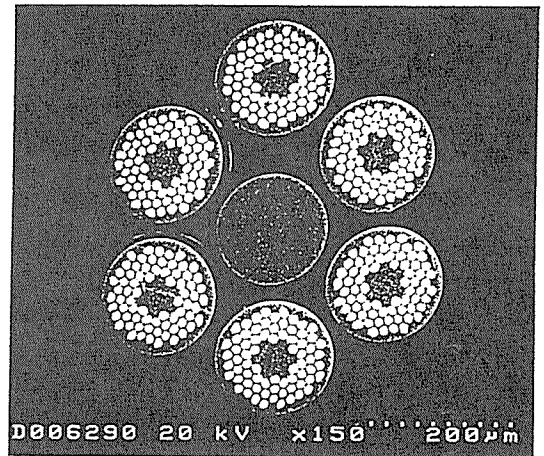
연도	연구기관	개요	비고
1981	Westinghouse사 (미국)	발전기용 60Hz, 22/500kV 1000MVA 개념설계	상전도기와와의 비교 경제성 : 종래기의 70.2% 중량 : 종래기의 64%
1985	Alsthom사 (프랑스)	단상 50Hz, 600/4000V 220kVA 제작	철심 : 상온공간 효율 99.4%, 손실 1300W
1987	九州대학 (일본)	단상 60Hz, 1057/218V 72kVA 제작 4권선구조(주권선과 보조권선)	철심 : 액체헬륨냉각 주권선철크후 초전도복귀하지 않음 철심중량 : 종래기의 1/7, 효율 : 99.1%
1988	東芝(일본)	단상 50Hz, 100/100V 50kVA 제작	철심 : 액체헬륨냉각, 효율 : 99.4%

연도	연구기관	개요	비고
1990	名古屋대학 高岳製作所 (일본)	단상 50Hz, 6600/210V 100kVA 제작 대전류·고압권선: 초전도선 소전류·저압권선: 극저온저저항 동권선	철심: 상온공간 누설리액턴스 38.6% 전손실: 종래기의 2/3
1991	九州대학 東芝 昭和전선 (일본)	단상 60Hz, 3300/220V 1000kVA 제작 저압측권선에 6×6×6의 3중연선	철심: 상온공간 577kVA 출력달성
1992	名古屋대학 愛知전기 昭和전선 (일본)	단상 60Hz, 6000/3000V 1500kVA 제작	초전도송전시스템을 구성하여 정격용량의 20% 송전달성 철심: 액체헬륨냉각
1992	서울대학교	단상 60Hz, 220/110V 5kVA 제작	철심: 액체헬륨냉각 초전도전류제한기를 부착하여 FEM으로 단락특성해석

5. 소형 초전도변압기의 제작 및 시험

5.1 권선용 초전도선재

고압측 및 저압측 권선에 이용하는 초전도선재는 일본 RUKAWA사에서 제작한 교류용 극세다심선재로서, 교류손실을 줄이기 위해 필라멘트 직경이 $1\mu\text{m}$ 이하로 되어 있다. 또한, 케이블은 NbTi 극세다심 초전도소선(Strand) 6가닥을 중심에 위치하는 SUS(Stainless Steel)선의 주위에 동축상으로 Twist한 형태로 되어 있다. 이 SUS 선은 권선시의 장력에 견딜 수 있도록 하기 위하여, 중심선에도 초전도소선을 배치하는 것에 의한 교류전류열화현상을 방지하기 위한 것이다. 교류용 초전도선재의 단면사진을 그림 3에, 사양을 <표 4>에 표시한다.



(그림 3) 초전도선재의 단면

〈표 4〉 초전도선재의 사양

Strand	
Diameter	0.16 mm(Insulated)
Filament Diameter	0.52 μm
NbTi/Cu/CuNi	1/0.3/2.0
Twist Pitch	1.9 mm
Insulation (Polyester Vanish)	0.02 mm
Cable	NbTi Strand \times 6 + SUS Strand \times 1
Type	0.61 mm(Insulated)
Diameter	Polyester Braid
Insulation	at 4.2K, $10^{-11}\Omega\text{cm}$ 0.5T 191A
Critical current	1.0T 119A
	1.5T 86A
	2.0T 68A

