

## 전압 안정도 제약계통에 대한 고온초전도 케이블 적용효과

(Effects of HTS Cable Applied to the Voltage Stability Limited Power System)

이근준<sup>\*</sup> · 황시돌

(Geun-Joon Lee · Si-Dol Hwang)

◎ ◎

본 논문은 전력계통의 전압 안정도 제약 문제를 해결하는데 고온 초전도 케이블을 적용하기 위한 기법을 제시하였다. 대전력계통의 유효 송전용량은 종종 전압 안정도 제약에 의해 결정된다. 기존의 초전도 케이블 용용 연구는 주로 도심지역의 고밀도 전력 수송 문제를 해결하는 대안으로 연구의 초점을 두어왔지만, 고온 초전도 케이블의 선로정수 개선효과를 이용하면 전압 안정도로 제약된 계통의 송전용량을 증가시킬 수 있어 그 용용 범위가 확대될 수 있다. 전압 안정도에 의한 최대 수송전력을 결정하는 데는 IPLAN에 의한 P-V곡선을 이용하였고, 대체 대상선로는 부하 증가시 무효전력 손실감도가 가장 큰 선로로 하였다. 결과의 타당성을 검증하기 위해 IEEE 14모선 계통을 사용하였으며, 적용결과 Case II는 70[%], Case III에서는 160[%]의 추가 수송 능력 증가를 가져올 수 있었다.

### Abstract

This paper presents the basic application idea of superconductor cable for voltage stability limited power system. In bulk power system, the transfer capability of transmission line is often limited by the voltage stability, and superconductor cable could be one of the countermeasure to enhance heat transfer limit as well as voltage stability limit. Steady state voltage stability approach by P-V curve is used to calculate the maximum transfer capability of initial system and superconductor applied system. IEEE-14 bus system is used to demonstrate its applicability.

Key Words : Voltage Stability, Transfer Capability, HTS Cable, Reactive Loss Sensitivity Index, P-V Curve

### 1. 서 론

우리나라는 지속적 평균 6.7[%]의 지속적 부하 성장과 서울지역의 냉방부하의 꾸준한 증가로 도심의

송전선로 과부하 문제가 심각한 단계이며, 이로 인한 북상조류의 증가는 전압안정도 제약으로 인한 송전선로 혼잡비용을 증가시켜 전력시장 하에서 완전한 경쟁을 제약하는 요인이 되고 있다[1].

고온 초전도 케이블은 그간 도심의 고밀도 부하전력 수송수단으로 꾸준히 검토되어 왔으며[2-6], 제작기술의 발전으로 외국에서는 실증 시험 중으로 우리나라에서도 현재 산·학·연 협력으로 고온 초전도 케이블의 배전 전압급 실증시험을 위한 실증 시

\* 주저자 : 충북과학대학 전기에너지시스템과 교수  
Tel : 043-730-6321, Fax : 043-730-6329  
E-mail : gjlee@ctech.ac.kr  
접수일자 : 2004년 6월 9일  
1차심사 : 2004년 6월 14일, 2차심사 : 2004년 7월 15일  
심사완료 : 2004년 7월 26일

## 전압 안정도 계약계통에 대한 고온초전도 케이블 적용효과

험장을 구축 중이어서[7,8,9] 향후 전력시스템의 새로운 응용 연구 분야로서 주목받고 있다. 그러나 HTS 케이블 케이블은 기존의 XLPE 케이블과는 구조 및 특성에서 많은 차이가 있으며[4], 특히 웬치 현상을 제어 가능하도록 해야 하므로 전력계통에 적용할 경우 HTS 케이블의 장점인 대전력 수송과 케이블 시스템의 안전성을 보장할 수 있도록 계통계획/운용상의 연구가 필수적이다.

Jon Jipping[3] 등은 미래 부하성장에 대비하여 HTS cable의 적용타당성을 열용량과 고장전류 측면에서 검토하였고, Diego[4] 등은 고전압 송전선로를 HTS cable로 대체할 경우 기술적 경제성을 검토하였으며, K.C.Seong[5] 등은 미래 전력계통의 수송력 문제를 조류계산 측면에서 검토하고 HTS cable의 적용타당성을 검토하였지만 전압안정도 측면의 검토는 시도하지 않았다.

