

22.9kV 초전도케이블 실계통 도입방안에 대한 세부계통검토

이승렬 김종율 윤재영  
한국전기연구원

A study on the application of 22.9kV HTS Cable in Korean Power System

Seung Ryul Lee Jong Yul Kim Jae Young Yoon  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - As power system is developed, an expansion of power equipments is very necessary to the stability of power system and the problem of locating the facilities on downtown is more serious. At this time introduction of superconducting devices are very good alternative to solve the problem. This study describes cases possible to apply 22.9kV HTS cable to power system and analyzes the power system with HTS cable.

성이 높을 것으로 판단되는 22.9kV급 초전도케이블에 초점을 두어 검토하였다. 22.9kV급 초전도케이블의 실제 적용가능 CASE를 상정하면 <표 1>과 같다.

3. 사례연구

3.1 CASE-CAB-L1

한전 배전계통 구성원칙에 의하면, 22.9kV feeder 1개에 부하최대량은 10MW이며, 이를 초과할 경우에는 154kV 수전을 해야한다. 즉, 현재 10MW 이하로 수전하는 22.9kV 수용가의 부하가 급증하여 10MW를 초과하는 경우, 22.9kV 수용가는 수전전압레벨을 154kV로 격상해야한다. 본 사례는 이러한 경우 154kV급으로 전압레벨을 승격하는 대신에 50MVA급 22.9kV 초전도케이블로 대체하는 경우에 대한 검토이다. 이렇게 부하의 증가로 인해서 22.9kV 수용가가 추가용량을 확보하기 위해서 선로를 증설하거나 154kV 수용가로 전압레벨을 격상해야 하는 경우, 22.9kV 초전도케이블을 적용한다면, 증설선로를 위한 추가적인 관로공사가 필요없으며 154kV로 전압을 격상하지 않아도 되므로 경제적인 면에서 매우 유리하다는 장점이 있다. 이와 같이 본 사례는 다양한 관점에서 충분한 적용가능성이 있을 것으로 판단되어 초전도케이블 적용시의 검토사례로서 선정하여 계통해석을 수행하였으며, 세부 내용은 다음과 같다.

1. 서 론

국내 전력계통은 고도의 경제성장과 더불어 전 세계적으로 그 예를 찾아볼 수 없을 정도의 급성장을 이루어왔다. 이에 따라 전력설비의 확충이 필수적이게 되었지만 환경문제, 민원 등으로 인한 입지문제로 전력설비 확충에 어려움이 있다. 특히 송전선로는 대도시의 경우 높은 부하 밀도와 부하증가율에 비해 송전선로 추가 확충을 위한 경과지 확보가 거의 불가능하여 지중화가 불가피하다. 이러한 지중송전선로 역시 현재로서는 회선당 송전용량 증대 및 입지조건의 악화 등으로 인하여 한계에 부딪힌 상태이다. 이러한 시점에서 저전압대용량 송전이 가능하며 송전손실을 크게 저감시킬 수 있는 초전도케이블은 매우 좋은 대안의 하나로서 대두되고 있다. 만약 초전도 케이블을 적용하는 경우 동일 크기로 대용량송전이 가능하여 송전선로 회선수를 줄일 수 있으므로 송전관로(지하전력구, 동도) 건설비를 대폭적으로 경감시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 대도시 부하밀집지역에서 매우 높은 경쟁력을 가질 것으로 예상되는 22.9kV 초전도케이블 도입방안에 대한 계통검토를 수행하였다.

3.1.1 계통구성

22.9kV 수용가 계통에 대한 상세해석은 배전급의 계통해석이므로 EMTDC 계통해석을 수행한다. 대상계통으로는 <그림 1>과 같이 실계통을 등가화한 임의의 3모선계통에서 배전계통 (B) 부분의 Sub-system 내부의 22.9kV 부하 중 하나를 대표수용가로서 가정하여 <그림 2>와 같이 구성하였다. 본 사례계통의 대표적 계통 데이터는 다음과 같다.

