

# 초전도기기의 전력계통 적용기술 개발

대 전 대 학 교  
설 비 공 학 과  
교수 홍 원 표

## 1. 서 론

전기에너지는 사용의 편리성, 제어의 용이성 및 생활수준의 향상등으로 그 수요가 점점 증대되는 추세에 있으며 선진국화 할수록 전체 에너지중에 차지하는 점유율도 계속적으로 증가되고 있다. 특히 대도시중심으로 전력수요(경인,서울 지역은 2006년경 1,500만[kW]이상)는 2010년에는 현재의 전력수요의 약 2배정도 증가가 예상되며 현재 전력·에너지 공급에 따른 지구환경(지구온난화),원자력발전소의 폐기물등의 공해, 전원 및 전력설비 입지확보의 문제도 심각하게 대두되고 있다.더우기 오일쇼크 이후 전력·에너지의 발생, 수송, 그리고 분배를 효과적이고 경제적으로 해야하는데 반해, 전력기기와 시스템의 용량한계의 극복 과제와 에너지절약을 위한 기술적이고 재료적인 한계문제에 직면해 있다.

또한 전력계통 측면에서의 과제는 전력시스템의 대형화 복잡화 및 전원지의 원격화에 따른 단락전류의 증가와 전력계통 안정도의 악화, 고품질 전

력 수요가의 증가,도심지 전력공급의 지중화 요구 및 전력회사와 경쟁이 가능한 대체에너지 개발에 의한 원가절감 요구 등으로 집약할 수 있다.

이와 같은 다양하고,복합적인 요구에 종래의 기술에만 의존한다면 효과적인 대응의 어려움은 물론 그 기술적이고 경제적인 한계에 곧 직면하게 될 것이다. 따라서 전력계통의 이러한 문제점을 해결하기 위해서 다양한 분야의 신기술 적용은 현재 중요한 관심사로 부각되고 있으며 특히 그 중에서도 초전도전력기기의 전력계통 적용기술은 미래의 전력유통에 있어서 대단히 중요한 요소로 등장할 것으로 전망된다. 전력·에너지분야의 초전도 응용분야는 크게 3분야로 나눌수 있다. 첫째는 전력시스템 분야로 주로 초전도 발전기(Superconducting Generator;SG), 변압기(Superconducting Transformer;ST), 전류제한기(Superconducting Fault Current Limiter;SFCL), 초전도케이블(SuperconductingCable;SC) 그리고 SMES(Super conducting Magnetic Energy Storage;SMES) 즉, 초전도전력기기(Superconductivity Applied Components)가 있고 두번째

로 강력한 초전도 자석을 이용하는 분야로 자기부상열차, 핵융합 및 MHD분야가 있으며, 마지막으로 초섭순 소자를 이용한 양자위상 간섭계(SQUID)등의 초전도 일렉트로닉스 분야로 대별할 수 있다. 본 고에서는 전력분야와 직접적으로 연관된 초전도 전력기기로 한정하여 기술하였다. 따라서 초전도의 대전류(大電流)와 고자계 밀도(高磁界密度)의 특성을 이용하는 미래 전력계통의 초전도화의 의의는 低損失, 고밀도화(Compactness), 고성능 및 경제성 제고로 요약할 수 있다. 여기서 저손실은 초전도선재의 무저항성을 이용하여 각 기기마다 차이는 있지만 종래 기기보다 손실을 대폭 줄일 수 있으며, 고밀도화는 전력기기의 소형화, 경량화로 발전소와 변전소의 콤팩트화를 기할 수 있다. 셋째로 高性能 요소는 특히 전력시스템 이용시 나타나는 특성으로 전력시스템의 안정도 향상, 대용량화의 용이성 및 기존기술의 한계성 극복으로 인하여 대도시 전력공급 난제를 용이하게 해결할 것으로 예상하며, 마지막으로 기기와 전력시스템의 효율상승, 고성능화, 고밀도화로 대용량화 할수록 스케일 메리트(Scale merit)로 인하여 경제성 제고에도 기여할 것으로 분석되고 있다. 장래 전력시스템에서는 초전도 에너지 적용이 예상되는 초전도전력기기는 초전도 발전기, 저장장치, 변압기, 케이블과 전류제한기등이 있으며 이와 같은 기기와 그 영향을 고려해 볼때 초전도가 전력네트워크 구성을 어떻게 변혁시킬수 있을지 간단히 예측하기는 어렵지만 위에서, 언급된 4가지 특성을 효과적으로 이용할때, 전력시스템은 초전도 전력기기에 의해 질적, 양적 변화가 초래될 것이 분명하다. 일례로 고온초전도체에 의한 초전도케이블 송전은 상대적 저전압(66kV 또는 154kV)으로 대도시 가까운 초전도발전기로 부터

승압변전소 없이 대도시에 지중송전방식으로 직접 전력공급도 고려할 수 있다. 초전도기기의 계통적용은 최근 선진국 자료를 분석할때 가까운 장래에 이루어질 것이 확실시되며, 2000년도부터 소형 SMES와 고온초전도체 초전도전류제한기등은 상전도 전력기기와 병행하여 운전되는 형태인 하이브리드 전력시스템과 2010-2020년부터는 특수한 요구조건이 있는 적용개소 즉 해안매립지 대용량발전소와 대도시대용량, 고밀도송전등에서 초전도시스템을 구성하여 운전될 것으로 전망된다. 따라서 초전도 기기의 전력계통 적용은 지금까지 분석한 전력계통의 문제점의 해결방안으로 매우 중요한 역할을 할 것으로 확실시된다.

그러나 전력시스템에 도입되어 운전될 초전도기기는 경제성과 실용화 기술이 완성된다해도 계통에서 운전되기 위해서는 신뢰성확보를 위하여 실증시험이 장시간 요구되며 또한 계통운전시의 문제점 즉, 극저온상태에서의 운전방법과 새로운 개념의 보호협조등 종합적이고 새로운 계통운전기술을 확립해야만 가능하다.

이는 초전도기기가 상대적 저전압의 대용량(대전류)으로 시스템도입시 고전압 중심인 기존 전력계통과는 다르게 새로운 운전패턴이 필요하며 또한 다양한 계통조건에서 신뢰성있게 운전이 가능하도록 실제적인 연구도 지속해야만 한다. 특히 대용량을 가진 초전도전력시스템에서는 신뢰성 확보의 일환으로 뇌와 개폐서지로 부터 프리한 서지 프리시스템을 구축할 필요가 있고 따라서 현재 시스템에서 절연의 중요한 조건으로부터 완화시킬수 있는 시스템 구축이 가능하다. 그러나 초전도 전력시스템은 변압기의 여자돌입전류나 사고전류(과전류 포함)에 의하여 각기기의 초전도선이 초전도상태에서 상전도상태로 전이(퀵치라함)하여

운전지장을 받을 가능성은 항상 있다. 따라서 최악의 경우에도 피보호기의 초전도선의 임계전류이하로 운전해야만 계통운용시 초전도기기의 장점을 최대한 이용할 수 있다. 각기기의 초전도선의 퀴치전류레벨을 어느정도 설정하여 협조운전할 것인가가 즉, 퀴치전류레벨협조가 계통운전상 가장 중요한 문제가 된다.

따라서 이의 근간이 되는 초전도전류제한기의 계통도입 검토와 상호협조는 기존시스템의 절연협조 못지않게 매우 중요한 요소이다. 이에 본연구에서는 초전도기기가 계통에 도입될 경우를 상정하여 운전관점에서 초전도발전기, 초전도변압기, 초전도케이블, 초전도전류제한기 및 SMES의 도입 메리트, 계통운전특성 및 계통적용시나리오와 개념적인 적용모델을 분석하여, 제시하였으며 최종적으로 이를 토대로 초전도전력기기의 전력시스템구성방안과 운전특성도 분석하여 이 구성의 타당성도 제시하였다. 결론적으로 본고는 거시적인 관점에서 초전도기기의 운전을 중심으로 제안된 모델을 정성적인 분석을 시도한 결과를 주로 다루었다.

## 2. 초전도선재의 개발 동향

초전도전력기기의 연구개발이 진행되기 위해서는 초전도재료의 선재화기술의 대폭적인 향상이 필요하다. 초전도현상을 나타내는 재료는 수천 종류가 발견되었지만 선재화에 성공한 재료는 NbTi합금 재료와 금속간화합물인 Nb<sub>3</sub>Sn, V<sub>3</sub>Ga, Nb<sub>3</sub>Al 등 수종류에 지나지 않는다.

이것은 우수한 초전도 특성을 나타내는 재료가 있어도 선재화프로세스에서 요구되는 극세다심화를 위한 가공성, 양산성, 기계적·열적특성등의

조건을 만족해야 한다. 산화물초전도재료는 임계온도가 비약적으로 높아 주목되는 초전도재료지만 금속계 재료와 같은 선재화 프로세스 개발과정에서 많은 재료의 도태가 진행되고 있다.

금속계초전도재료는 직류·펄스초전도기기에서는 응용선재로서 기술적으로 확립되었고 초전도선재·도체에 요구되는 고임계전류밀도, 전자안정성, 열적안정성, 저전자손실등의 고성능화 연구개발이 진행된 결과 상용주파수에서 사용가능한 선재까지 개발되었다. 계속적으로 연구개발이 진행되면 교류전력기기에서의 적용이 가능할 것이다. 한편 산화물초전도선재에 관해서는 장척화, 고전류밀도화로의 노력이 진행되고 있다. 장척화에 대해서는 Bi계(Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub> - Bi계2223상, Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> - Bi2212상)의 초전도 파우더를 은의 파이프에 넣고 테이프상으로 신축하는 Bi계銀시스템선재개발을 진행하고 있다. 또한 고전류화에 관해서는 이트륨계(Y계 : YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> - Y계 123상) 초전도체를 금속기재상에 CVD(화학증착법), PVD(물리증착법)에 의하여 석출된 선재의 개발이 진행되고 있다.