5.2 초전도변압기의 정격, 구조 및 이론적 특성

초전도변압기의 기초특성을 파악하기 위하여 변압기의 정격은 전원의 용량에 제한을 받지 않기 위한 소용량으로, 주파수 60[Hz], 용량 2.5 [kVA], 전압 100/50[V], 전류 25/50[A]로 권선비(전압비)를 2:1로 하였다. 철심은 단면이 직사각형인 Cut-Core로 단면적은 17[cm²]이다. 이 철심의 자속밀도는 1[T]로 하였다. 따라서 고압측 및 저압측의 권선수는 각각 220 및 110 [Turn]이 되나, 권선시에는 권선들에 약간의 여유가 생겨 각각 4[Turn]씩 더 감았다.

제작한 초전도변압기는 철심의 한 각(Leg)에 고압측 및 저압측 권선을 동축상으로 감는 솔레노이드형으로 철심 및 권선을 동시에 액체헬륨 속에 넣어 냉각시키는 간단한 구조이다. 고압측과 저압측의 권선비가 2:1이므로, 철심의 창높이를 고려하여 고압측은 2층, 저압측은 1층으로 하였다. 저압측에는 고압측에 비해 2배의 전류가 흐르므로 저압권선의 냉각효과를 높이기 위해서, 고압측 권선을 안쪽에, 저압측 권선을 바깥쪽에 배치하였다. 층간의 간격은 권선의 냉각효과, 정격전압 및 액체헬륨의 절연과외강도 등에 의해 정해지지만, 본 제작에 있어서는 정격전압이 작으므로 냉각효과만을 고려하여 각각의 층간에 FRP Spacer를 설치

하였다. 권선시 초전도선재에 가한 장력은 2kgf이다. 이상과 같은 정격 및 구조에 있어서 사용된 초전도선재는 고압측이 59[m], 저압측이 35[m]이다.

제작한 초전도변압기의 누설리액턴스, 전압변동률 및 철손을 이론식에 의해 계산하였다. 그 결과, 고압측으로 환산한 총 누설리액턴스는 0.502[Ω]으로 12.55[%], 전압변동률은 역율 1일 때 0.75%, 역율 0.8일 때 7.83%이며, 철손은 4.3W이다.

5.3 초전도변압기의 기초특성

5.3.1 권선저항

초전도변압기의 고압 및 저압측 권선의 저항을 상온(약 18°C=291K), 액체질소 온도(77K), 액체헬륨 온도(4.2K)에서 각각 측정하였다. 저항측정 방법으로는 각 권선에 1A 이하의 직류전류를 흘려, 그 때의 단자간 전압강하를 이용하였다. 각 온도영역에서의 권선의 저항값을 <표 5>에 표시한다.

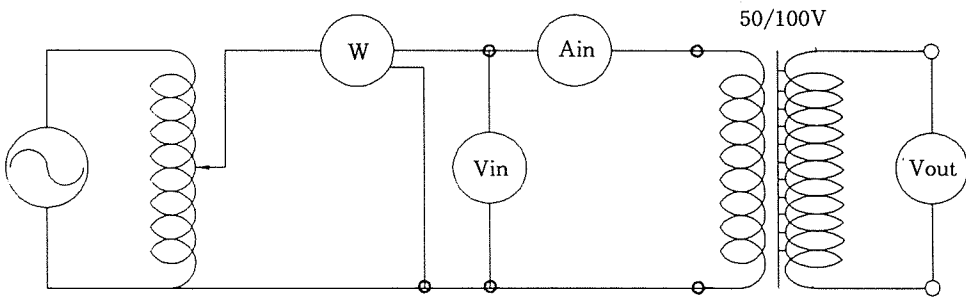
<표 5> 각 온도에 있어서의 권선저항

온도 [K]	저항 [Ω]	
	고압권선	저압권선
상온 291[K]	63	36
액체질소 77[K]	15	8.5
액체헬륨 4.2[K]	0	0

5.3.2 무부하시험

그림 4에 무부하시험 회로를 표시한다. 그림에 있어서 W: 전력계, A_{in}: 전류계, V_{in}: 입력전압, V_{out}: 출력전압계이다. 고압측을 개방한 상태에서 저압측에 전압을 60V까지 10V 간격으로 인가하여, 인가전압(V_{in}) 대 무부하전류(A_{in}) 대 저압(V_{in}) 대 고압(V_{out}) 및 전력(W)을 측정하였다. 이것에 의해 여자전류, 전압비(권선비) 및 철손을 구하였다.

