

### 초전도기기 전류레벨협조와 절연협조를 고려한 초전도전력시스템구성을 위한 기초연구

홍원표  
대전산업대학교

## A Configuration of Superconducting Power System Considering the Current Level & Electric Insulation Coordination of Superconducting Apparatus

W.P Hong  
Taejon National University of Technology

**Abstract** -Design & operation power systems for meeting increase of electric power demand is becoming more difficult and complex. Some of limitations of conventional technology can be broken through by the application of superconductivity technology. This paper presents a new concept & image for the configuration of superconducting power system which has introduced superconducting(SC) generator, cable, transformer, fault current limiter(SFCL), SMES, etc. Engineering evaluation of each power apparatus and its assessment of application to power system were conducted. Futhermore, it is pointed that superconducting power system require a new operating condition. This is, SFCL should play a important part of quenching current level coordination to prevent the other superconducting devices from quenching. Its designing & operating condition including SFCL was discussed in viewpoint of quenching current level and insulation coordination of SC coil.

### 1. 서 론

초전도시스템에 도입되어 운전될 초전도전력기기는 경제성의 확보와 실용화 기술이 완성된다 해도 극저온상태에서의 운전방법과 초전도전류제한기를 중심으로 한 새로운 개념의 보호협조 등 종합적이고 새로운 계통운전기술을 확립해야만 가능하다. 이는 초전도기기가 상대적 저전압의 대응량으로 시스템 도입시 고전압 중심인 기존의 전력계통과는 운전조건 및 기기 파라메타 등이 다르기 때문에 새로운 개념을 가진 시스템 구성과 운전기술이 필요하다. 즉 초전도전력시스템은 변압기의 여자전류나 고장전류에 의하여 초전도기기의 초전도도체가 상전도상태로 전이(퀵치라 함)하는 초전도 고유특성도 고려해야한다. 시스템구성시 각 기기의 퀵치전류레벨을 어떻게 설정하여 운전할 것인가 즉, 퀵치전류레벨협조가 계통운전과 구성에서 가장 중요한 문제가 된다. 따라서 이의 근간이 되는 초전도전류제한기를 중심으로 한 시스템구성은 기존시스템의 절연레벨 협조 못지 않게 매우 중요한 요소이다. 이에 본 논문에서는 초전도전력기기 즉, 초전도발전기, 초전도변압기, 초전도케이블, 초전도전류제한기 및 초전도에너지 저장장치의 계통 적용형태, 초전도전력기기와 전력계통관점에서 퀵치절연레벨과 초전도기기의 절연레벨을 고려한 새로운 전력시스템 구성 즉, 초전도 전력시스템 구성을 위한 기초적인 방안을 제시하고자 한다. 현시점에서 본 논문은 제작회사에게는 초전도전력기기의 합리적인 설계방향을 제시하고 초전도전력기기의 전력계통에 적용할 수 있는 새로운 기술과 전력계통측면에서는 초전도구성기기의 합리적인 계획 및 설계를 위한 중요한 개념이 될것으로 생각된다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 초전도전력시스템 구성 대상분야

초전도전력기기는 그 경제적인 메리트와 전력계통의 새로운 기능을 가진 기기의 요구로 인하여 2000년도 초반부터는 상전도시스템에 기기 단위별로 도입될 것으로 전망된다. 그후 점차로 대도시를 중심으로 고밀도 전력공급 일원으로 상전도시스템과 초전도시스템의 장점을 극대화하기 위하여 두 시스템을 연결하여 운전하는 하이브리드 시스템을 상정할 수 있다. 그후 고온초전도선재의 실용화 기술 조기확보와 초전도 전력기기의 실용화 기술확립에 힘입어 대도시 해안발전소에서 대도시 전력을 공급하기 위한 방법과 기존의 대도시 전력공급의 한계를 극복하기 위하여 대도시의 대규모 변전소를 중심으로 초전도시스템을 구성하여 운전이 예상되는 시나리오를 예측할 수 있다. 따라서 현 전력계통의 설비단위별로 초전도기기가 도입될 분야로는 크게 3개의 대상 설비별로 제시할 수 있다. 즉 발전기의 완전초전도화, 발전소의 초전도화 및 변전소의 초전도화이다.본 논문에서는 전력시스템 구성에 영향력이 큰 변전소를 중심으로한 초전도 전력시스템에 대한 기초 개념을 제시 하였다.