본 논문은 HTS 케이블의 전기적 특성이 우리나라의 송전계통의 과제인 전압 안정도 문제를 푸는데 얼마나 기여하는지를 보여주기 위한 것이다. IEEE 14 샘플 모선 계통을 사용하여 초전도 케이블을 적용하기 이전의 수송능력과 적용 이후의 수송능력을 전압 안정도 관점에서 구한 후 그 결과를 상호 비교함으로서 HTS 케이블의 적용 가능성을 이전의 단순한 송전선로 열용량 한계 제약 제거 뿐만 아니라, 전압 안정도 제약 분야에도 응용할 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 대상모의시스템

초전도 케이블의 전압 안정도 제약 완화 효과를 검토하기 위한 모의 시스템으로 그림 1과 같은 IEEE 14모선을 사용하였다. 전압안정도는 P-V 곡선에 의한 정적 전압 안정도 검토를 하는 것[10]으로 하였으며, 부하는 Constant P, Q로 가정하였다. 전압불안정의 판정은 조류계산의 발산 여부로 하였는데, 모의 프로그램으로는 PSS/E의 IPLAN을 사용하였다.

### 2.2 HTS 케이블

#### 2.2.1 종류 및 전력용량

전력 전송용 HTS(High Temperature Supercon-

conducting) Cable에는 WD(Warm Dielectric Design)과 CDC(Cold Dielectric Coaxial Design)의 두 가지가 있다. WD형은 그림 2와 같이 Cryostat 안에 HTS 도체 조합물을 넣은 것이며, CDC형은 HTS Conductor를 그림 3과 같이 공통 Cryostat에 넣은 형과 각각의 Cryostat에 넣은 형이 있다.

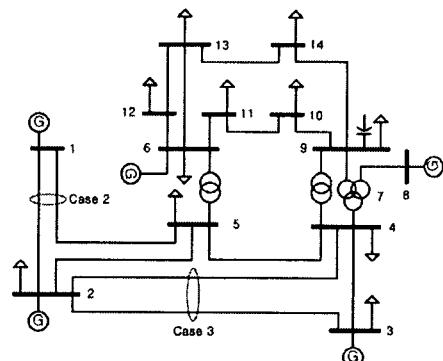


그림 1. IEEE 샘플 14모선 계통  
Fig. 1. IEEE 14 Bus Sample System

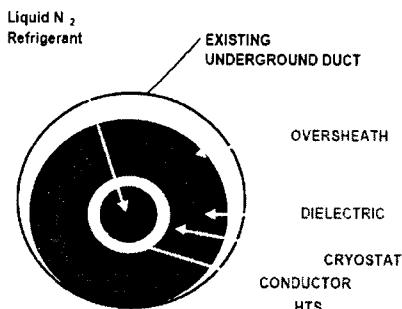


그림 2. 온 유전체 HTS 케이블  
Fig. 2. Warm Dielectric HTS Cable

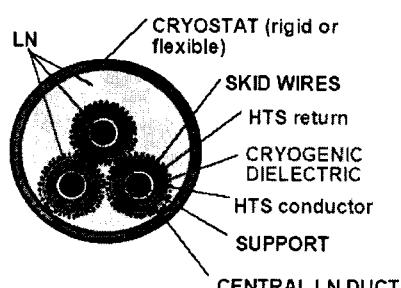


그림 3. 냉 유전체 동축 설계 공동 냉각장치  
Fig. 3. Cold Dielectric Coaxial Design Common Cryostat

WD형은 재래식 케이블에 비해 같은 손실에서 약 2배의 전력을 전송할 수 있으며, CDC형은 약 4.5배의 전력을 보낼 수 있다(표 1).

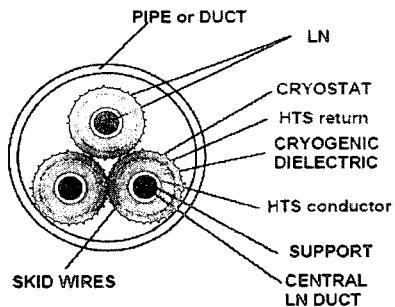


그림 4. 냉 유전체 동축 설계 개별 냉각장치

Fig. 4. Cold Dielectric Coaxial Design with Individual Cryostat

표 1. 다른 형태의 케이블 용량 비교

Table 1. Comparison of Power Cable Capacity

	XLPE	HTS(WD)	HTS(CDC)
Pipe 외경(in)	8	8	8
전압(kV)	115	115	115
전력(MVA)	220	500	1,000
손실(W/MVA)	300	300	200