### 2.1 금속계 초전도재의 현황

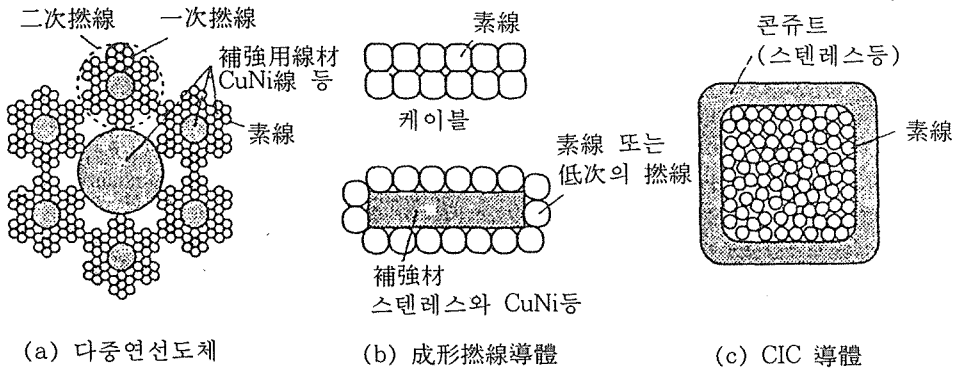
금속계 초전도재는 초전도응용기기에 필요한 도체특성이 다양하기 때문에 여러가지 선재·도체개발이 진행되고 있다. 이 도체를 크게 분류하면 고자계용도체·대전류용량도체·고전류밀도도체로 나누어지고 또한 용도별로도 분류할 수 있다. 기기에 요구되는 초전도선재의 사양은 다양화하여 기기특유의 요청에 만족하도록(그림 2.1)에 나타낸 바와 같이 직류·펄스자계발생장치용 도체로는 초전도선을 다수분을 사용한 케이블상으로 콘쥬트

(conduit)내에 삽입된 케이블 케이블 인콘듀트 (cable in conduit)형(c),초전도선을 다중으로 합쳐 소정의 형상으로 성형한 성형연선도체(b), 교류전력케이블로서 다중선도체(a),(b)가 개발되어 사용되고 있다.

교류용초전도선재·도체의 연구개발은 상용주파수에서 사용가능한 전력기의 실현을 위해서 일본과 프랑스에서 연구개발이 진행되고 있다. 초전도선재는 직류에서의 손실은 제로가 되지만 교류에서는 여러가지 원인에 의하여 손실이 발생한다. 교류초전도선은 이러한 손실을 실용레벨까지 저감시키기 위한 노력이 진행되고 있다.

손실을 억제시킨 교류소선은 동과 니켈로된 합

금의 모재중에 다수의 미세필라멘트를 배합한 구조되어 있고 선경는 0.2-0.3mm초전도필라멘트경은 ~100nm, 필라멘트수는 30~50만본, 전류밀도는 2,000~4,000A/mm<sup>2</sup> 정도의 것을 얻을 수 있다. 이런 6분의소선으로 만든 것으로 핵치전류 ~2kA(0.5T)의 교류특성을 가진 선재의 개발에도 성공하였다. 또한 2T급의 교류초전도 마그네트도 시작되고 있다. 현재 이러한 교류선재를 실용규모의 교류전력기에 적용가능한 전류용량 3~20kA 다중선도체의 개발이 진행되고 있다. 이와 같은 선도체에는 전자기적인 불안전성이 현재 큰 문제로 되어 있다.

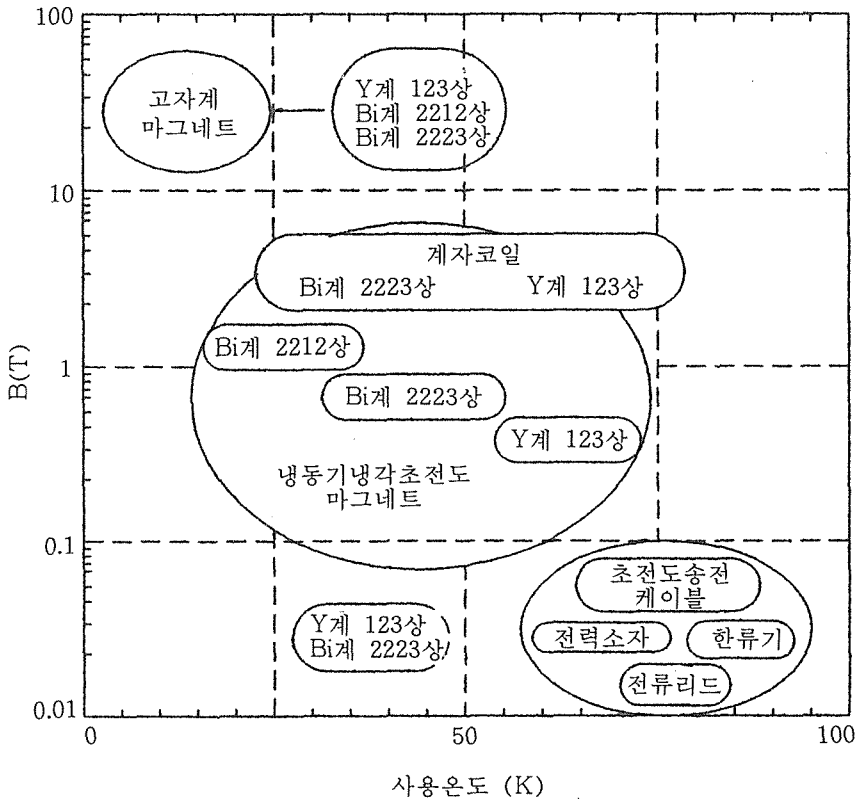


(그림 2.1) 금속계 각종초전도체

## 2.2 산화물초전도재료의 선재화

현재 (그림 2.2)에서 보는 바와 같이 기기개발 목표로 Y계123상(임계온도  $T_c=92K$ ), Bi계2223상( $T_c=80K$ ), T1계2223상 ( $T_c = 125K$ ) 등의 선재화의 연구개발이 정력적으로 진행되고 있다. Y계123의 선재화는 금속기재상에 환층층을

증착하여 화학증착법(CVD)와 물리증착법(PVD)로 ~1mm로 증착, 다시 안정화를 위하여 은을 피복하는 프로세스 기술이 알려져 있다. 임계전류 밀도는 액체질소 온도에서 (77K) 10,000A/mm<sup>2</sup> (외부자계 제로에서)를 유지하는 것이 보고되고 있다. 그러나 PVD, CVD 법은 장척의 선재를 제작하는 것이 금후의 과제이다.



(그림 2.2) 산화물계 초전도체의 연구개발목표

Bi계 2213상, 2223상은 PIT(Power in Tube) 법으로 장척선재화가 정력적으로 진행되고 있다. PIT법은 銀파이프에 Bi의 초전도분말을 넣어 신선, 압연, 프레스가공 등으로 테이프를 제작한후 Bi계 2212상/Ag선재로는 부분용융열처리, Bi계 2223상/Ag선재로는 소정의 열처리를 행한 것이다. 현재 초전도층의 임계전류밀도는 단척선재, 77K에서 500-700A/mm<sup>2</sup>, 수백μ ~ km급 장척선재에서는 80-120A/mm<sup>2</sup>에 달한다고 보고되고 있다(모두 외부자계 제로에서). TI계에서는 플라즈마용사법 스프레이법으로 선재화연구가 진행되고 있다. 이것은 단척선에서 200-900A/mm<sup>2</sup>의 높은 전류밀도를 가진다고 보고되고 있다. 현재 실용화

연구를 하고있는 물질중에서 최고의 전이온도를 가지고 있으며 특히 1223상은 Bi계에 비해서 이방성이 작기 때문에 실용상 매력에 있는 물질이다. 현 단계에서 실용화를 위해 연구되고 있는 것은 주로 1223상과 2223상이며 모두 115-120K 전이온도를 가지고 있으며 액체질소온도에 대해서 큰 온도마진을 가지고 있는 물질이다. 1223상은 TI-O면이 한장 작아 이방성이 적어지고 고자장에서도 비교적 특성이 양호한 편이다. 지금까지의 연구결과를 종합할 때 실용가능성이 큰 고온초전도체의 종류 및 특성을 요약하면 <표 2.1>과 같다. 또한 (그림 2.3)은 산화물 초전도선재의 단척과 장척재의 전류용량과 임계전류밀도를 나타낸 것이다.

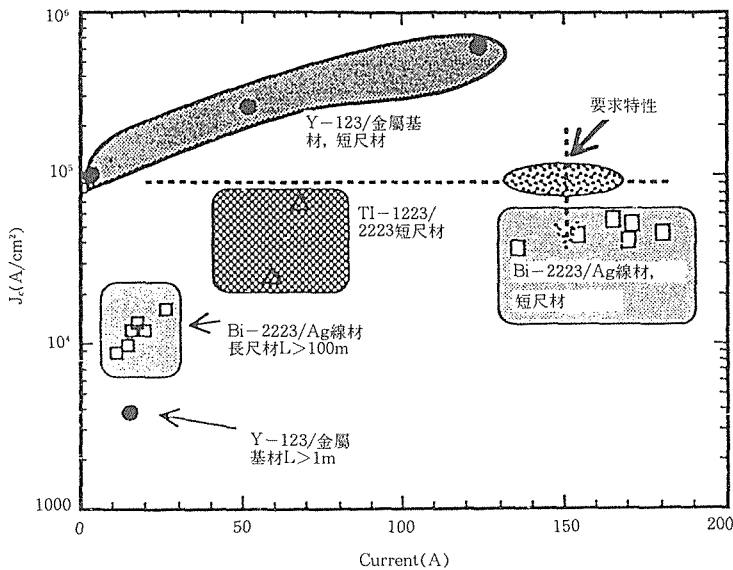
<표 2.1>

실용화 가능성이 있는 산화물 초전도체

초 전 도 체	임계온도	특 징	대상영역
Y 계 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	98K	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 이방성은 비교적 약하다.</li> <li>· 벌크(Bulk)재로 유력</li> <li>· 단결정이 쉽다.</li> </ul>	(1)
Bi 계 $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ (n= 1,2,3 )	110K	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 강한 이방성을 가지고 있다.</li> <li>· 얇은 판상결정</li> <li>· 테이프재 개발</li> </ul>	2212는 (2)
Tl계 $Tl_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ (n= 1,2,3) $Tl_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+3}$ (n= 1,2,3,4)	125K 122K	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 강한 이방성</li> <li>· 얇은 판상결정</li> <li>· 테이프재로개발 유력</li> <li>· Tl이 유독함</li> </ul>	(1)

주 : 위표의 대상영역의 (1), (2)의 설명은 아래와 같다.

- (1) 피닝이 유효한 영역(저온 저자장영역)에서는 결정입내의 피닝메카니즘의 해명 및 결정입계에서의 결합성향상이 중요하고 임계전류의 결정요인이 됨
- (2) 피닝이 유효하지 않은 영역(고온, 저자장 영역)에서는 자속흐름(flux flow)상태에서의 이용이 유리한 경우가 있고 실제 어떤 경우나 재료 및 합성법이 적절한가의 연구가 중요.