2. 초전도케이블 적용가능사례 선정

실계통에서 초전도케이블을 적용하기 위한 적용가능개소를 도출하기 위해서 우선 검토 CASE로서 154kV급과 22.9kV급에 대해서 각각 수용가계통과 전력회사계통을 고려할 수 있지만, 본 연구에서는 상대적으로 경제

- 전원 등가임피던스(모선 1 및 2의 수치 동일)
  - 국내 154kV 계통에서의 고장전류 수준은 차단기의 정격용량인 50kA 미만이므로, 이를 고려하여 2 개의 전원에서 유입되는 고장전류량의 합을 40kA정도로 가정하였다. 따라서 각각의 전원단에서 발생하는 고장전류가 20kA정도가 되도록 아래와 같이 전원의 등가임피던스를 산정하였다.
  - $ZS1 = ZS2 = 4.579 \angle 85^\circ \Omega$  (등가전원에서 유입되는 고장전류량 = 20kA 기준)
- 154kV 등가전원 전압
  - 일반적으로 실계통에서 발전단 모선이 아닌 부하 및 중간모선에서의 모선전압은 대부분 1.0 p.u. 이상이므로 본 검토에서는 1.03 p.u. 즉,

<표 1> 초전도케이블 적용가능 CASE 및 해석방법

해석사례	적용대상 및 적용방법	용량	해석방법
CASE-CAB-L1	10MW 초과 22.9kV-수용가	50 MVA급	EMTDC 계통해석
CASE-CAB-L2	154kV 수용가 22.9kV 초전도케이블 적용	200 MVA급	PSS/E 계통해석
CASE-CAB-U1	22.9kV 기존 케이블을 22.9kV 초전도케이블로 대체	50 MVA급	EMTDC 계통해석
CASE-CAB-U2	154kV 기존 케이블을 22.9kV 초전도케이블로 대체	200 MVA급	PSS/E 계통해석

\* L은 수용가계통, U는 전력회사계통

158.62kV로 가정하였다.

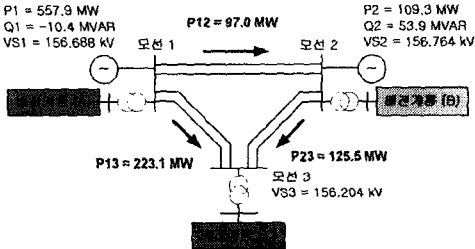
- 모선의 위상각은 선로에 흐르는 전력조류와 관계가 되며, 본 검토에서는 적절한 전력조류의 흐름이 발생하도록 아래와 같이 위상각을 임의로 선정하였다.

- 모선 1 : VS1 = 158.62∠5°kV
- 모선 2 : VS2 = 158.62∠0°kV

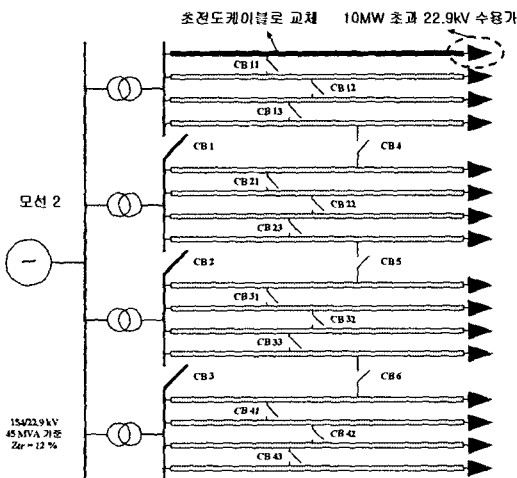
○ 부하 데이터 (역률 = 0.93 으로 가정)

- 국내 전력계통에서 부하의 역률은 계통운영시점과 부하수준에 따라서 0.91 ~ 0.95 사이의 값을 가지므로 본 검토에서는 평균값인 0.93으로 가정하여 부하를 아래와 같이 결정하였다.

- 배전계통 A : PL1 = 240 MW, QL1 = 96 MVAR
- 배전계통 B : PL2 = 80 MW, QL2 = 32 MVAR
- 배전계통 C : PL3 = 360 MW, QL3 = 144 MVAR



<그림 1> CASE-CAB-L1 154kV 기본계통



<그림 2> CASE-CAB-L1 배전계통(B) 상세 구성도

여기서, 수용가의 초기부하는 P = 5 MW이며 향후 이 부하가 급증하여 20MW로 증가하는 경우를 가정하여 계통해석을 수행하였다. 상기 구성한 22.9kV 수용가계통에 대한 세부데이터는 다음과 같다.