XLPE : Cross-Linked Polyethylene cable

### 2.2.2 선로정수

초전도 케이블 및 가공선로, 재래식 케이블의 정상 임피던스를 표 2에 제시하였다. 본 논문에서는 적용대상으로 동일 외경에서 3상 송전용량이 큰 CDC 형 HTS 케이블을 선정하였다. HTS 케이블은 현재 고전압 적용에는 한계가 있으며, 고전압용의 선로정 수도 제시된 바가 없으므로 위의 선로정수를 샘플 계통에 비율적으로 적용하기로 하였으며, 그 비율은

표 2. 120(kV) 선로의 정상임피던스

Table 2. 120(kV) Power Line Positive Sequence Impedance

Line	constants	Resistance (Ω/km)	Inductance (mH/km)	Capacitance (nF/km)
CDC HTS	0.0001	0.06	200	
WD HTS	0.0001	0.39	257	
O.H. Line	0.08	1.26	8.8	
XLPE	0.03	0.36	257	

CDC/XLPE 인 경우는 저항 1/300, 인덕턴스 1/6, 커패시턴스 4/5, 가공선로는 저항 1/800, 인덕턴스 6/126, 커패시턴스 200/8.8로 산출되었다.

### 2.3 전압 안정도 향상효과

초전도 케이블 적용에 의한 전압 안정도 향상 효과를 검토하기 위한 계통 모의 방법[10]은 다음과 같다.

① 기존 계통의 각 모선 부하전력을 5[%]씩 증가시켜가면서 전압 안정도 제약 한계 전력을 구한다.

② 각 선로의 전압 붕괴 기여도를 나타내는 무효전력 손실 감도 지표 PI를 구한다.

선로의 무효 전력 손실 감도 PI는 식(1)과 같이 정의한다.

$$PI_j = \frac{\Delta Q_{loss} \text{ for branch } j}{\text{maximum } \Delta Q_{loss} \text{ for all branches}} \quad (1)$$

③ 손실 감도 지표가 큰 선로를 초전도 케이블로 대체하여 ①과 같이 전압 안정도 한계 전력을 구한다.

④ 각 case에 대한 충분 수송 전력을 구하고 타당성을 검토한다.

이에 따라 Case I에 대한 무효전력손실 감도지표는 표 3과 같이 산정되었으며, PI가 높은 순서에 의거 검토 대상 Case는 표 4와 같이 선정하였다.

표 3. Case I 계통의 선로 조류와 PI

Table 3. Power Flow and Performance Index of Base Case System

Line No.	BUS		Incremental Q Flow [MVAR]	PI[p.u.]
	From	To		
1	1	2	50.1	0.969
2	1	5	51.8	1
3	2	3	26.2	0.506
4	2	4	23.2	0.447
5	2	5	15.2	0.293
6	3	4	1.2	0.023
7	4	5	4.2	0.081
8	6	11	5.0	0.097
9	6	12	5.6	0.108
10	6	13	4.3	0.083
11	9	10	4.2	0.081
12	9	14	2.1	0.041
13	12	13	0.6	0.012
14	13	14	0.2	0.004

## 전압 안정도 제약계통에 대한 고온초전도 케이블 적용효과

표 4. 초전도 케이블 적용 모의시스템  
Table 4. HTS Cable Application Study Sample Cases

Case	계통개요	HTS 케이블 적용선로선정	관측 모선
I	Base Case $\sum P_L = 339\text{MW}$ , $\sum Q_L = 73.5\text{MVAR}$		#4, #5
II	①, ② Line 초전도화 기타조건은 상동	PI 우선순위	#4, #5
III	③, ④ Line 초전도화 기타조건은 상동	PI 우선순위	#4, #5

### 2.3.1 Case I : IEEE-14 Bus Test System

Base Case I 계통의 부하를 증가시켰을 때 #4, #5 모선의 P-V 곡선은 그림 5이다. 초기 상태의 총 발전 전력과 전압 감소를 보였으며, VCPI(Voltage Collapse Proximity Index)도 가장 큰 값을 보였다.

초기 총 부하 전력은 339[MW]이며 전압안정도 한계 전력은 678[MW]로서 붕괴지점까지 2배의 부하 증가가 가능하였다.