(그림 2.3) 산화물초전도선재의 단척과 장척재의 전류용량과 임계전류밀도

### 3. 전력계통에서의 초전도기기 도입 형태

#### 3.1 초전도기기의 종류 및 도입 성립성

초전도를 전력기기에 적용하는 경우에 저항손실이 적게되기 때문에 종래기기 보다도 손실/냉각의 관점에서 제약이 적고 대폭적인 고밀도의 기기설계 제작이 가능하게 되고 또한 전력기기의 콤팩트화와 성능개선을 도모할 수 있으며, 대규모화하는 전력계통에서의 현용기술의 벽을 프랙시블하게 할 수 있다. 초전도를 초전도기기에 적용함으로써

- ① 손실의 저감
- ② 전압유지능력의 향상
- ③ 전력계통의 안정도 향상
- ④ 송전전력한도와 송전거리 한계의 향상
- ⑤ 단락전류의 억제
- ⑥ 계통동요 댐핑
- ⑦ 부하평준화
- ⑧ 단기용량의 증가
- ⑨ 환경대책

등의 효과를 기대할 수 있다. 그러나 전력계통은 이미 확립된 대규모 시스템이고 신뢰성도 확보되어 있다. 따라서 초전도기기의 전력계통 도입도 기존시스템과의 협조를 보다 주안점으로 하여 순차적으로 도입될 것으로 생각된다. 초전도기기의 초기도입은 기기자체를 계통에 접속시켜 사용하는 즉 기존시스템에 병용운전방식으로 적용이 예상되며 점차 초전도의 특징을 살려 필요한 개소에 전력계통 전체를 구성하여 운전하는 방식을 고려하고 있다. 초전도전력응용기기로서의 전력계통 초기도입하기 위하여 현재 선진국에서 국가적인 프

로젝트로 개발하고 기기로 초전도발전기, 초전도 전류제한기, 초전도케이블, SMES등을 상정할 수 있다.

#### (1) 초전도발전기

초전도발전기는 현용기에 비해 손실의 저감, 전압유지능력의 향상, 전력계통의 안정도 향상, 불평형 부하내력의 향상, 송전전력한계완화, 송전거리 한계향상, 진상운전영역확대, 계통동요 댐핑, 단기용량의 증가등의 효과를 기대할 수 있다. 실용화는 빠를수록 그 메리트를 향유할 수 있지만 이미 거대화된 전력계통에 도입하기 위해서는 신뢰성을 확보해야한다. 현재 일본의 경우 Super-GM의 7만kW급 모델기의 연구개발을 진행중에 있으며 전력계통에 접속하여 발전시스템으로서의 총합검증이 빨리 이루어질 필요가 있다.

초전도발전기의 초기도입은 콤팩트사이클용 발전기가 유력시되고 이를 시작으로 노후화된 화력발전소의 기기를 대체하는 기기로서 적용이 적극적으로 검토되고 있다. 또한 전원입지난에 기인한 전원의 편재화 송전선로의 장거리화로 인한 전력계통의 안정도저하등의 문제는 대용량화로 대체하여도 해결되지 않지만 초전도발전기는 현용기에 비해 동기 리액턴스가 1/2-1/5로 작아지기 때문에 송전선의 한계송전능력을 1.3-1.5배 증가시킬 수 있다. 또한 현용기의 2배정도의 용량까지 제작이 가능하기 때문에 신규대용량전원설비용발전기로서도 충분히 검토할 가치가 있다. 또 초전도발전기의 특징의 하나인 조상기설비로서 기능을 이용하기 위하여 수요지 근방의 발전소 또는 변전소에 초전도발전기를 조상기로 도입하여 사용하는 것도 조기 검토할 필요가 있다.

## (2) 초전도 전류제한기

전력계통에서 단락과 지락이 발생하면 사고점에 과대한 단락전류가 흐른다. 이를 위하여 사고개소를 차단하는 차단기와 직렬기기는 단락전류로 인한 전자기적, 기계적인 내력을 가질 필요가 있다. 단락전류는 계통의 전원용량과 규모가 커짐에 따라 증가되고, 차단기와 직렬기기는 대형화되어 기존에 제작한계를 초월하는 용량도 필요하게 된다. 단락전류 문제는 계통의 안정화문제와 동일하게 공급신뢰도 면에서 매우 중요하다. 초전도 전류제한기는 전력계통에서 새로운 기능을 제공하는 기기로서 대규모화하는 전력계통에 매우 매력적이며 그 조기 실용화 가능성이 확실하다. 그 도입효과를 살펴보면

- ① 전력계통의 강화가 가능하며 공급신뢰도의 향상, 계통기기의 부하율 향상등을 도모할수 있다.
- ② 사고의 파급범위를 한정시키고 광역사고를 방지할 수 있다.
- ③ 계통기기의 내전류조건을 완화 시키며 기기의 소형 경량화를 도모하는 등으로 요약할 수 있다. 초기도입은 22.9kV급의 배전선로와 이 배전선로의 대계통의 연계점에 도입을 고려할 수 있다.

## (3) 초전도 케이블

직류송전은 교류송전에 비하여 손실은 작고 안정성등에서 유리하지만 교직변환기가 필요하기 때문에 장거리 대용량이 아니면 경제성이 없다. 따라서 실제 교류방식으로 먼저 실현성이 검토되고 있다. 이 경우 변전소구내의 연계선으로서 수 100m를 포설 종래케이블로 백업하여 시험운전을

행하고 다음에 수km 洞道內포설 초고압선로의 3회선중 1회선을 종래의 회선보다 용량을 수배 크게 초전도케이블로 치환하여 종래회선과 동일한 용량으로 시험운전을 실시한다. 신뢰성이 확보되면 나머지 2회선도 초전도케이블로 치환한다.이것으로 洞道를 신설하지 않고 송전용량을 수십배로 증대시킬수 있다. 직류송전에 있어서는 초전도직류송전케이블은 손실이 전혀 발생하지 않는 메리트를 최대한 활용할수 있기 때문에 비교적 장거리 송전대상이 된다.

## (4) 초전도 에너지 저장장치(SMES)

초전도 에너지 저장장치는 에너지 저장능력을 몰로 그 저장 에너지의 입출력량, 속도를 자유롭게 제어 가능하고, 무효 전력의 제어도 가능하다는 특징 때문에 전력계통의 안정운용에 매우 유용한 기기이다. 또한 부하 근방에 설치함으로써 부하 평준화는 물론 큰 부하의 변화에 신속하게 대응, 전력 품질의 향상에도 공헌할 수 있다. 상정되는 적정 적용개소로는 발전소, 고전압 변전소, 1차/2차 변전소 및 배전용 변전소등이 검토되고 있지만, 초기 도입 장소로는 변전소 등에 순시 전원 대책용이나 계통안정도 향상용으로 적용되고 있다.

## 3.2 초전도전력계통의 성립성

### (1) 손실저감

장래 전력계통에서 매우 중요한 것은 손실의 저감이다. 이것은 각 기기의 내부저항이 중요한 의미를 가진다. 전력계통에서는 이러한 기기가 직렬로 유기적으로 결합되어 정전압 송전방식이



채용되기 때문에 무효전력도 필요하여 무효전력에 의한 손실이 있다. 송전계통의 손실은 현재 약  $5 \times 10^{-2}$  p.u. 정도 된다. 초전도기기중 발전기의 경우 전기자 저항은  $2 \times 10^{-3}$  p.u. 이하 초전도 케이블(275kV, 20km, 1GVAbase)의 교류저항

은  $7 \times 10^{-6}$  p.u./km 정도로 설계되고, 냉동기전력을 고려해도 효율향상 효과가 크다. 전초전도화한 계통에서는 발송전설비의 손실은 현재의 50% 이하로 저감될 수 있다.

(표 3.1) 각종 초전도기기를 조합한 경우의 효과

구 분	조 합 한 경 우 의 효 과
에너지절약효과	① 손실의저감, 효율의 향상, 고성능화 및 콤팩트화를 통하여 실현
자원절약효과	① 각종 초전도기기는 초전도전류제한기로 보호되기 때문에 전류협조를 통하여 각 기기의 전류설계치를 저감시킬 수 있다. 동시에 내전자력설계도 경감된다. ② 동일용량에 대하여 콤팩트화가 가능하기 때문에 코스트 퍼포먼스가 크고, 변전소 발전소의 단위 면적당 출력도 향상시킬 수 있다.
공급신뢰도 향상효과	① 계통연계가 강화된다. ② 안정도개선에 의하여 계통체질이 강화된다. ③ 각종 초전도기기와 에너지저장장치가 조합되어 운전되면, 전력품질의 향상, 즉 안정도, 예비력확보등의 기여가 크다.
환경개선효과	① 각종기기의 효율향상에 의하여 송전손실은 저감된다. ② 전력설비의 지중화 촉진으로 경관의 개선, 전자환경문제도 개선된다. ③ 발전소에 있어서는 CO <sub>2</sub> 배출량의 저감도 가능하여 지구환경문제에 공헌
공급코스트의 저감	① 손실의 저감, 효율향상, 사회환경의 영향도 크게되고 투자효과도 크게 기대할 수 있다.

## (2) 계통안정도향상

안정도향상에 큰 영향을 주는 각종 기기의 리액턴스의 예를 보면 현계통에서 발전기의 리액턴스가 크고 이의 초전도화를 통하여 리액턴스의 저감율이 크기 때문에 계통의 안정도 개선효과는 특히 크다.

## (3) 단락전류

전력계통의 사고에 대해서 차단기와 직렬기기는 電磁·기계적내력을 가질 필요가 있다. 고장전류는 계통규모의 확대로 인하여 증가되는 경향이 있기 때문에 단락전류의 억제는 안정도 문제와 같이 공급신뢰도 면에서 중요하며 상반되는 경우가 많다. 초전도기기의 전력계통 도입은 기기의 저임피던스화의 경향이 강하기 때문에 단락전류가 증가하는 경향이 있지만, 초전도발전기의 과도 및 차

과도리액턴스는 현용기와의 크기가 거의 같아서 단락전류의 피크치의 증가는 거의 없다.

도입 초전도기기의 전류내력은 현용기기와 같이 정격전류의 수-십배 정도의 전류가 흐르면 초전도기기의 메리트가 상쇄되기 때문에 전류제한기를 병용하면 이의 문제를 손쉽게 해결할 수 있다. 또한 전류제한기도입은 현용계통의 단락전류문제의 해결책으로서 큰 도입효과를 가지는 신기술로서 초전도기기의 계통도입을 앞당길 수 있는 매우 중요한 기기이다.