무부하시험 결과를 그림 5~그림 7에 표시한다. 그림 5는, 상온(○), 액체질소(□) 및 액체헬륨



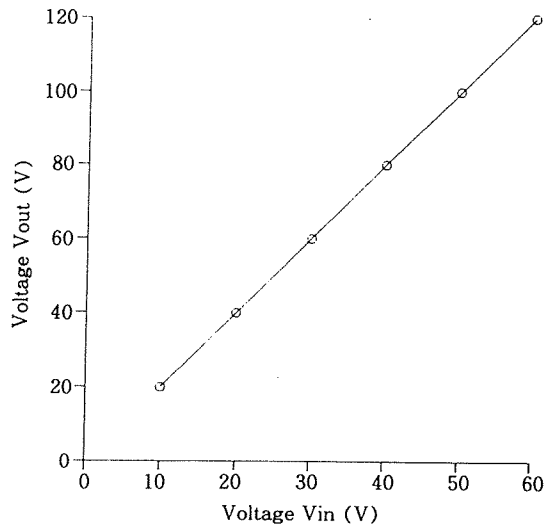
(그림 4) 무부하시험 회로도

(△)의 각 온도에서 실험한 저압측 인가전압(V_{in})에 대한 저압측전류(여자전류: A_{in})의 값이다. 이 그림으로부터 철심이 놓여있는 주위의 온도가 낮

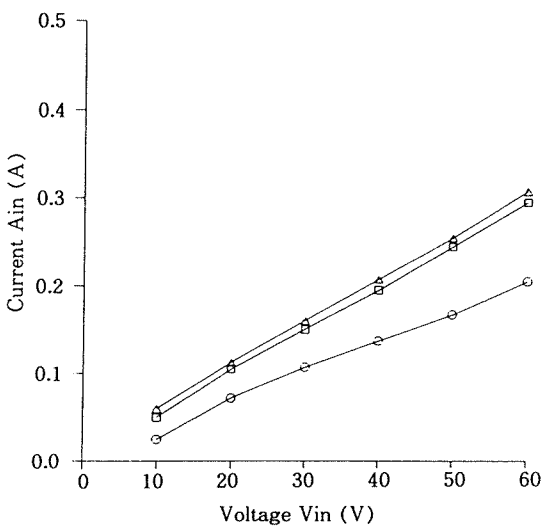
을수록, 즉 철심이 냉각될수록, 동일전압에서 큰 여자전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 이것은 철심의 온도가 낮을수록 저항이 작아지기 때문이다.

또한 이것으로부터 상온 및 액체헬륨 온도에서의 철손보다도 액체헬륨에서의 철손이 증가하리라는 것을 추측할 수 있다. 이 철심의 냉각에 의한 철손의 증가를 방지하기 위해서 권선부만을 액체헬륨으로 냉각하고, 철심은 상온공간에 두어 냉각하지 않는 형태의 초전도변압기도 연구되고 있다. 그러나 이 형태의 변압기는 냉각장치의 구조가 복잡해지는 단점이 있다. 그림 6은 저압측 인가전압(V_{in})과 고압측 출력전압(V_{out})과의 관계이다. 이 관계로부터 설계한 권선비 고압:저압=2:1의 관계에 의해 전압이 출력되고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 저압측 인가전압(V_{in})에 대한 무부하손실(W)의 값이다. 그림 5로부터 온도가 낮을수록 여자전류가 많이 흐르므로 손실이 많아지리라 생각할 수 있다. 측정결과에 있어서도 전반적으로 같은 경향을 표시하고 있음을 알 수 있다. 그러나 60V에서는 액체헬륨에서의 손실이 액체헬륨보다도 크게 나타났다. 이것은 측정시에 있어서 전력계의 교체로 인한 오차가 원인으로 생각된다. 정