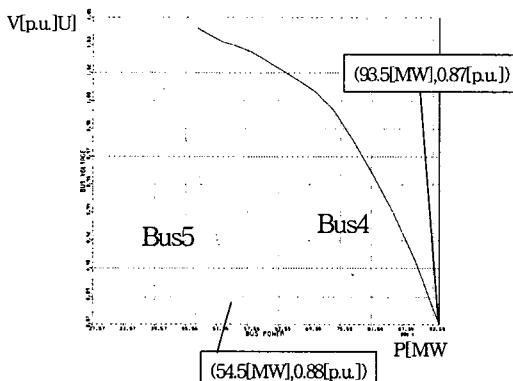


그림 5. 초기계통의 P-V Curve  
Fig. 5. Base Case System P-V Curve

### 2.3.2 Case II : 초전도케이블 적용

각 선로의 PI 중 가장 높은 PI를 보인 선로중 상위 2개 선로(①, ②)에 대해 초전도케이블을 교체한 결과 P-V Curve는 그림 6과 같다. 초기치는 손실전력이 초전도 케이블의 적용에 의해 손실이 45[%]감소하였으며, 전압 안정 한계전력은 1,169.5[MW]+j382[MVAR]로서 Case I에 대비, 2.6배의 전송능력 증가를 보였다.

j253.6[MVAR]로서 Case I에 대비, 1.7배의 전송능력 증가를 보였다.

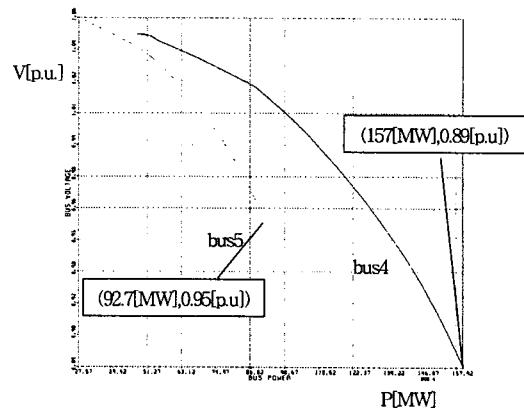


그림 6. Case II - ①, ②선로 초전도화  
Fig. 6. Case II - HTS Cable Applied ①, ② Line

### 2.3.3 Case III : 초전도 케이블 적용

동일한 방법으로 Case II에 추가로 상위 2개 선로(③, ④)에 대해 초전도 케이블을 추가한 결과 P-V Curve는 그림 7과 같다. 초기치는 손실 전력이 초전도 케이블의 적용에 의해 손실이 45[%]감소하였으며, 전압 안정 한계전력은 1,169.5[MW]+j382[MVAR]로서 Case I에 대비, 2.6배의 전송능력 증가를 보였다.

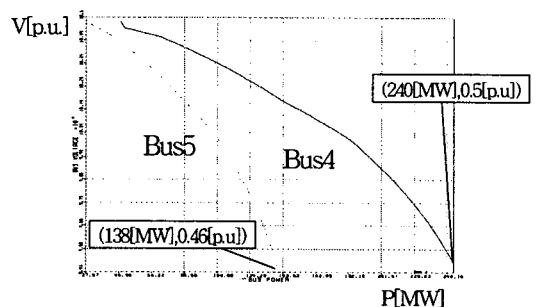


그림 7. case III - ①, ②, ③, ④선로 초전도화  
Fig. 7. case III - HTS Cable Applied ①, ②, ③, ④ Line

### 2.3.4 비교요약

이상의 각 Case에 대한 정상상태의 전압 안정한 계지점까지 계통 상황을 요약하면 표 5와 같다.

**표 5. 초전도 케이블 응용 전압안정도 개선효과**  
**Table 5. Voltage Stability Enhanced Effect by HTS Cable**

	$\Sigma Pg$	$\Sigma Qg$	$\Sigma PL$	$\Sigma QL$	Ploss	Qloss	Qc	Sh.
case	초기점 343.2	54.6	339	73.5	4.2	11.9	28.2	-2.1
	봉괴점 740.4	322.5	678	147	62.4	199.6	24.1	-1.5
case	초기점 343.2	54.6	339	73.5	4.0	29.1	26.4	-2.1
	봉괴점 1276.6	671.4	1169.5	253.6	107.0	441.5	22.3	-1.5
case	초기점 340.9	52.1	339	73.5	1.91	5.71	25	-2.1
	봉괴점 1865.1	965.9	1765	382.3	107.7	609.1	22.1	-1.7

### 3. 결 론

초전도 케이블이 가지는 전력 수송 향상 능력과 상대적으로 낮은 무효 전력손실에 착안하여 전압 안정도 향상효과를 모의 계통에 대하여 검토하여 보았다. 그 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전압 안정도로 제약되는 계통에 3상 일체형 CDC형 고온 초전도 케이블의 설계 데이터를 사용, 무효전력 손실 감도가 큰 선로에 교체한 결과, Case I 대비 Case II는 70[%], Case III는 160[%]의 추가 부하 부담 능력을 증가를 가져올 수 있었다.