#### (4) 부하평준화

전력수요는 금후에도 계속적인 증가가 예상되고 있고 동시에 부하율의 저하도 팔목할만한 상태이기 때문에 설비의 유효이용 관점에서 경제적으로 큰 문제점이 있다. 양수발전소의 규모로 경제성이 있는 저장설비가 개발되면, 전원설비는 평균수요에 준하는 용량으로도 족하며 특히 수요지 근방에 설치할수 있는 저장설비가 있다면 송변전설비도 평균수요에 응하는 용량으로 운전이 가능하게 됨으로서 그 효과는 대단히 크다. 따라서 초전도에너지저장장치의 실용화 기대는 크다.

#### (5) 成立性

장래 전력계통의 방향은 고밀도송전, 장거리 안정송전, 손실저감, 내환경성 향상, 운용성의 향상, 중대사고 방지를 들 수 있다. 이것을 전력계통으로 요구하려면 전력계통에 설치하는 기기의 초전도화를 높이면 그의 실현가능성이 높을 것으로 기대된다. 예를 들면 전원의 원격·대용량화에 기인하는 문제도 초전도기술의 적용에 의한 발전기의 대용량화 및 저임피던스화에 의해 안정도향상에

크게 기여하게 되고 효율향상에 의한 CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>x</sub> 배출량이 절감되기 때문에 환경문제에 대해서도 큰 공헌을 할 수 있다. 또한 수송경로도 초전도화를 통하여 송전손실의 대폭적인 저감, 루트 선정상의 여유향상, 발전소 증설로 인한 새로운 송전선 건설의억제, 환경적 미관에 대한 사회적요청에 큰 공헌을 할 수 있다. 또한 적절한 초전도 전류제한기를 조합하여 운전하면 이것으로 보호되는 각종 초전도기기에 있어서 전류용량을 저하시켜 설계가 가능하고, 대규모 파급사고 방지도 기대여가 예상된다.

이와 같은 초전도기술은 종래기술의 한계의 극복이 필요한 분야에 적용함으로써 전력시스템 전체의 대해서 변혁을 시킬 수 있는 기술로서 기대된다.

초전도 발전기에 의한 송전분야의 메리트로서는 효율향상은 물론 대용량·소형·경량화가 가능하며 이 자체만으로도 메리트가 크며, 전력시스템관점에서는 안정도향상 전압유지능력의 향상, 운전 가능 범위의 확대에 의하여 이상적인 시스템 구축을 할 수 있다. 또한 초전도 기술은 현재의 기술과의 협조를 통하여 현재설비의 능력을 최대한으로 발휘하는데 크게 공헌할 수 있다. 예를 들면 현용 발전기를 초전도발전기로 치환함으로써 송전계통의 안정도의 제약을 크게 완화시킬 수 있다.

송전손실의 저감에 중요한 초전도 케이블 송전시스템의 개발을 통한 계통적용도 고온초전도선재의 개발에 힘입어 실현성이 매우 높다. 초전도기술 고유의 저장능력을 활성화한 SMES는 부하평준화에 의한 전원의 경직화에 대응할 수 있는 기술로도 가능하기 때문에 전기사업에서도 장기적으로 보면 그 이익이 크다. 또한 산업의 기여도 유망한

<표 3.2>

초전도 전력계통의 성립성

구 분	초 전 도 전 력 계 통 의 성 립 성
고밀도 송전	초전도 케이블과 초전도전류제한기를 조합시켜 운전하면 매우 효과적이다. 장래 도심지에서 새로운 전력구(통로)의 건설이 불가능 할 경우 초전도기술 적용이 유일한 해결책이다. 액체질소냉각하의 적용가능선재에 의하여 실현 성립성이 크다.
장거리 안정송전	초전도기술과 기존 안정화 기술과의 조합에 의하여 이의 도입을 저해하는 요인은 기술면에서 상당히 줄어든다. 초전도발전기와 SMES는액체헬륨냉각방식에서도 경제적 메리트가 가능하며, 금후 신뢰성과 경제성의 제고를 위한 개발연구가 필요하다.
손실저감	초전도기술의 고유한 특성으로서 각 기기는 현용기기보다 손실이 대단히 작다.
내 환경성의 향상	효율의 향상, 자원절약효과등에 의해 CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> 및 SO <sub>x</sub> 의 절감을 도모할 수 있다. 또한 현재의 가공송전선에 초전도전류제한기를 적용 지락사고전류를 억제함으로써 통신선등의 전자유도를 저감할 수 있다.
운용성의 향상	초전도전류제한기를 대규모계통의 연계점에 설치하여 상호연계로 인하여 상호간의 영향을 최소화함으로써 계통연계를 강화할 수 있다.
중대사고 방지	케이블화에 의하여 뇌사고를 줄일 수 있고, 전류제한기에 의하여 단락사고 영향도 최소화할 수 있는 등 사고방지에 기여가 예상된다. 단, 전류제한기의 다수 사용에 따른 충분한 전류협조의 검토가 필요하다.

분야이다. 이를 위하여

- ① 전력기기에 적용할 수 있는 교류선재의 개발
- ② 고신뢰성을 가진 냉동시스템의 개발
- ③ 초전도기기의 장기 신뢰성확인
- ④ 냉각시간의 단축화등은 불가피한 요소이다.

중래의 발전기와 케이블등의 전력기기의 발전역사를 뒤돌아 볼때 냉각개선에 의한 전기裝荷를 증가시켜 대용량화를 도모하였다. 그러나 이 방법은 기기의 기하학적인 寸法을 한정시키는 경우에는 필연적인 손실의 증가를 초래하고, 효율의 저하를 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 유일한 수단은 초전도기술이라 여겨진다.

### 3.2 초전도 전력기기 도입 형태

초전도전류제한기는 초전도 전력시스템 구성 및 운전에 필요 불가결한 기기로서 현재 직면하고 있는 고장전류의 억제를 위한 수단으로 계통의 강력한 니드에 의하여 새로운 기기로서 계통 적용을 위한 기기개발에 심혈을 기울이고 있어, 조만간 저온초전도체 또는 고온초전도체 SFCL등이 실용화 될 전망이다. 도입모델 계통은 크게 상전도시스템, 하이브리드시스템 및 전초전도시스템으로 나누어 설명할 수 있으나 좀더 실제적인 관점에서 대계통의 연계지점, 차단기의 차단용량을 초과하

는 지점 및 초전도기기의보호 및 전류용량 설계치의 저감을 목적으로 나누어 고찰 할 수 있다. 이것을 계통에 적용하면 단락전류억제, 전력기기의 내전류레벨의 저감 및 전력시스템의 콤팩트화에 그 효과를 크게 발휘할 것으로 판단되며 본 고에서는 도입이 유력시되는 적용 장소를 상전도시스템, 하이브리드시스템 및 전초전도시스템으로 크게 나누어 검토하였다.

### (1) 상전도시스템

1) 수요 증가시 송전 계통연계 운전시 고장전류에 의한 과급억제

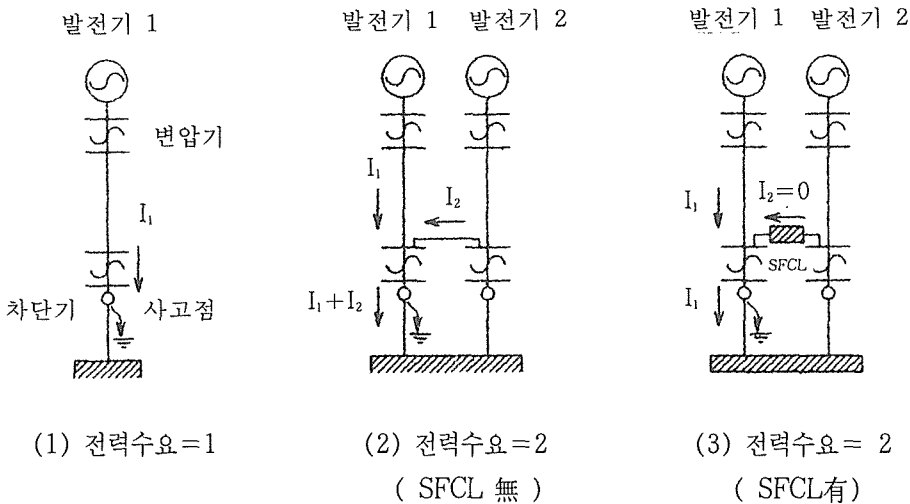
- 적용일례 1

(그림 3.1)의 (1)에서 만약 전력 수요가 1인 경우에 운전하는 패턴이고 전력 수요가 2로 증가했다면 새로운 발전기 2와 송전선을 증설하여 전

력의 효과적인 이용과 분배를 위하여 연계 운전이 이루어진다. 이경우 (1)과 같은 동일한 지점에 사고가 발생하면 발전기 1에서 고장전류  $I_1$  과 발전기 2의 사고 전류  $I_2$  가 중첩되어 고장전류는  $I_1 + I_2$ 로 증가하게 된다.

따라서 전력 회사에서는 계통의 구성과 안정한 운용을 위하여 고장전류를 억제하기 위한 노력의 일환으로 차단능력이 큰 차단기와 전류내량이 큰 전력기기로 교환해야 한다.

그러나 (3)과 같이 연계점에 SFCL을 설치하면 상시에는 연계에 의한 계통의 효율적인 운용이 가능하고 사고시에는 SFCL에 의하여 계통을 분리하여 고장전류를 거의  $I_1$ 으로 억제 할 수 있어 차단기의 차단능력을 감소시킬 뿐만 아니라 고장전류를 대폭적으로 감소시킬 수 있다.



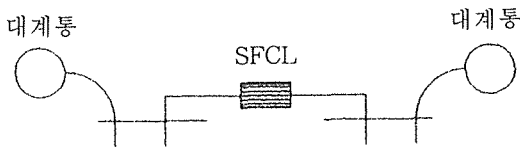
(그림 3.1), SFCL의 전력계통 도입 예

— 적용일레 2……대규모 계통의 연계지점

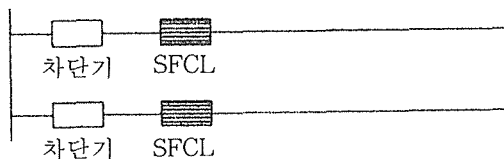
(그림 3.2)는 대규모 송전계통을 연계하기 위하여 기간변압기의 브스타이 등에 설치하여 대계통 중 1개의 계통에서 고장 발생시 동작하여 브스타이를 개방함으로써 상호대계통 고장시 영향을 최소화 시킴으로서 공급신뢰도를 향상시킬수 있으며 차단기의 단락용량 초과도 억제할 수 있다.