- 부하(수용가) 데이터 : 3상 부하모델 개발적용 (부하역률=0.93 기준)

- 검토대상 수용가 : PL = 20 MW, QL = 8 MVAR
- 기타 부하 : PL = 5 MW, QL = 2 MVAR

- 선로데이터
  - 선로길이 = 1 km
  - 기존케이블 ( CNCV 325mm<sup>2</sup> 케이블 )
    - R = 0.17905837e-4 [pu/m]
    - L = 0.28451021e-4 [pu/m]
    - C = 0.71171248e-6 [pu/m]
  - 초전도케이블
    - R = 상전도케이블 × 0.001
    - L = 상전도케이블 × 0.5
    - C = 상전도케이블 × 0.75

3.1.2 해석결과

CASE-CAB-L1의 해석결과를 나타내면 <표 2, 3>과 같다. 결과에서 알 수 있듯이 전력조류 측면에서는 특이 사항이 나타나지 않지만, 전압 측면에서는 약간의 전압강하가 나타난다. 이러한 전압강하는 초전도케이블의 특성으로 인한 현상이 아니며, 부하가 증가함에 따라 증대된 전력조류로 기인한 결과이다. 오히려 다수의 일반 상전도케이블을 적용하는 경우에 비해서 초전도케이블을 적용하는 경우가 선로임피던스가 작으므로 전압강하 면에서는 유리한 점이 있다. 본 검토결과에서 나타난 전압강하 수준은 배전계통의 전압강하 허용기준인 10%를 초과하지 않으므로 큰 문제는 되지 않을 것이며, 만약 전압강하 문제가 있는 경우가 발생한다면, 조상설비 등의 투입으로 충분히 극복 가능할 것으로 판단된다.

<표 2> BASE-CASE<sup>\*)</sup>/CASE-CAB-L1 전력조류결과

항목	전력조류방향 및 전원단모선	조류량 및 전력유입량 [MW]	
		BASE CASE	CASE-CAB L1
전력조류	1 번 모선 → 2 번 모선	97.0	101.4
	1 번 모선 → 3 번 모선	223.1	225.1
	2 번 모선 → 3 번 모선	125.5	123.1
전원단 전력유입량	P1 (1번 모선)	557.9	564.1
	P2 (2번 모선)	109.3	116.6

\*BASE-CASE : 부하 증가 전(초전도케이블 적용 전)

<표 3> BASE-CASE/CASE-CAB-L1 전압결과

전압계급 [kV]	모선	전압 [kV]		전압 [PU]		비고
		BASE-CASE	CASE-CAB-L1	BASE-CASE	CASE-CAB-L1	
154	VS1	156.688	156.54	1.017455	1.016494	송전계통
	VS2	156.764	156.596	1.017948	1.016857	
	VS3	156.204	156.045	1.014312	1.013279	
22.9	VL211	22.7865	22.3344	0.995044	0.975301	22.9kV 수용가
	VL212	22.7865	22.3272	0.995044	0.974987	배전계통
	VL213	22.7865	22.3272	0.995044	0.974987	배전계통
	VL214	22.7865	22.3272	0.995044	0.974987	배전계통

상기 검토결과를 볼 때, 본 사례(10MW 초과 22.9kV 수용가)는 기술적인 측면에서 초전도케이블의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 물론 부하급증에 따른 부하단 전압강하문제가 발생할 가능성이 약간은 존재하지만, 조상설비 투입 등의 기술적인 대안으로써 충분히 극복 가능하다. 본 사례는 기술적으로는 적용가능성이 있지만, 적용가능한 특정 사례를 찾아야할 뿐만 아니라 경제적인 측면에서는 각 CASE 별로 고려해야하는 경제성 평가요소가 매우 다양하므로 이에 대한 세밀한 경제

성 평가가 필수적이다.