2. 전력시장 운용시 전압 안정도한계로 인한 송전 제약 혼잡비용을 초전도 케이블을 적용하면 경감 시킬 수 있으므로 초전도 케이블 적용시 단순 열용량 증대 효과에 대한 추가 이득으로 고려되어야 한다.

3. 실용화 검토에서는 해당 전압 계급에 대한 고온 초전도 케이블 및 교체 대상 선로의 선로정수와 초전도 선로의 냉각장치 설치를 위한 주변여건이 면밀히 검토되어야 하며, 또한 고장발생시 초전도 케이블의 보호에 대한 연구가 추후 보완되어야 실질적 적용이 가능할 것이다.

이 연구는 산업자원부 및 한전 전력연구원의 전력산업 연구개발사업에 의해 지원된 것으로 이에 감사를 드립니다.

### References

- (1) “계통운용상의 적정송전능력산정에 관한 연구”, 최종보고서, 2000. 1. 기초연·한국전력공사.
- (2) Jeonwook Cho, Ki-Chul Seong, et, el., “A Design and Tests of HTS Power Cables and Feasibility Study of HTS Power Transmission System in Korea”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.10, No. 1,

- pp1150-1153, March 2000.
- (3) Jon Jipping, Andrea Mansoldo, “The impact of HTS cables on Power Flow distribution and Short-Circuit currents within a meshed network”, IEEE 2001 O-7803-7285-9/01.
- (4) Diego Politano, Marten Sjostrom, Gilbert Schnyder and Jakob Rhyner, “Technical and Economical Assessment of HTS Cables”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No. 1, pp1150-1153,2477-2480, March 2001.
- (5) K. C. Seong, S. B. Choi, J. W. Cho, et, el., “A Study on the Application Effects of HTS Power Cable in Seoul”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No. 1, pp2367-2370, March 2001.
- (6) Andrea Mansoldo, March Nassi and Pierluigi Ladie, “HTS Cable application studies and technical/economical comparisons with conventional technologies”, 0-7803-7322-7/02 pp. 142-144, IEEE 2002.
- (7) S. Kruger Olsen and O.Tønnesen, J. Ostergaard, “Power Applications for Superconducting Cables in Denmark”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, June 1999.
- (8) Takato Masuda, Masayuki Hirose, Shigeki Isojima, et, el., 0-7803-7525-4/02, pp. 12981304, IEEE 2002.
- (9) “초전도 케이블의 실증시험 및 평가-초전도 전력케이블 시스템 개발” 중간보고서 2003. 7. 31 산업자원부.
- (10) G.J.Lee, S.H.Lim, K.J.Kim, “Dynamic Voltage Stability analysis and control considering the power system security”, ESDDSM'95, pp305-312, Malaysia.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 이근준 (李根準)

1957년 9월 4일 생. 1981년 울산공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대학교 대학원 전기공학과(석사) 1996년 울산대 전기공학과 졸업(공부) 1976~1998년 한전전력 연구원 선임연구원. 1988~1989년 미국 University of Texas at Arlington Energy System Research Center 연구원. 2001~2002년 미국 Arizona State University PSERC 교환교수. IEEE Senior Member. 발송배전 기술사. 현재 충북과학대학 전기과 교수. 주요 관심분야는 초전도, 전력계통안정도, FACTS, 전력품질평가시스템, 분산전원.

Tel : 043-730-6321, E-mail : gjlee@ctech.ac.kr

#### 황시돌 (黃時禱)

1957년 1월 12일 생. 1982년 연세대 전기공학과 졸업, 1986년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년~현재 한전 전력연구원 초전도그룹 부장. 주요 관심분야는 초전도기술의 전력계통응용.

Tel : 042-865-5972, E-mail : sdhwang@kepri.re.kr