2) 차단기의 차단용량한계를 초과하는 지점

(그림 3.2)의 (2)에서와 같이 차단용량한계를 초과하는 송전선이나 기간계통이 집중되는 대용량 변전소에 설치하여 송전선 사고시에 SFCL이 동작하여 사고전류를 억제하기 때문에 차단기의 대용량화를 완화시키는 효과를 기대할 수 있다.



(1) 대규모 계통연계



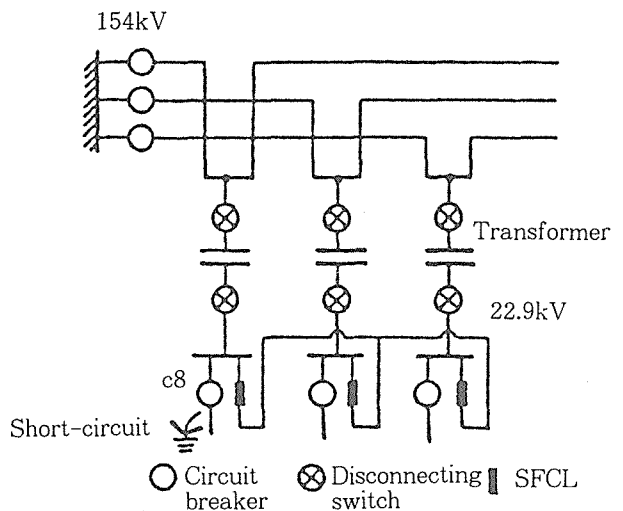
(2) 차단기 차단용량한계를 초과하는 지점

(그림 3.2) 상전도시스템에서의 적용형태 (1),(2)

3) 대규모 배전변전소의 단락전류억제

대부분의 도심지의 2차변전소는 154/22.9kV로

강압되는 대규모 변전소라고 볼 수 있다. (그림 3.3)에서 보는 바와 같이 고장전류를 억제하기 위하여 변압기는 단독으로 운전되는 것이 보통이다. 그러나 이러한 시스템은 고장전류의 억제에는 효과가 있지만 부하에 대응한 계통의 합리적인 운영 및 경제적인 운전관점에서는 바람직하지 않다. 따라서 불가피하게 그림에서 22.9kV부스에서 연계하여 운전되어야만 하는 시스템이 증가되는 추세에 있다. 이 연계시스템의 단점은 한 피더가 고장이 발생하면 고장전류가 증가되고 또한 사고피더에 의하여 건전상의 피더에도 사고과급이 미치므로 계통 신뢰성향상을 위하여 이러한 관점에서 SFCL을 연계지점마다 설치하여 차단기의 차단용량의 초과를 억제하는 것은 물론 건전상의 계통을 고장계통으로부터 분리시키는 효과가 있어 매우 바람직한 기기로 평가된 바 있어 계통의 조기도입이 기대된다.



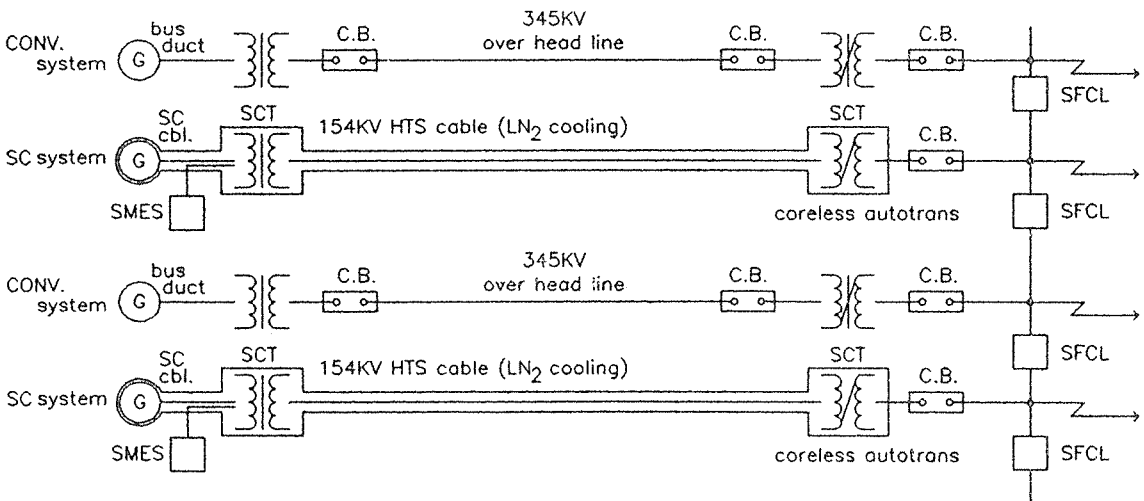
(그림 3.3) 대규모 배전변전소의 적용형태

(2) 하이브리드시스템(상전도시스템과 초전도 시스템 연계운전형태)

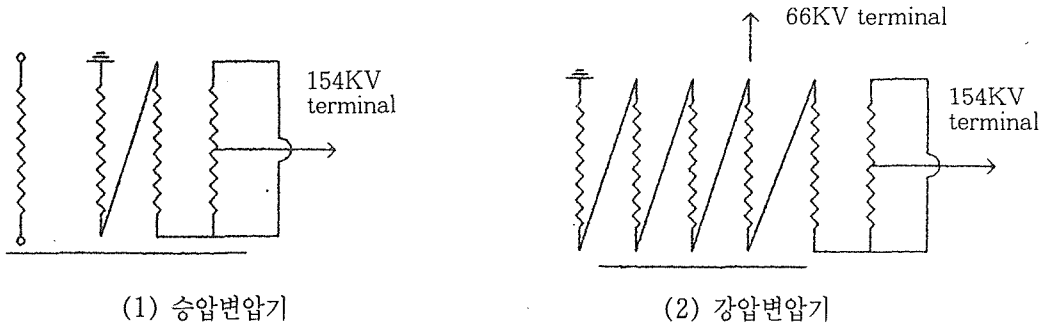
(그림 3.4)는 가까운 장래에 초전도 전력시스템과 기존시스템이 어떻게 운전이 가능한가를 보여주는 하이브리드 전력시스템을 개념적으로 나타낸 것이다.

다른 회로정수를 가진 두시스템은 수전단에서 연결 시켜야 바람직하며 초전도 케이블은 Bi-HTSc테이프로 구성된 형태이고 나머지 초전도기기는 NbTi AC초전도 선재로 제작된 기기들로 상정하였다. 여기에 사용될 SFCL은 고온초전도기술 진보 여하에 따라서 HTS로 제작되어 사용할 수도 있다. 특히 송전단에서의 연결운전하는 경우에는 초전도발전기와 기존발전기사이의 횡류가 흐르기 때문에 횡류보상장치가 필요하고 또한 병렬 운전 중에 계통사고등의 고장에 의하여 재폐로가 행해지는 경우에는 초전도 발전기는 한계송전전력이 크기 때문에 문제가 없지만 기존 발전기는 탈조로 이어질 가능성도 검토 되어야 한다. 초전도 지중

케이블 시스템은 뇌서지에 노출되지 않도록 설치, 서지프리 시스템을 구축해야 하며, 따라서 BIL을 대폭 줄일 수 있어 케이블과 관련기기의 신뢰성을 확보 하면서 콤팩트화를 실현할 수 있다. 초전도 발전기는 댐퍼권선이 없는 전초전도 발전기를 선택하여 계자권선형 SC발전기보다 손실을 저감하고 구조를 간략화 시킨다. 이때 고장전류를 억제 하고 발전기의 안정도를 향상시키기 위하여 SFCL을 직렬로 연결, 운전하거나 발전기 단자에 안정화용 SMES를 설치하여 운전한다. SC케이블의 충전용량은 (154kV, 100MVA, 100km)는 약 300MVA로 추정되며(공급전력의 1/3)이는 수전단측에 그림 3.5와 같이 공심 단권변압기(Auto Tr)을 설치하여 발생하는 여자전류를 무효전력원으로 사용할 수 있다. 또한 계통상태에 따라서 초전도리액터를 케이블 양단에 설치하여 운영할 수 있다. 초전도 전력시스템 운용시 공심 SCTr설치는 경제성측면에서도 매우 중요하다.



(그림 3.4) 하이브리드 전력시스템에서의 SFCL의 적용형태



(그림 3.5) 초전도 공심단권변압기 개념도

기존시스템에서 차단기의 단락용량을 초과하는 경우에는 이를 효과적으로 억제하기 위하여 SFCL을 설치, 운용할 수 있다. 또한 수전단측의 버스접속라인에 SFCL을 설치 최대고장전류를 보다 작게 제한한다.

기존전력시스템과 초전도 전력시스템과의 연계 운전시 고장전류를 억제하기 위하여 반드시 (그림 3.4)와 같이 SFCL를 설치해야한다. 만약 연계된 전력시스템에서 고장이 발생할시에 연계된 SFCL에 의하여 연계된 다른 시스템에 전혀 영향을 미치지 않게 된다. 고장이 회복되면 SFCL도 임피던스가 "0"으로 회복되어 통상적인 연계책무만 수행하게 된다.

따라서 SFCL은 대규모초전도시스템과 상전도 시스템을 수전단측에서 연계하여 운전하는 데 필수적인 기기로 연계선로의 고장전류 억제뿐만 아니라, 차단기의 차단용량억제를 위한 매우 유효한 기기이다.

### (3) 초전도전력시스템

초전도전력기기는 2000년대 초반에 상전도전력 시스템에 기기단위별로 도입,운전될 것으로 전망

된다. 그후 점차로 도심지전력공급의 일환으로 전 초전도시스템을 구성하여 단독 또는 연계형태로 운전된다는 시나리오는 쉽게 예측할 수 있다. 따라서 현 전력계통을 중심으로한 초전도기기가 설비단위별로 도입될 분야는 크게 세분야로 아래와 같이 나눌 수 있다.