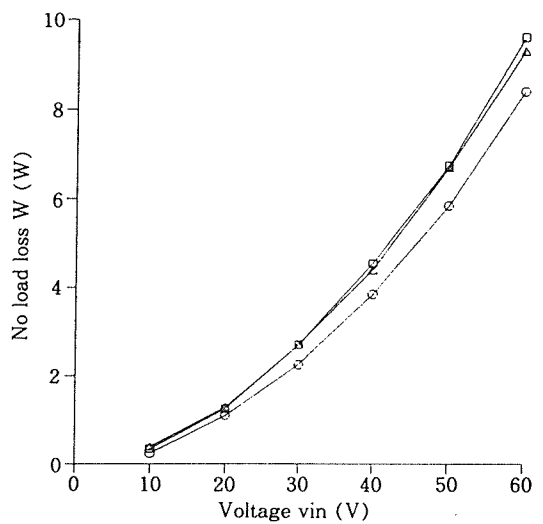
격전압 50V일 때의 무부하손실은 6.7W로 이론치 4.3W보다 2.4W 크다. 이것은 전류도입선에 의한 손실 및 철심의 냉각에 의한 와전류손실 등이 증가했기 때문인 것으로 생각된다.



(그림 6) 저압측 인가전압 대 고압측 출력전압



(그림 5) 저압측 인가전압 대 여자전류

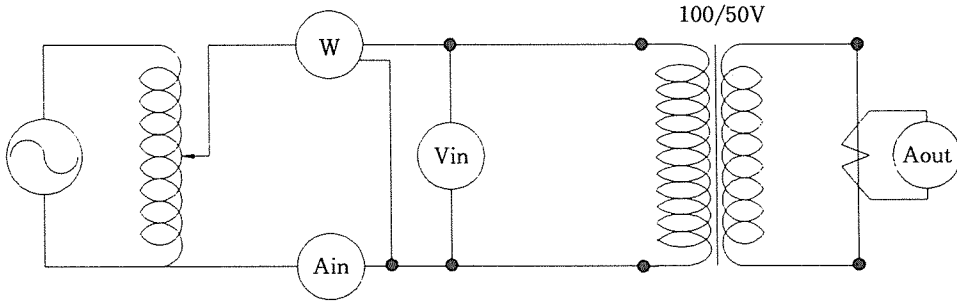


(그림 7) 저압측 인가전압 대 무부하 손실

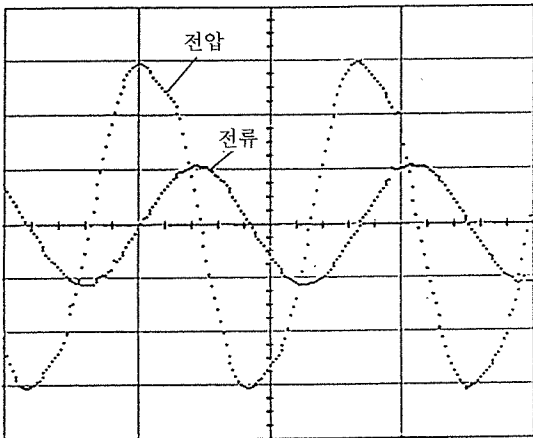
5.3.3 단락시험

그림 8에 단락시험 회로도를 표시한다. 단락시험에 있어서는, 저압측을 단락한 상태에서 고압측 단자에 유도전압조정기를 이용해 전압을 서서히

증가시키면서, 인가전압에 대한 전류를 측정하였다. 이 시험에 의해 누설리액턴스를 구하였다. 시험결과를 그림 9 및 그림 10에 표시한다.