#### 2.1.1. 변전소의 초전도화

이것은 서울을 포함한 경인 지역의 대도시에 기존 345kV 와 154kV 케이블 선로로 이루어진 전력구나 판로를 통해 도시권 지역에 기존케이블선로로는 한계점에 봉착할 것으로 예상되며 이의 대응을 위하여 초전도 케이블 송전을 상정하면 전력수요 및 기존 지하공간을 유효하게 이용함으로써 송전루트(route)면에서도 쉽게 해결할 수 있는 고밀도 대응량의 송전형태이다.

이와 같은 예는 그림4의 A구획에서 보는 바와 같이 현재의 345kV 지중케이블 루트에 154kV 고온 초전도케이블의 대체를 고려할 수 있다. 이와 같은 조건이 되면 초전도케이블 가격은 CV케이블을 초과하더라도 전력구 등을 포함한 전선설비용은 신설에 비하여 대폭 저감되어 냉각전력을 포함해도 송전손실은 문제가 되지 않는다. 이와 같이 고온초전도케이블을 사용하면 기설전력구나 판로를 증설 없이 사용할 수 있어 코스트다운을 도모할 수 있으며 도심지의 열악한 지하공간의 유효이용이 가능하다. 그러나 그림 5의 구획A에서 보는 바와 같이 전력이 765kV가공변전소로부터 가공계통으로 A 변전소까지 현재의 2배인 3000MW의 전력이 공급된다. A 변전소에서 지중계통이 된다면 상전도의 경우는 케이블 증설이 필요하기 때문에 증설부의 통로의 증설이 필요하다.

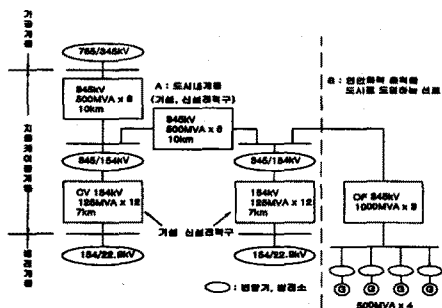


그림 1. 고온초전도케이블에 의한 모델 시스템

대도시 주변의 연안화력은 재개발되어 1지점에 수백만kW의 출력을 가지게 되며 이것을 초전도케이블에 의하여 도시 중심부로 직접 송전의 필요성이 있다. 이의 개념적 모델은 그림 1의 구획B와 같이 도입을 예상할 수 있다. B2계폐소~C2변전소~화력발전소간은 2루트의 계통을 상정한다. 1루트는 154kV, 1000MVA×2회선 10km의 관로(9공)로 초전도케이블을 신설하여 화력 2대를 B2계폐소에 직접 도입한다. 또한 별도의 루트는 154kV, 1000MVA×2회선 2.5km의 관로로 초전도케이블을 신설하여 화력2대를 변전소에 도입한다. 이때도 기존 전력구를 통하여 전력수송이 가능하다. 그림 3은 상전도 154kV CV케이블 전력구와 초전도케이블 전력구의 기하학적크기를 개념적으로 나타낸 것이다.