### 3.2 CASE-CAB-L2

#### 3.2.1 사례선정

본 사례는 154kV 수용가 계통의 부하의 증가로 인해 선로 증설이 필요한 경우, 154kV 상전도케이블과 비슷한 용량을 갖는 22.9kV 초전도케이블을 적용하는 방안이다. 22.9kV 초전도케이블을 적용하는 경우, 기존 154kV의 1공 1조 포설용 관로에 비슷한 용량의 22.9kV 초전도케이블을 1공 3조 포설할 수 있으므로 관로 활용 면과 용량증대 면에서 매우 큰 이점이 있다. 실계통의 모든 수용가에 대한 초전도케이블 적용 가능성을 판단하기 위한 검토는 현실적으로 불가능하므로 본 사례에서는 우선 154kV 수용가로서 154kV 모선의 모든 부하를 154kV 수용가로서 가정을 하였다. 또한, 실계통에서 모든 부하의 향후 증가량을 예측하는 것은 매우 어려운 문제이므로, 본 연구에서는 2010년도의 수용가 계통에 대해서 초전도케이블을 적용하였을 경우의 기본적인 계통특성을 검토하기 위한 CASE를 선택하였다. 우선, 부하밀집지역인 서울지역(서울전력관리처 및 남서울전력관리처)에서 케이블로서 수전하는 모든 말단부하를 대상으로 하였으며, 이 중에서 선로의 길이 및 말단 부하 크기에 따른 결과비교를 위해서 다음 표와 같이 수용가(말단부하) 계통 CASE를 선정하였다.

<표 4> CASE-CAB-L2 해석대상 CASE

초전도케이블 적용 대상선로		부하 [MVA]	해석 CASE
From	To(수용가)		
옥인	운니	31.13 MVA	CASE-CAB-L2-1
신길	봉천	105.55 MVA	CASE-CAB-L2-2
신내	중계	120.00 MVA	CASE-CAB-L2-3
성동1	왕십리	121.11 MVA	CASE-CAB-L2-4

#### 3.2.2 해석결과

154kV 수용가에 대해 22.9kV 초전도케이블로 대체한 후의 결과를 나타내면 아래 <표 5>와 같다. 전체적으로 약간의 전압저하현상이 발생하며, 선로에 흐르는 전류조류량에 비례하여 전압강하문제가 심각함을 알 수 있다. 그러나, 대규모 부하가 있는 경우라고 할지라도 기존에 전압문제를 해결하기 위해서 조상설비가 투입된 경우에는 상대적으로 전압강하 정도가 적게 나타나고 있으며, 추가적인 조상설비를 투입한 결과 전압강하문제가 해소되는 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로, 22.9kV 초전도케이블을 적용시 나타나는 전압강하문제는 조상설비를 투입함으로써 해결 가능할 것으로 판단된다. 본 사례 검토 결과 154kV 말단변전소의 수전선로를 22.9kV 초전도케이블로 교체하는 경우, 기술적인 관점에서는 대체적으로 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 경제적인 관점에서는 검토사례별로 상세검토가 필요하다.

### 3.3 CASE-CAB-U1

본 사례는 전력회사의 배전계통에 대한 검토이다. 배전계통의 경우, 수용가 계통과 전력회사 계통에 큰 차이가 없다. 즉, 계통구성은 같고 단지 계통의 소유권이 민간사업자와 전력회사라는 차이가 있는 것이다. 그러므로 본 사례의 계통구성 및 초전도케이블 적용시의 계통현상은 상기 검토한 CASE-CAB-L1(10MW를 초과하는 22.9kV 수용가에 초전도케이블을 적용)과 동일하므로 상세 계통검토는 생략한다.

<표 5> CASE-CAB-L2 전압 및 고장전류 결과

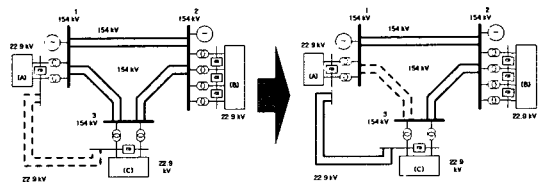
CASE	모선	전압 계급 [kV]	전압 [pu]	
			HTSC 적용 전	HTSC 적용 후
CASE CAB-L2 - 1	옥인(1490)	154	1.04163	1.03660
	운니(1435)	154	1.04159	-
	옥인221(1491)	22.9	-	1.01832
	옥인222(1492)	22.9	-	1.01832
	운니221(1435)	22.9	-	1.01538
CASE - CAB L2 - 2	운니222(1436)	22.9	-	1.01538
	신길(2415)	154	1.03535	1.02989
	봉천(2745)	154	1.03489	-
	신길221(2416)	22.9	-	0.95326
	신길222(2417)	22.9	-	0.95326
CASE - CAB - L2 - 3	봉천221(2745)	22.9	-	0.94154
	봉천222(2744)	22.9	-	0.94154
	신내(1740)	154	1.04025	1.03407
	중계(1985)	154	1.04014	-
	신내221(1741)	22.9	-	1.00128
CASE - CAB - L2 - 4	신내222(1742)	22.9	-	1.00128
	중계221(1985)	22.9	-	0.99502
	중계222(1985)	22.9	-	0.99502
	성동1(1610)	154	1.04325	1.04060
	왕십리(1611)	154	1.04319	-
CASE - CAB - L2 - 4	성동221(1615)	22.9	-	0.95521
	성동222(1616)	22.9	-	0.95521
	왕십리21(1617)	22.9	-	0.95387
	왕십리22(1618)	22.9	-	0.95387