- (1) 발전기의 완전초전도화(전초전도발전기의 실용화 기술 개발로 기기 단위로 계통 적용하는 방식-대도시 근교의 해안 대용량 화력발전소로부터 적용예상)
- (2) 발전소의 초전도화(발전기, 모선, 변압기, SFCL을 실용화하여 초전도시스템 구성에 제일 취약한 열절연 및 효과적인 냉각시스템 구성의 용이성 도모)
- (3) 변전소분야의 초전도화(송전케이블 중심으로 한 변압기 조상설비 및 SMES의 실용화로 대도시 전력공급모델 이용)

#### 1) 발전기의 완전초전도화

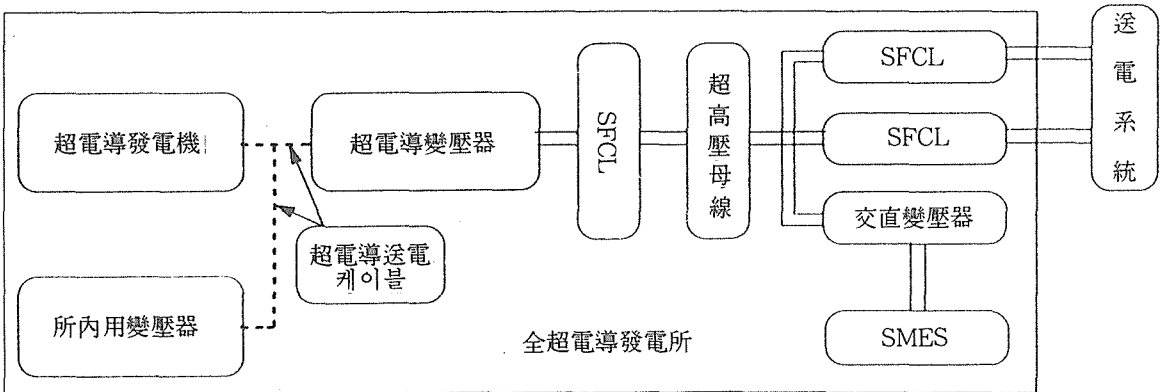
발전기전기자의 초전도화는 전기자특성, 기기설계, 열설계, 전기절연설계면에서 매우 엄격한 조건을 요구한다. 특히 전기자권선에 작용하는 전자력

은 매우 크고 그 지지구조설계는 도체냉각설계와 전기절연설계와의 트레이오프관계에 있으며 CIC (cable in conduit)형 도체의 적용이 유력하게 검토되고 있다. 전기자권선에 걸리는 자속 밀도는 1-2 T로 그중에서 저 교류손실을 확보할 필요가 있고 교류기기 중에서 제일 엄격한 조건을 요구한다. 따라서 초전도전기자의 개발은 교류초전기기의 최종적인 목표이며 발전소의 초전도화와 교류기기의 초전도화에 견인차적인 역할을 할 것으로 예상된다.

계통측면에서는 대도시의 지중케이블을 초전도화하면 전초전도발전기를 해안 대도시근교에 설치하여 이를 직접 케이블 송전시스템에 접속시키는 고효율 대용량송전을 실현할 수 있다.

### 2) 발전소의 초전도화

(그림 3.6)은 전초전도발전소의 구성을 위한 블록 다이어그램이다. 전력계통에 초전도기기를 도입하는 경우 극저온 냉동기 설치에 의하여 냉동시스템의 경제성과 효율성에 관련한 스케일 메리트를 최대한 이용, 초전도기기의 계통도입을 용이하게 하는 대책이 될 수 있다. 또한 초전도기기를 저온과 연계하는 데도 상온에 노출된 전류리드에 의한 열침입을 경감함으로써 전체의 열효율을 높이는 역할을 한다. 발전소에서 저전압 대전류모션을 초전도케이블로 사용하면 손실의 저감은 물론 발전소의 레이아웃의 자유도가 크게 증대되고 또한 해안 발전소로부터 내륙의 변전소까지(~10km)를 초전도케이블로 이용, 승압변압기를 발전소에 설치하지 않고 변전소에 설치함으로써 염해방지, 해안도심지 환경보존 측면에서도 유리하다.



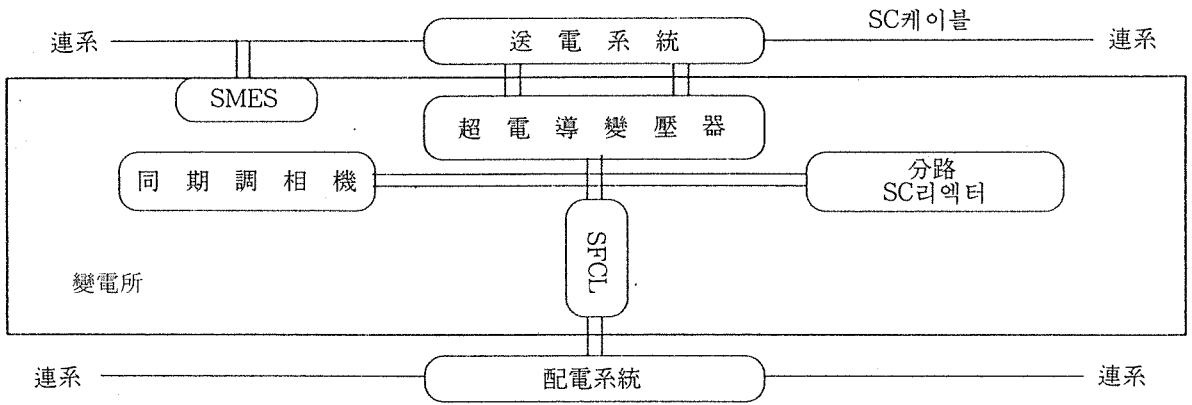
(그림 3.6) 전초전도발전소의 구성

### 3) 변전소의 초전도화

(그림 3.7)은 전초전도변전소의 구성예를 나타

낸 것이다. 적용할 수 있는 초전도기기도 다양해지고 변전소의 콤팩트화에도 크게 기여하게 된다.





(그림 3.7) 변전소의 초전도화 구성 예

초전도케이블을 대도시전력공급용으로 상정하게 되면 도시내 초고압변전소를 고려할 수 있으며 그 효율성은 앞으로 크게 증대할 것으로 예상된다. 적용이 예상되는 초전도기기는 대도시전력공급을 위한 초전도케이블, 변압기, 조상설비(분로리액터 포함), SMES등을 들 수 있다.

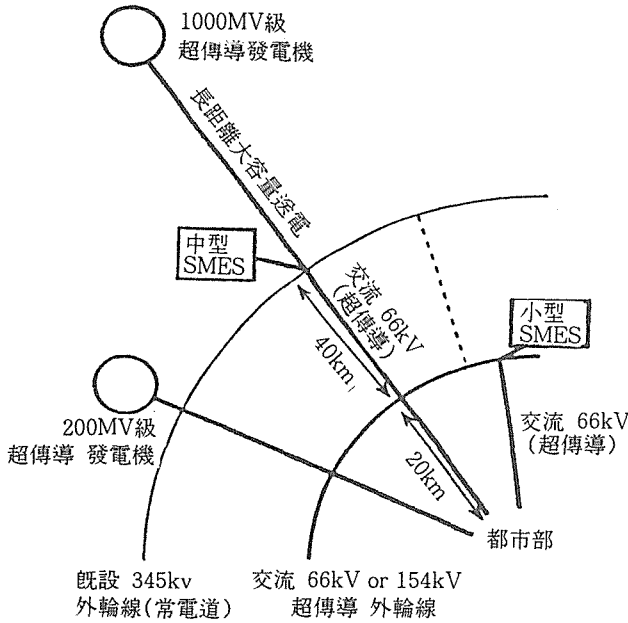
#### 4) 전 초전도시스템

##### 가) 全超電導 시스템의 구성개요

초전도기술은 전기에너지의 발생, 저장, 수송, 변환의 모든 분야에 적용될 가능성이 있지만 기존 전력시스템의 기기 즉 발전기 변압기, 송전선등을 초전도 전력기기로 모두 치환하기는 운전, 보호라는 측면에서 그 가능성은 어려울 것으로 전망된다. 따라서 지역적으로 또는 초전도특징을 살릴수 있는 시스템을 면밀히 평가한후 전력시스템에 초전도 기기를 적용하여 새로운 시스템을 구축하는 것이 그 운영상 경제성과 신뢰성을 제고시킬 것으로 보인다. (그림 3.3)에서 초전도전력시스템의 여러 가지 형태를 검토한 바와 같이 전초전도 발전기의 적용시의 발전기의 단락전류억제와 계통안

정도 향상측면에서 SFCL를 발전기단자에 설치하는 방안, 각종 초전도기기가 조합된 변전소의 초전도화 시스템에서 변압기, 차단기케이블에 고장전류로부터 초전도기기를 보호하기 위한 방법과 고장전류를 감소시킴으로써 초전도기기의 電流量設計値의 저감에 기여할 수 있다. 따라서 초전도 전력시스템은 대도시 근교의 해안선에 설치한 화력발전소(전초전도 발전기)로부터 고온초전도케이블에 의한 대도시전력공급방식이 유력한 방안이다. 또한 대도시 전력공급방안의 하나로 대도시 근교의 대용량변전소를 완전초전도화하여 대도시 중심부의 전력공급무트확보를 위하여 상정할 수 있는 역시 유력한 방안이 될 수 있다.

이상과 같은 관점에서 미래의 전초전도 시스템 구성개념도를 (그림 3.8)과 같이 나타낼 수 있다. 이 모델에서는 기존의 초고압 외륜선대신에 내측에 초전도 케이블에 의한 새로운 외륜선을 설치하게 된다. 원격지에서 기존의 상전도발전기를 이용하여 대도시 주변의 초전도케이블 외륜선까지 공급된다. 또한 전초전도발전기를 시설한 도시근교 화력으로 부터 발전된 전력도 초전도케이블 외륜



(그림 3.8) 전초전도전력시스템 적용 개념도

선으로 공급되어 도심지 초전도지중케이블에 연결시켜 전력을 공급한다. 이때 초전도케이블 외륜선 부근에 설치되어 있는 SMES에 의하여 계통의 안정도제어, 부하평준화등을 가능케하여 계통의 신뢰성과 경제성을 대폭 제고시킬 수 있다. 이 제한한 모델은 실현하기에는 기술적, 시간적 그리고 엔지니어링상의 문제점이 남아 있지만 종래기술과 혼용되어 사용하면(장거리 대용량 송전은 초고압으로 담당) 가까운 장래에 실현할 수 있다.