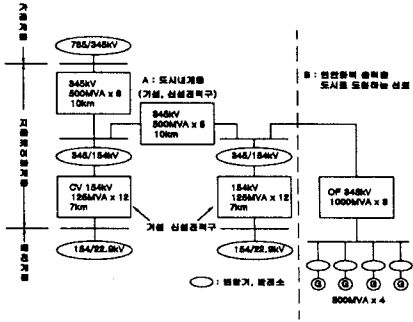


그림 2. 상전도 케이블 모델시스템

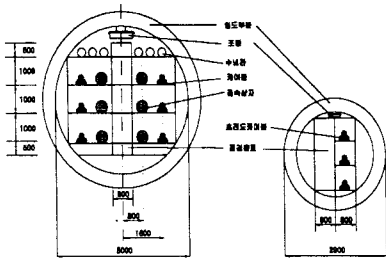


그림 3. 초전도케이블과 상전도케이블의 전력구크기의 비교

## 2.2 초전도전력시스템 구성 및 특성평가

향후 2000년도 경 서울지역의 전력수요가 약 8GVA에 달할 것으로 추정되며, 현재 경인·부산지역 환상망 전력시스템의 고장전류가 최상위 차단전류인 50kA를 상회하고 있어 단락전류억제를 위한 대책수립이 시급한 실정이다[15,16]. 초전도전력기기는 3장에서 제시한 바와 같이 상전도시스템의 단락전류억제를 위하여 초전도전류제한기가 2000년 초반에 적용이 확실시되며 '96년기준으로 서울지역의 전력수요밀도가 약 2배(15.1MW/km<sup>2</sup>)가 되는 2010년 시점에서 교류 고온초전도케이블이 대도시심지 전력공급을 위하여 도입이 불가피 할 것으로 전망된다. 따라서 본 장에서는 3장의 부분적인 전력시스템의 도입결과를 토대로 상전도시스템과 혼용운전이 이루어질 하이브리드 시스템과 대도시 전력공급을 위하여 검토되고 있는 2가지 새로운 초전도전력계통 모델을 제시한다. 이를 검증하기 위하여 관련기기의 운전조건, 운전기기의 형태와 기존 전력시스템과의 병렬운전 방식 및 초전도전력시스템 구성에 필요한 사양도 검토하였다.

## 2.3 하이브리드 시스템

### (1) 운전특성

그림 4는 하이브리드 전력시스템 모델 구성을 나타낸 것이다. 초전도기기는 우선 경제성이 뛰어난 전초전도발전기, 계통 안정화용 소규모SMES, 교류 고온초전도케이블 및 SFCL 등이다. 두 시스템은 다른 회로정수를 가지고 있기 때문에 수전단측에 연결시켜 운전하는 것이 계통운영상 유리하다. 초전도

전력기기는 현재의 기술로 제작이 가능하고 신뢰성이 확립된 급속초전도체(NbTi, AC)를 사용하고 초전도케이블과 SFCL은 고온초전도체를 사용하여 경제성을 높인다. 초전도전력시스템은 뇌서지와 개폐서지를 가급적 제외시킬 수 있도록 서지프리 시스템을 구축하여 케이블과 기기들의 BIL을 감소시켜 기기 사이즈를 최대한으로 콤팩트화하고 신뢰성을 향상시킨다. 발전기는 전초전도발전기를 사용하여 손실을 최소화시키고 대용량 발전기에 과도안정도를 보장하기 위하여 발전기 단자에 안정화용 SMES를 도입한다. 만약 기기의 신뢰성이 높아져서 펄스가 없는 초전도발전기를 사용하는 경우에는 SFCL을 발전기에 직렬로 연결하여 고장전류를 억제하고 계통안정도 향상에 기여한다. 초전도케이블의 충전용량은 (154kV, 1000MVA, 100km) 약 300MVA로 추정되며 송전전력의 약 1/3배이다.