### 3.4 CASE-CAB-U2

본 사례는 저압대용량 송전관점에서 기존 154kV 케이블을 22.9kV급 초전도케이블로 교체하는 경우로서, 최종적으로 기존 도심내 154kV 변전소를 22.9kV 개폐소로 전환할 수 있을 뿐만 아니라 신설 예정인 154kV 변전소를 생략할 수 있는 가능성도 제공한다. 따라서 도심내 입지난을 해결할 수 있을 있으며, 경제적인 이익 역시 막대할 것으로 기대된다.

#### 3.4.1 계통구성

EMTDC 검토대상계통은 3.1절에서 구성한 EMTDC 기본계통을 대상으로 하였다. 본 사례는 154kV 기존케이블을 22.9kV 초전도케이블로 교체하는 경우이므로 위에서 구성한 기본계통에서 모선 1과 모선 3 사이의 154kV 기존케이블 대신, 22.9kV 초전도케이블을 적용하여 해석하였다. 기본데이터는 위의 기본계통 구성시 사용한 데이터를 그대로 사용하였으며, 모선 1 과 모선 3 사이의 22.9kV 초전도케이블 데이터는 기 개발한 초전도케이블 모델을 이용하였다.



<그림 3> 22.9kV 초전도케이블 교체 개념도

#### 3.4.2 해석결과

EMTDC 계통검토는 우선, 위의 그림에서 기존 154kV 상전도케이블로서 구성되어 있는 3모선계통에 대한 기본 조류해석을 한 후, 1번 모선과 3번 모선 사이에 22.9kV 초전도케이블을 적용한 후 조류해석을 수행하였다. 상세 검토결과는 다음과 같다.

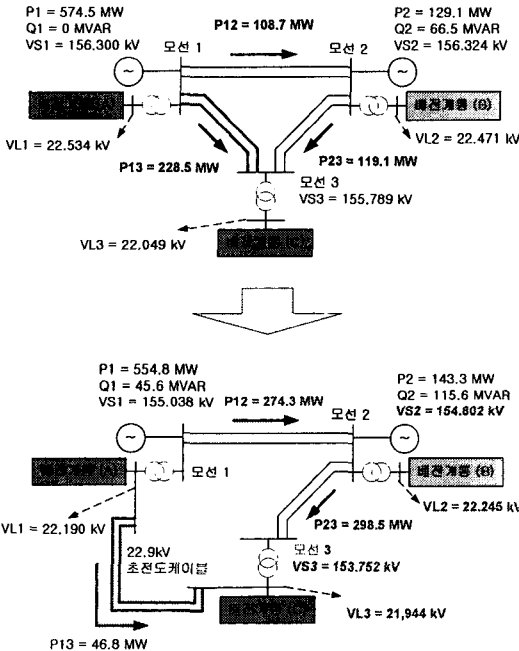
<표 6> 초전도케이블 적용 전후 전력조류 결과

항목	전력조류방향 및 전원단모선	조류량 및 전력유입량 [MW]	
		BASE CASE	CASE CAB-U2
전력조류	1번 모선 → 2번 모선	108.7	46.8
	1번 모선 → 3번 모선	228.5	274.3
	2번 모선 → 3번 모선	119.1	298.5
전원단 전력유입량	P1 (1번 모선)	574.5	554.8
	P2 (2번 모선)	129.1	143.3