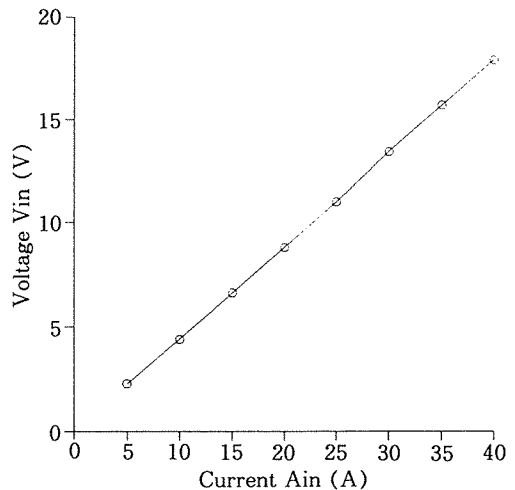
(그림 8) 단락시험 회로도



(그림 9) 단락시험시의 전압, 전류 파형

그림 9는 고압측 입력전압(V_{in}) 11[V](실효치), 전류(A_{in}) 25[A](실효치)일 때의 파형이다. 이 파형으로부터 전압과 전류의 위상이 90° 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 변압기의 권선의 초전도 선재가 액체헬륨에 냉각되므로서 권선의 저항성분이 영이 되어 인덕턴스성분만에 의한 파형이기 때문이다. 이러한 위상차는 상전도변압기에

서는 생기지 않는 초전도변압기만의 고유현상이다. 그림 10은 입력전압(V_{in})과 단락전류(A_{in})와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림의 기울기로부터 제작한 초전도변압기의 누설리액턴스는 0.443



(그림 10) 고압측 전류 대 전압

Ω임을 알 수 있다. 이 값은 이론식에 의해 구한 값 0.502Ω과 잘 일치하고 있다.

5.4 고찰

이상의 무부하시험 및 단락시험을 통해 얻은 제작한 초전도변압기의 전기적 기초특성을 <표 6>에 표시한다.

<표 6> 초전도변압기의 기초특성

용 량	2.5kVA
상 수	단 상
주 파 수	60Hz
권 선 비	228/114Turn
전 압	100/50V
전 류	25/50A
무 부 하 전 류	0.51%
무 부 하 손 실	6.7W
% 리 액 턴 스	11.0%

초전도변압기의 전기적 특성을 얻기 위한 시험으로서, 상기 이외에, 부하시험 및 퀀치시험이 있다. 부하시험에 의해 부하손실 및 전압변동률을 측정하여 변압기의 효율을 산출하여야 한다. 또한 초전도권선의 퀀치시험을 통해 초전도선재를 권선화하였을 때의 퀀치전류치를 측정하여야 한다. 일반적으로 초전도선재를 권선화하였을 경우의 퀀치전류치는 단척선재의 퀀치전류치보다도 작게 되는 현상이 나타난다.

이상과 같은 시험과 그를 통한 이론적 검토를 통해서 초전도변압기의 권선구조 및 냉각시스템 등의 최적화에 대해서 고찰하여야 한다. 이를 통

해서 변압기의 손실저감, 고효율 운전 및 초전도 선재의 성능을 최대한으로 이용할 수 있는 기술적인 면을 고찰하여야 한다.

6. 연구개발 과제

초전도기술을 장래 도래하리라 예상되는 초전도 기간송전시스템에 적용하기 위해서는, 먼저 송전 시스템을 구성하는 전력기기 각각을 초전도화하여야 한다. 이를 위해서는 각각의 전력기기를 제작하여, 초전도화하는 데에 따르는 기술적인 면을 고찰한 후, 시스템으로서의 운용상의 기술 등에 대해서 검토하여야 한다.

이를 위해 초전도 변압기에 대해서도 소형의 제작 및 대형의 개념설계 등이 행해졌다. 그 결과 기본적인 가능성, 구조, 특성 및 운용상의 문제점 등이 밝혀지게 되었으나, 아직도 초전도변압기의 실용화를 위한 개발에 있어서 많은 과제가 있다. 개발하여야 할 과제를 정리하면 <표 7>과 같다.

끝으로, 액체질소 온도에서 사용할 수 있는 고임계온도 산화물 초전도체를 이용한 대전류용의 선재가 개발되면 초전도변압기의 실용화는 가속화될 것이다. 그 이유는 다음과 같다. ①액체질소는 극저온냉매로서 액체헬륨보다도 가격적, 자원적으로 유리하다. ②액체질소 냉동기의 효율은 1/10~1/20로 액체헬륨 냉동기의 효율보다 50~100배 높다. 이 때문에 냉동기의 가격 및 운전비용이 적게 든다. ③도체의 임계온도와 냉매온도와의 차가 크기 때문에 변압기 권선에 quench가 발생하지 않는 구조가 가능하고, 도체의 피복이 가능하게 되어 절연설계가 용이하다. ④액체질소의 절연내력이 액체헬륨의 절연내력보다 약 1.5배 크다. ⑤열 절연 구조를 간략하게 할 수 있고, 비용의 절약이 가능하다. 이러한 장점에도 불구하고 산화물 초전