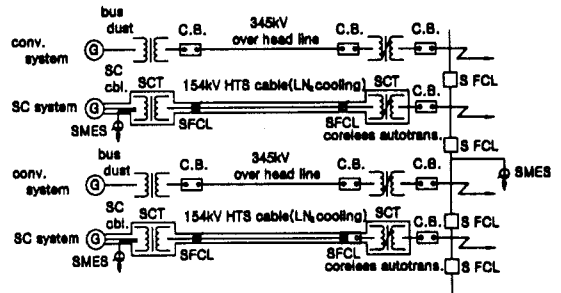


그림 4. 하이브리드 초전도전력시스템

이러한 충전전류는 수전단측에 설치하는 공심초전도 단권 변압기에 의하여 보상토록 하여 전압안정성을 도모한다. 특히 송전단을 연계하여 운전을 하는 경우에는 초전도발전기와 기존발전기사이에서 횡류가 흐르기 때문에 횡류 보상장치가 필요하고 또한 병렬운전중 계통사고 등의 고장에 의하여 재폐로가 행해지는 경우에는 초전도발전기는 한계송전전력이 기존 발전기에 비하여 크기 때문에 문제는 없지만 기존발전기는 탈조로 이어질 가능성의 검토가 필요하다. 기존시스템에서 차단기의 한계용량을 초과하는 경우에는 SFCL을 차단기와 직렬로 연결하여 차단기의 차단용량을 저감할 수 있다. 기존시스템과 초전도 전력시스템의 연계운전시 고장전류와 고장파급효과를 줄이기 위하여 수전단측에 SFCL로 두시스템을 연결시킨다.

### (2) 켄치전류레벨협조

계통의 계획, 운용, 및 보호협조는 초전도기기의 켄치의 일반적인 현상을 고려한 것으로 대전류, 대전력 시스템에서 근간을 이루는 것은 SFCL이다. 이 SFCL과 구성된 초전도기기의 정격전류와 고장시 최대전류와 사이에 적절한 전류레벨협조가 존재하여야만 초전도전력시스템의 장점을 발휘할 수 있다. 보호기로서의 SFCL의 목적은 계통의 전류순시치가 각각의 기기에 켄치전류치를 초과하기 전에 신속히 과전류를 적정레벨전류로 억제하는 장치이다. 이때 가장 중요한 사항은 초전도선재의 켄치전류레벨과 SFCL의 동작개시전류레벨의 크기를 설정하여 다양한 운전조건하에서 검토해야한다.

이 전력시스템에서 SFCL은 단락사고 등에 의한 시스템 통전전류가 동작개시전류  $I_{start}$ 에 달하면 보호동작을 개시한다. 이 동작은 큰 임피던스를 신속하게 발생하여 과전류를 소정의 전류레벨  $I_{limit}$ 이하로 하여 피보호기의 켄치를 방지한다. 또한 변압기등의 피보호기에 있어서의 초전도선의 켄치전류  $I_{quench}$ 는 SFCL의 동작개시전류보다 크게 된다. 동작개시전류에 대하여 피보호기 켄치전류의 비  $m$ 을 켄치보호여유도라 하며 여기서  $m$ 이 1에 가까우면 여유도가 작고 시스템 전체의 신뢰도가 낮아진다.  $m$ 이 크면 피보호기가 과잉 설계될 가능성이 있으며 따라서  $m$ 을 어느 정도 설정할 것인가가 켄치보호상의 중요한 과제이다. 반면 정격전류  $I_N$ 에 대하여 동작개시전류의 비를  $k$ 라하고 시스템운영상의 여유도라 한다.  $k$ 가 1에 가까우면 과부하에의한 계통전류가 동작개시전류를 초과할 수 있어 SFCL이 과민동작할 수 있고 반면  $k$ 가 크게되면 SFCL이 보호기로서의 기능을 상실할 위험이 있다. 따라서  $k$ 값의 적절한 설정이 시스템운영에 중요한 문제가 된다. 또한 변압기 여자돌입전류  $I_{rush}$ 도 동작개시전류를 설정레벨의 결정에 중요한 영향을 미친다. SFCL의 동작개시전류를 여자돌입전류보다 높게 설정하되 시스템 전체의 전류레벨 협조를 원활히 하기 위하여 초전도변압기의 여자돌입전류를 줄이기 위하여 철심의 자속밀

도를 공심(core less)을 사용하는 방법 이런 방법이 어려운 시스템에서는 전원 투입시 위상을 조정, 돌입전류를 낮게하여 SFCL과 전류레벨 협조를 도모해야한다. 본 저자의 논문에 의하면 L형SFCL을 변압기 고압측에 설치하는 방식이 단락전류억제에 매우 효과적 방식이라고 제시 한 바 있으며 따라서 하이브리드시스템 고압측에 SFCL을 설치한 모델이다. 또한 L형이 R형SFCL보다도 후비보호로 사용되고있는 거리 계전기와의 보호협조 측면에서도 유리하다. 그러나 보호계전기와 협조문제는 SFCL의 기본파라메타 계통의 조건 등에 따라서 그 적용효과가 다르기 때문에 계통과 연계된 해석이 필요하다. 따라서 표1은 전류레벨협조에 그간이 되는 SFCL 파라메타의 설정방법 및 범위를 개념적으로 제시한 것이다.