나) SFCL을 중심으로 한 적용형태

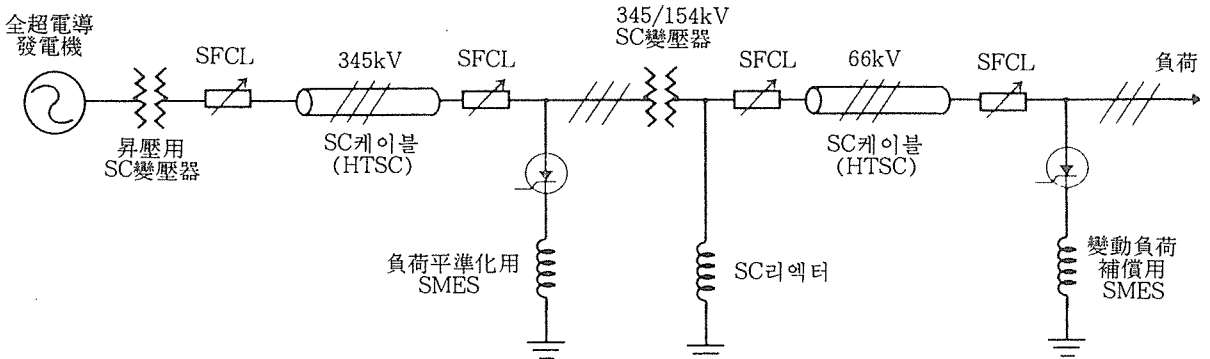
점점 증대되는 도심지의 전력수요에 대응하기 위하여 송전용량이 크게 요구되는 장소를 택하여 초전도케이블을 사용하면 도심지의 전력공급의 어려움과 환경적인 문제점도 해결할 수 있다. 초전도케이블은 종래의 상전도 케이블에 비하여 동일한 체적에서 비약적으로 전력을 공급을 확대할 수 있다. 도심지의 지하케이블의 초전도화는 가까

운 장래에 그 메리트 때문에 실현될 것으로 보인다. 따라서 전장에서 제시한 해석적 특성을 토대로 도심지의 지중케이블을 중심으로한 도시근교의 초전도 전력시스템의 적용모델을 제안하면 다음 3가지인 (그림 3.10-12)와 같이 나타낼 수 있다. 이 3가지 방안 공히 (그림 3.9)에서보는 바와 같이 초전도케이블과 초전도변압기등을 보호하기 위하여 부하공급계통에 도입하는 방안과 전원수송계통에 도입하는 경우로 대별하여 설명할 수 있다.

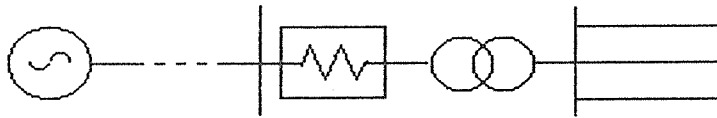
· 부하공급계통에 도입하는 경우

— 초전도변압기에 도입하는 경우

변압기 전원측에 SFCL을 도입하여 고장전류로부터 초전도변압기를 보호하고 전류용량설계치를 저감하여 전자력스트레스를 효과적으로 억제할 수 있어 초전도변압기의 설계조건완화 및 경제성제고에 기여할 수 있다.



(그림 3.9) 교류전초전도 전력시스템 구성도 일례



— 초전도케이블에 도입하는 경우

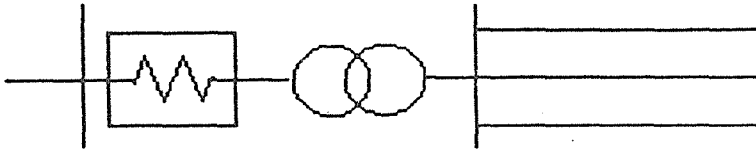
초전도 케이블은 충전전류가 정격전류에 접하는 비율은 길이 100km(66kv/GW급)에서도 1% 이하로 되지만 초전도송전에서는 상대적으로 송전길이 증가되어 상시전압유지 및 무효전력제어를 위하여 조상설비를 선로중간에 적정 배치하여 운전하는 것이 중요하다. 이를 위하여 SC리액터나 수전단에 공심 SCTr을 설치하여 무효전력원으로 활용한다. 대전류송전에 문제가 되는 것은 수요지의 전력분배이다. 현재의 변압기 용량한계는 수송 제한으로부터 정하여 지며 단상 500-1000MVA로 5GW전력을 한 변전소로부터 분배 하려면 변압기 12대가 필요하다. 초전도 케이블 계통에서는 송전단측에 대규모용량의 SCTr을 설치하고 수전단측에는 변압기를 사용하지 않고 직접 개폐소로

보내 개폐기조작으로 부하를 분담하는 방식을 고려할 수 있다. 현재 개발되고 있는 직렬기 및 모선의 정격전류는 12KA로 SC케이블의 30-50kA급 대전류를 잘 처리 하려면 SFCL을 케이블에 도입하여 전류협조와 보호방식을 포함한 충분한 검토가 필요하다. 대용량전류분배에 따른 고장전류의 증대로 인하여 케이블보호용으로 설치한 차단기의 차단용량증가의 효과적인 억제도 가능하다. 또한 상전도케이블의 과부하내량은 냉각시스템의 능력에 의하여 결정된다. 약 20-50%과부하내량을 높여 운전할수 있다. 그러나 SC케이블은 전류가 증대함에 따라 퀸치까지 발생할 수 있기 때문에 과부하내량을 결정하는 데는 초전도체의 안정성 및 SFCL과 협조하여 선정된 동작전류의 범위가 매우 중요하다.



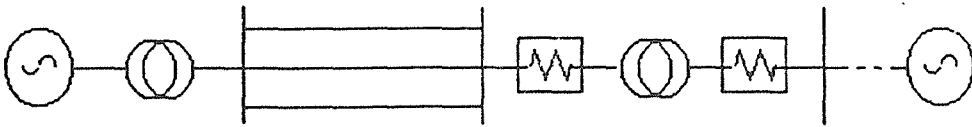
- 초전도변압기나 초전도케이블에 도입  
 비교적 소규모계통에 변압기 전원측에 설치하여, 고장전류를 억제하여 초전도기기를보호하고

시스템의 구성시 전류협조문제를 용이하게 할 수  
 방법이다.



· 전원수송계통에 도입하는 경우  
 - 초전도변압기에 도입하는 경우  
 전력의 대도시까지 수송한 경우에 이 대전력을 효과적으로 분배하고, 전력공급루트의 확보를 위

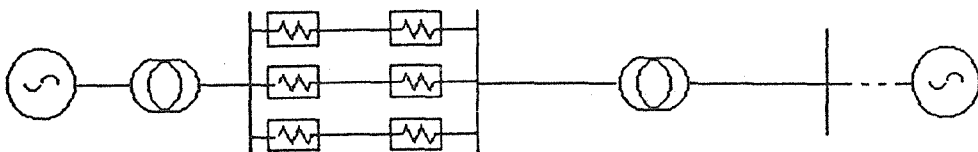
하여 대도시변전소의 초전도화가 필요하다. 이때 변전소의 초전도변압기를 보호하기 위하여 아래와 같이 변압기 전원측과 변압기 부하측에 각각 SFCL을 설치한다.



- 초전도케이블에 도입하는 경우  
 대도시근교의 대용량 초전도화된 변전소에서 전력공급을 위하여 고온초전도케이블에 의한 지중송전방식으로 대용량 케이블을 고장전류로부터 보호하기 위하여 SFCL을 전력공급측과 부하측에 각각 설치한다.

공계통에서의 사고로 인하여 단락 전류가 흐르는 경우 케이블이 켄치에 이르지 않도록 하는 것이 중요한 요소가 된다. 전류용량을 단락전에 의하여 켄치가 발생되도록 하지 않으려면 케이블 외경이 크게 되고 콤팩트화를 달성할 수 없다. 전류용량을 정상의 정격 전류로 할 경우, 사고 차단 직후 재폐로전에 초전도로 복귀하는것이 핵심적인 과제이며, 케이블화된 경우에 도체상의 초전도로 복귀

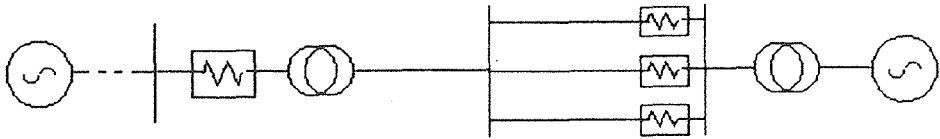
SC 케이블 계통에서의 관련기 기술에 최고 중요한 것은 SFCL이다. 초전도전력계통에서는 가



하는가를 쉽게 확인할 수 있는지를 검증할 수 있는가가 지금까지의 과제이다.

현시점에서는 케이블과 전류제한기를 설치함으로써 단락전류를 제어하며 콤팩트화를 달성할 수 있는 방안이라 여겨진다. 상기의 초전도의 복귀가

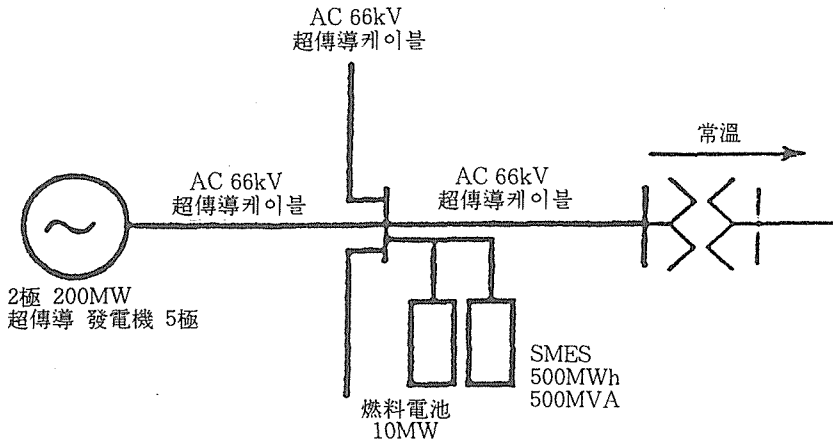
달성된 경우에도, 전류제한기를 설치함으로써 케이블이외의 변압기, 차단기등의 단락전류 정격을 감소시켜 기기의 콤팩트화와 코스트 다운을 달성할 수 있다.



— 초전도변압기 및 케이블에 대하여 도입하는 경우

초전도변압기의 전원측과 케이블의 부하측에 설

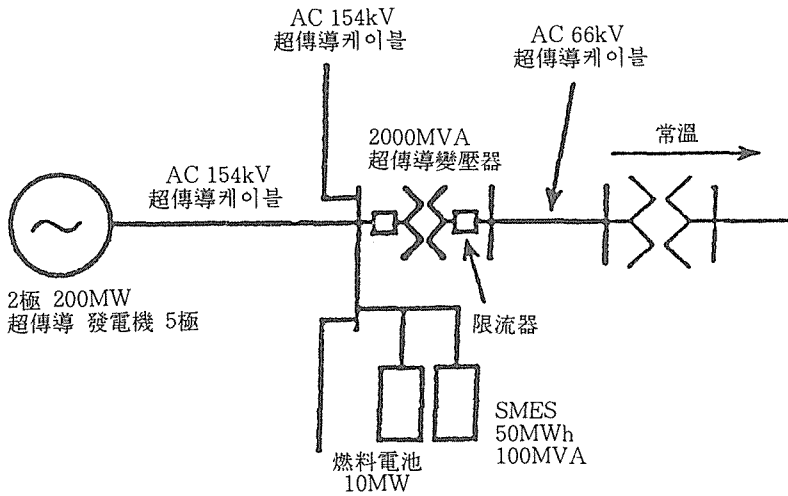
치하여 전류협조를 좀더 용이하게 하고 초전도기기를 보호할 수 있다.