도체를 변압기의 도체로서 사용할 수 없는 이유는 고 <표 7>에 열거한 기술들을 개발한다면 초전도 서론에서도 기술한 바와 같이 대 전류용의 선재화 변압기의 실용화는 가까운 장래에 달성되리라 사에 어려움이 있다는 것이다. 이 어려움을 극복하 료된다.

(표 7) 초전도변압기의 실용화를 위한 기술개발 과제

과	제	내	용	특	징
전력계통 고장시의 대책	전력공급에 지장이 없는 시스템의 검토	<ul style="list-style-type: none"> • Quench 후의 초전도상태로의 복귀 방식의 검토 • Quench 후의 거동해석 및 모델실험 • Quench 후의 복귀시간을 빨리 할 수 있는 냉각구조의 검토 • 기존 시스템의 신뢰도에 미치는 영향 		<ul style="list-style-type: none"> • 고장전류에 충분히 견딜 수 있는 도체로 하면 교류손실이 크게 되어 성립하지 않음 • 단시간에 초전도상태로의 복귀가 곤란 	
	전자기계력에 대한 도체의 지지기술	<ul style="list-style-type: none"> • 도체 구조 • 지지 구조 		<ul style="list-style-type: none"> • Quench 전류에 견딜 수 있는 구조 	
권선용 초전도 도체의 개발	권선용 도체의 비용 저감	<ul style="list-style-type: none"> • 도체 비용의 저감 • 평균 전류밀도가 큰 도체 개발 • 권선이 경험하는 자계의 세기를 작게 하기 위한 구조 		<ul style="list-style-type: none"> • 초전도 재료의 비용이 종래기의 비용의 약 70% 	
	저손실·대용량의 도체 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 교류손실의 저감 • 통전용량의 증대 • 기계적 강도의 향상 • 안정성의 향상 • 최적구조(냉각 및 절연) 		<ul style="list-style-type: none"> • 교류손실을 줄이기 위해 안정화제의 양을 줄일 필요가 있음 • 대용량화를 위해 소선을 여러가닥 풀 필요가 있음 • 냉각을 위해 도체 표면을 절연물로 덮을 수 없음 	
절연구조	냉각성능을 저하시키지 않는 절연 구조	<ul style="list-style-type: none"> • 설계 data의 축적 • 대규모 data를 얻을 수 있는 시험설비 • 과전상태에서 발생가스의 거동, 부분방전의 검출 등의 연구 		<ul style="list-style-type: none"> • 절연과 냉각이라는 양면의 요구를 동시에 만족시키는 구조 • 액체헬륨은 대기압에서 기화하기 쉽고, 그 부분에서 방전이 발생하기 쉬움 • 초임계상태의 가스를 냉매로 사용하면 저온용기의 구조가 복잡해짐 	
냉각	권선의 냉각효율을 좋게 하는 구조	<ul style="list-style-type: none"> • 권선냉각 구조 • 권선지지 구조 • 보조코일의 냉각 		<ul style="list-style-type: none"> • 냉각을 좋게 하기 위해 도체의 4면이 냉매와 접촉시킴 • 권선부에서 발생하는 열만을 냉매로 냉각 	
단열용기	대형단열용기(Cryostat)의 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 와전류손실의 저감 • 전계해석 		<ul style="list-style-type: none"> • Cryostat의 구조가 복잡해짐 	
다른 기기와의 접속	저온 고전압의 붓싱 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 고전압, 대전류 • 열수축 • 단열 		<ul style="list-style-type: none"> • 단열붓싱과 고전압붓싱이 필요 	
냉동기	고효율, 고신뢰도의 냉동기 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 비용 저감 • 효율향상 • 신뢰도향상(장시간 연속운전) 		<ul style="list-style-type: none"> • 냉동기의 비용이 종래기의 2배 이상 • 냉동기 효율이 1/500~1/1000 	