표 1. SFCL의 주요 파라메타의 개념적인 설정방법

파라 메타	설정방법 및 범위
동작개시전류	SFCL의 동작책무, 부동작책무를 고려, 사고시에 건전회선에 흐르는 최대전류보다 크고, CB의 차단 용량이야에서 설정가능, 대칭좌표법을 이용하여 최대전류의 분포를 구하여 건전회선에 흐르는 최대전류 (실최치에 대해서) 과도 직류분을 고려하여 그 2배 값 이상으로 설정하는 것이 간편하다.
최대전류제한저항	SFCL이 동작한 경우에 기간계통의 보호시스템 (주보호: 전류차동, 후비보호: 거리) 의 용동에 영향을 주지 않는 범위에서 선정, 거리계전기에서 보호대상이 송전선인 경우 송전선 리액턴스까지가 상한이다. 하한은 최대제한전류를 고려할 필요가 있다.
동작시간	여러 가지 동작 파라메타에 영향을 미치지않아 적절한 최종전류제한 저항 하에서는 그다지 문제가 되지 않는다. 확실한 보호용동을 기대하기 위해서는 적절한 최종전류제한저항을 가지고 빠른 동작특성을 가지는 것이 바람직하다. 또한 소비에너지면에서도 유리하다.
최대제한전류	SFCL의 도체의 설계와 직렬기기의 전류내량 등에 영향을 주기 때문에 중요한 파라메타이다. 기본파라메타 및 계통조건등에 관련이 있기 때문에 적용계통을 결정할 시에는 시뮬레이션 등에 의하여 확인 할 필요가 있다. 최대제한전류가 차단기의 차단용량이하가 되도록 설정한다.
최종고장전류	기본 파라메타 및 계통조건과도 연관이 있기 때문에 적용계통이 결정된 경우, 시뮬레이션에 의하여 확인할 필요가 있다. 최종전류제한저항에 크게 의존한다. 발열면에서는 이저항이 크면 좋지만 보호용동면에서는 제약이 있다.

(3) 초전도코일의 절연협조

초전도전력기기는 초전도케이블을 제외하고는 거시적인 관점에서 초전도코일 형태로 볼 수 있다. 초전도코일의 절연협조에 대한 메카니즘을 규명하기 위하여 내부유기전압 특성, 전기 절연환경(냉각방식) 및 절연열화기구등 다각적인 해석이 필요 하지만 본연구에서는 합침형각 초전도코일의 절연설계 방법의 기초적인 개념을 제시한다. 초전도 코일에서는 초전도기기의 고유한 현상인 퀸치의 발생을 고려할 필요가 있고 그때에 냉매의 상태변화가 일어나기 때문에 출현전압에 대한 절연계의 내전압비가 시간에 따라 변하게 된다. 이것을 고려한 침적냉각 초전도코일의 절연설계 프로우 차트의 개요를 나타내면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 그림의 좌측 칼럼은 정상운전조건하에서의 냉매상태를 추정하고, 그 경우의 절연유도가 설정 안전율이 되도록 절연거리  $d_0$ 을 가결정한다. 이 경우의 절연유도는 시간에 무관하게 결정한다. 다음은 우 칼럼과 같이 퀸치가 발생할때의 냉매상태를 추정한다. 이 경우 냉매상태는 도체 조건, 정상운전조건 및 퀸치보호방식에 영향을 받으며, 퀸치발생후의 시간(t)경과와 함께 변화한다. 또한 퀸치 후 발생전압도 퀸치초기치 즉 정상운전조건과 보호방식에 영향을 받으며 시간(t)와 함께 변화한다. 이 퀸치 후의 절연유도  $\eta_0$ 도 시간과 함께 변화한다. 절연유도의 최저치  $\eta_m$ 이 퀸치 시의 절연에 대한 안전율로 되고 이것이 설정안전율과 같아지도록 절연거리  $d_0$ 을 假 결정한다. 최종적으로는  $d_0$ 과  $d_0$ 의 큰 값이 설계에 이용되는 절연거리 d가 된다. 여기서의 침적냉각초전도코일절연설계에 관한 검토과제를 그림5와 같이 제시하였다.