주) BASE CASE : 초전도케이블 적용 전  
CASE CAB U3 : 22.9kV 초전도케이블 적용 후

<표 7> 초전도케이블 적용 전후 전압결과

전압 계급 [kV]	모선	전압 [kV]		전압 [pu]	
		BASE CASE	CASE-CAB-U2	BASE CASE	CASE-CAB-U2
154	VS1	156.300	155.038	1.014935	1.00674
	VS2	156.324	154.802	1.015091	1.005208
	VS3	155.789	153.752	1.011617	0.99839
22.9	VL1	22.534	22.190	0.984017	0.968996
	VL2	22.471	22.245	0.981266	0.971397
	VL3	22.049	21.944	0.962838	0.958253



<그림 4> CASE-CAB-U2 해석결과 요약

위의 결과에서 154kV 상전도케이블을 22.9kV 초전도케이블로 교체하는 경우, 초전도케이블로 전력조류가 적게 흐름을 확인할 수 있다. 전력조류는 선로임피던스 및 전압계급에 따라서 결정되는데, 22.9kV 초전도케이블의 자체용량은 크지만 전압계급 및 선로임피던스가 기존 154kV 상전도케이블과 비교했을 때 큰 차이가 있기 때문에 22.9kV 케이블의 전력조류가 적게 흐르는 것이다. 22.9kV 초전도케이블로 전력이 적게 흐름에 따라서 나머지 조류가 주변의 선로로 우회하여 흐르기 때문

에 기타 선로에서 과부하가 발생하게 된다. 이러한 문제는 특정개소에 국한되는 것이 아닌 일반적인 현상이므로 본 사례의 실계통 적용시 반드시 해결해야 할 사항이다. 즉, 송전계통망 내에서 154kV 상전도케이블을 22.9kV 초전도케이블로 교체하는 경우, 조류배분문제 및 과부하문제가 발생할 가능성이 있으며, 실계통 적용시 이러한 문제가 발생하지 않는 특수개소를 탐색하거나 기타 대안을 제시할 필요성이 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 22.9kV 초전도케이블의 실계통 적용 가능성을 판단하기 위해서 계통적용가능 사례를 도출하였으며, 각 사례에 대해서 세부계통해석을 수행하였다. 각 사례별 계통적용 필요성 및 가능성 결과를 <표 8>에 나타내었다.

<표 8> 사례별 계통적용 필요성 및 가능성 결과

해석 CASE	적용대상 및 적용방법	계통적용 필요성 및 가능성
CASE-CAB-L1	10MW 초과 22.9kV-수용가	보통
CASE-CAB-L2	154kV 수용가 22.9kV 초전도케이블 적용	보통
CASE-CAB-U1	22.9kV 기존 케이블을 22.9kV 초전도케이블로 대체	높음
CASE-CAB-U2	154kV 기존 케이블을 22.9kV 초전도케이블로 대체	매우 높음

상기 검토결과에서 알 수 있듯이 (CASE-CAB-U2 : 154kV 기존케이블을 22.9kV 초전도케이블로 대체) 방안이 가장 적용효과가 클 것으로 판단된다. 또한, 본 연구결과에서 알 수 있듯이 CASE-CAB-U2의 경우, 전압 및 조류배분 문제가 발생할 수 있으므로 실계통에서 22.9kV 초전도케이블을 도입하기 위해서는 우선 수용가 및 말단부하계통에서부터 적용하고, 차츰 도입의 154kV 기존케이블을 22.9kV 초전도케이블로 교체하는 방안을 모색해야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

“본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.”

#### [참고 문헌]

- [1] Ladie Pieluigi, Mansoldo Andre "HTS Cable application studies and technical/economical comparisons with conventional technologies", PES-WM 2002
- [2] Richard Silbergliitt, Emile Etedgui, Anders Hove "Strengthening the Grid : Effect of High Temperature Superconducting Power Technologies on Reliability, Power Transfer Capacity and Energy" RAND, 2002
- [3] KEPCO, "Long-Term prospects for transmission system" 2002
- [4] Jae-Young Yoon, Jong Yul Kim, Seung-Ryul Lee "Conceptual application methodology of 22.9kV HTS cable in metropolitan city of Republic of Korea", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol.6, No.2, pp15 - 19, 2004