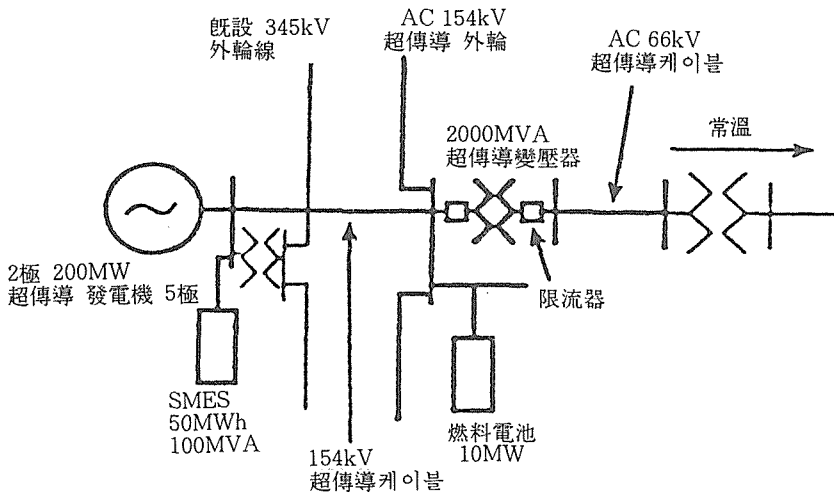
(그림 3.10) 도심지 전력공급 시스템(제 1 안)

(그림 3.10)의 제 1안은 초전도가 저전압 대전류기술이라는 것을 활용하여 도시근교화력(전초전도 발전기)으로 부터 초전도케이블 외륜선, 그리고 발전소와 상대적으로 가까운도심지의 대용량 변전소까지 동일한 전압으로 공급하는 방식이다. 외륜선 부근에 도심지의 순동적인 부하변동의 흡

수용 및 계통안정화용으로 소형SMES와 연료전지를 설치하는 모델이다 이때 SMES는 모듈타입으로 저장용량과 전력변환용량을 소규모로 여러대를 연결 다양한 전력계통 용도에 능동적으로 대응할 수 있도록 할 수 있다. 이 모델은 변전소에 설치된 초전도발전기로부터 도심지까지 동일 전압이기 때



(그림 3.11) 도심지 전력공급 시스템 (제 2 안)



(그림 3.12) 도심지 전력공급 시스템 (제 3 안)

문에 승압변압기가 필요없는 현재의 계통과는 아주 다르게 구성된다. 앞으로 계통운영상의 문제점의 검토가 필요하지만 변압기가 없게 되면 변전소 부지문제의 해결 및 경제성측면에서 큰 효과를 기대할 수 있다.

(그림 3.11)의 제2안은 대체로 제1안과 비슷하지만 초전도 케이블의 내측에 초전도 변압기에 의

하여 강압되어 도심지에 공급되는 방안이다. 이 안은 제1안보다 메리트는 작지만 도심지의 부하밀도 크기에 의하여 채용될 수 있는 방법이다.

(그림 3.12)의 제3안은 종래의 상전도 외륜선을 이용하는 것으로 도시근교화력에서 발전된 전력을 상전도 외륜선에 접속하고 다시 내측의 초전도 케이블 외륜선에 접속시키는 안이다. 이 모델

는 부하피크(1-2시간)를 흡수하기 위한 중용량 SMES를 상전도 외륜선에 설치하여 순동예비력 확보, 피크컷트용 및 장거리송전선 계통안정도향상을 통한 수송전력 증대용으로 설치된다. 또한 연료전지를 초전도케이블 외륜선 부근에 설치하여 주파수조정용으로 사용하는 것으로 한다.

이 안의 도시근교화력에 사용되는 초전도발전기는 22KV로 발전하여 초전도변압기로 승압하여 송전할 수 있는 모델이다.

#### 4. 결 론

초전도전력기기의 계통적용은 냉각시스템의 신뢰성확보, 고온 초전도체의 실용화선재 개발여부, 신뢰성과 경제성제고등 문제점을 내포하고 있지만 초전도 발전기, 소용량 SMES, 고온초전도체 케이블과 전류제한기는 기기 자체의 매우 큰 장점과 전력시스템의 요구에 의하여 가까운 장래에 계통에 적용될 것으로 전망된다. 그 적용방안은 여러 가지가 검토되고 있지만 먼저, 2000년도 초반경에 도입될 것으로 예상되는 초전도기기와 기존 상전도기기가 혼용운전되는 "하이브리드전력시스템" 이고 다른 한 형태는 대용량 고밀도 송전이 요구되는 대도시의 전력공급의 난제를 해결하기 위한 고온초전도 케이블 송전이 중심이 되는 도심지 대용량 변전소 중심으로 적용될 전초전도 전력시스템이라 예상된다. 이는 초전도기기의 적용으로 전력계통은 상대적 저전압 대전류 특성을 갖게되어 전력의 발생, 수송, 분배 개념을 획기적으로 변화시킬 것으로 평가되고 있다. 전력시스템의 저손실, 고성능화, 콤팩트화, 경제성 제고등을 통하여 현재 전력계통의 문제점(계획,운용상)을 해결하기 위한 매우 효과적인 대안으로 받아 들여지고 있

다.우리나라와 같은 여건에서도 이 전력기기의 장래에 전력계통 도입은 불가피 할 것으로 예상된다.

따라서 본 고에서는 초전도기기가 계통에 도입될 경우를 상정하여 운전관점에서 초전도발전기, 초전도변압기, 초전도케이블, 초전도전류제한기 및 SMES의 도입 메리트, 계통운전특성 및 계통적용시나리오와 개념적인 적용모델을 분석하여, 제시하였으며 최종적으로 이를 토대로 초전도전력기기의 전력시스템구성방안과 운전특성도 분석하여 이 구성의 타당성도 제시하였다. 결론적으로 본 고의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) SFCL은 단락전류억제, 차단기단락용량의 저감, 계통의 안정도 향상 및 초전도기기의 전류용량저감등 대전류 시스템인 초전도전력시스템의 운전과 보호관점에서 SFCL의 쉐치전류레벨을 적절하게 선정하는 것은 기존 시스템의 절연레벨을 선정하는 것 못지않게 중요하다. 또한 초전도기기의 계통적용을 위해서는 다양한 계통조건에서 운전이 가능하고 신뢰성 있는 SFCL의 개발이 우선 전제되어야 한다. 교류 초전도 시스템에서 사용이 가능한 고온 초전도 SFCL의 개발도 초전도 전력시스템의 조기 구성에 중요한 요소이다. 아울러 초전도시스템의 단락전류 억제와 보호를 위하여 다수의 전류제한기를 사용하는 경우 상호 보호협조를 어떻게 할 것인가는 매우 중요한 연구과제이다.
- (2) 초전도시스템과 상전도시스템이 혼재된 계통적용 모델에서는 주로 수전단축을 연계하는 것이 계통운용상 효과적인 방법이며 특히 연계점에 SFCL을 적용하여 고장시 고장전류의 억제는 물론 이 SFCL의 특특한 기능에 의하여 고장시에도 시스템 상호간에는 고장의 영향을 완전

히 배제할 수 있다. 또한 이러한 운전시 수전단 측에 접속된 초전도 단권 변압기로 초전도케이블의 충전전류도 보상할 수 있는 시스템 구성도 가능하다.

(3) 초전도지중케이블은 현재 금속계 초전도체보다는 고온초전도체를 이용한 송전시스템이 경제성과 신뢰성 면에서 그 메리트가 우수하기 때문에 상대적 저전압으로 대도시의 전력수요가 현재 약 1.5배 이상이 되는 시점인 2010년도경에 대용량 고밀도 송전시스템 계통에 적용될 전망이다.

(4) 본 고에서 제시한 정성적인 평가기준을 토대로 우리나라의 초전도전력기기 계통적용 모델을 도심지전력공급 시스템모델과 장거리송전시스템 모델 2분야에서 제안한 결론은 다음과 같다.

(가) 도심지전력공급시스템 모델은 제 1안이 최적으로 평가되었다. 이는 도심지근교의 화력발전소에 66[kv](또는 154kv) 초전도발전기를 사용하여 변압기없이 직접 66[kv] 초전도 케이블로 초전도 외륜선에 공급되고 여기서 도심지 통과하는 66kv나 154kv의 초전도 케이블로 부하중심지 배전용변전소까지 전력을 공급하는 방안이다. 이는 변압기없이 상대적으로 저전압이기 때문에 경제성이 뛰어나고 현재의 초전도 기술로도 그 실용화 가능성도 가장 높

기 때문이다.

(나) 장거리 송전모델은 상온부분과 혼재되어 운전되는 모델인 (그림 4-7)의 제 2안이 최적모델로 평가 되었다. 전초전도 대용량 초전도 발전기에 의하여 66kv 초전도 케이블로 송압용 변전소에 송전 장거리 상전도 송전선으로 도시근교의 대용량 변전소까지 전력을 수송, 66kv나 154kv의 초전도 케이블로 도심지 전력을 공급하는 모델이다.

초전도시스템과 상전도시스템이 혼재된 모델로 신뢰성있는 초전도변압기와 SFCL의 실용화가 선결과제이다. 본 고에서 제시한 모델은 정성적인 평가에 의한 비중이 크기 때문에 계속적으로 정량적인 분석을 통하여, 그 타당성과 여러경우의 운전방안을 제시해야할 것이다. 그래야만 제한된 자원과 인력을 가진 우리나라에서도 2000년대 초반에 계통에 적용될 초전도기기의 자체개발 방향을 효과적으로 설정할 수 있을 뿐만아니라 초전도시대에 쉽게 적용할 수 있는 기반 조성에 기여할 것이다.

결론적으로 본 연구는 거시적인 관점에서 초전도기기의 운전을 중심으로 제안된 모델을 정성적인 분석을 시도하였으며 금후부터는 제안된 모델을 중심으로 정량적인 관점에서 연구가 계속적으로 진행되기를 기대해 본다.