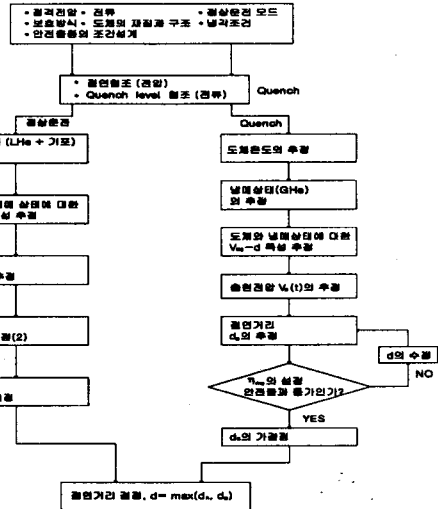


그림 5. 합침형 초전도코일 절연설계 프로우차트

3. 결론

논문은 초전도기기가 계통에 도입될 경우 초전도전력시스템 구성을 위한 새로운 개념을 제시하였으며 또한 초전도전력계통을 구성하는 기기 및 초전도전력시스템의 특성을 평가하여 시스템 구성을 위한 새로운 운전조건들을 제안했다. 특히 이 시스템의 계획과 운용에 핵심이 되는 SFCL을 중심으로 한 초전도기기의 전류협조방안과 퀸치를 고려한 절연설계가 초전도전력시스템의 운전과 계획에서 핵심적인 역할의 필요성을 검토하였다. 본 논문의 구체적인 연구 결과는 다음과 같다. (1) 초전도전력시스템의 적용대상을 초전도발전기의 완전초전도화, 발전소의 초전도화 및 대용량발전소의 초전도화를 위한 모델 계통을 제안했다. (2) 초전도전력시스템과 상전도시스템과의 운전모델을 제시하고 특성을 평가하였다. (3) 초전도시스템 모델 계획과 운전을 위하여 초전도전류제한기의 파라메타를 정의하고 이를 중심으로 한 새로운 개념의 전류레벨협조방안과 합침형 절연설계를 고려한 운전상특성을 분석하였다. 본 논문은 초전도기기의 전력계통적용 평가와 초전도전력시스템의 구성을 위하여 운전특성의 새로운 개념들의 정립에 주안점을 두었으며 앞으로 다양한 운전조건에 따라서 시뮬레이션을 통한 해석이 지속적으로 필요하며 특히 SFCL과 계통인터페이스의 종합적인 보호협조를 위한 지속적인 연구가 필요하다.

(참 고 문 헌)

[1] 홍원표, "초전도 전력기기 전력계통적용모델 제안", 대전산업대학교 논문집, 제12권 2집, pp. 261-276, 1995.  
 [2] 기초전력공학공동연구소(중간보고서), "초전도 전력기기의 적정규모의 산정 및 계통적용기술개발", 95-지-08, 1996년 8월.  
 [3] 기초전력공학공동연구소(중간보고서), "초전도전력기기의 적정규모 산정 및 계통적용기술개발(초전도전류제한기를 중심으로)", 95-지-08, 1997.  
 [4] P.M. Grant, "Superconductivity and Electric Power : Promises, Promises... Past, Present and Future", IEEE Trans. on applied superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 112-133, June 1997.  
 [5] "초전도케이블 및 송전시스템 개발연구", 전력연구원 (KEPRI-93S-J03), 1995.7.  
 [6] 홍원표, "초전도전력시스템에서의 초전도전류제한기의 운전방안", 대전전기학회 1996년도 하계학술대회 논문집-B, pp. 764-767, 1996.