

전압안정도 제약계통에 대한 고온초전도 케이블 적용효과

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

이근준* · 황시돌 · 이소영 · 변찬근

(Geun-Joon LEE, Si-Dol Hwang, So-Young LEE, Chan-Geun Byun)

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.

1. 서 론

우리나라는 지속적 평균 6.7%의 지속적 부하성장과 서울지역의 냉방부하의 꾸준한 증가로 도심의 송전선로 과부하 문제가 심각한 단계이며, 이로 인한 복상조류의 증가는 전압안정도 제약으로 인한 송전선로 혼잡비용을 증가시켜 전력시장 하에서 완전한 경쟁을 제약하는 요인이 되고 있다.

고온 초전도 케이블은 그간 도심의 고밀도 부하전력 수송수단으로 꾸준히 검토되어 왔으며, 제작기술의 발전으로 선진제국에서는 실증시험 증으로 우리나라에서도 현재 산학연 협력으로 고온 초전도 케이블의 배전전압급 실증시험을 위한 실증시험장을 구축 중이어서 향후 전력시스템의 새로운 응용연구분야로서 주목받고 있다.

본 논문은 초전도 케이블이 전압안정도 문제를 푸는데 얼마나 기여하는가를 보여주기 위한 것이다. IEEE 14 샘플 모선계통을 사용하여 초전도 케이블을 적용하기 이전의 수송능력과, 적용이후의 수송능력을 전압안정도 관점에서 구한 후 그 결과를 상호 비교함으로써 초전도 케이블의 적용 가능성을 이전의 단순한 송전선로 열용량 한계제약 제거 뿐만 아니라, 전압안정도 제약 분야에도 응용할 가능성을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 대상모의시스템

초전도 케이블의 전압안정도 제약완화 효과를 검토하

기 위한 모의시스템으로 그림 1과 같은 간단한 IEEE 14모선을 사용하였다. 전압안정도는 P-V 곡선에 의한 정적전압안정도 검토를 하는 것으로 하였으며, 부하는 Constant P, Q로 가정하였다. 전압불안정의 판정은 조류계산 발산여부로 하였는데, 모의 프로그램으로는 PSS/E의 IPLAN을 사용하였다.

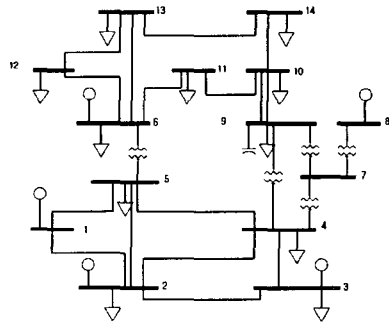


그림 1. IEEE 샘플 14모선 계통

Fig. 1 IEEE 14 Bus sample system

2.2. 고온 초전도 케이블

2.2.1. 종류 및 전력용량

전력전송용 HTS(High Temperature Superconducting) Cable에는 WD(Warm Dielectric Design)과 CDC(Cold Dielectric Coaxial Design)의 두 가지가 있다. WD형은 그림 2와 같이 Cryostat 안에 HTS 도체조합물을 넣은 것이며, CDC형은

HTS conductor를 그림 3과 같이 공동 Cryostat에 넣은 형과 각각의 Cryostat에 넣은 형이 있다.

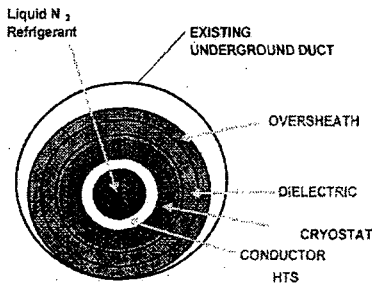


그림 2 온유전체 HTS 케이블
Fig. 2 Warm Dielectric HTS Cable

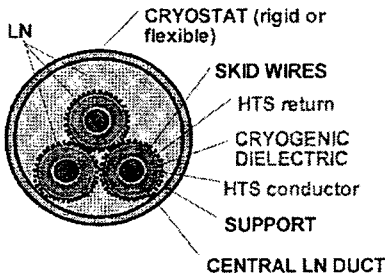


그림3-1 냉유전체 동축설계 공동크라이오스텝
Fig. 3-1 Cold Dielectric Coaxial Design Common Cryostat

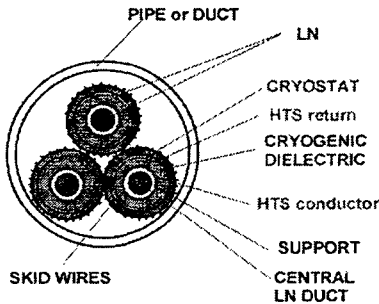


그림 3-2 냉유전체 동축설계 개별 크라이오스텝
Fig. 3-2 Cold Dielectric Coaxial Design with Individual Cryostat

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

표 1 다른 형태의 케이블 용량 비교

Table 1 Comparison of power cable capacity

	재래식	HTS(WD)	HTS(CDC)
Pipe 외경(in)	8	8	8
전압(KV)	115	115	115
전력(MVA)	220	500	1000
손실(W/MVA)	300	300	200

2.2.2. 선로정수

초전도 케이블 및 가공선로, 재래식 케이블의 정상 임피던스를 표 2에 제시하였다. 본 논문에서는 적용대상으로 동일 외경에서 3상 송전용량이 큰 CDC형 HTS 초전도 케이블을 선정하였다. HTS 초전도 케이블은 현재 고전압 적용에는 한계가 있으며, 고전압용의 선로정수도 제시된바가 없으므로 위의 선로정수를 샘플계통에 비유적으로 적용하기로 하였으며, 그 비율은 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.

표 2 120kV 선로의 정상임피던스

Table 2 120kV Power Line Positive sequence Impedance

기술	저항 (Ω/km)	인덕턴스 (mH/km)	커패시턴스 (nF/km)
CDC HTS	0.0001	0.06	200
WD HTS	0.0001	0.39	257
가공선로	0.08	1.26	8.8
XLPE	0.03	0.36	257

2.3. 전압안정도 향상효과

초전도 케이블 적용에 의한 전압안정도 향상효과를 검토하기 위한 계통모의 방법은 다음과 같다.

- ① 기존 계통의 각 모선 부하전력을 5%씩 증가시켜 가면서 전압안정도 제약 한계전력을 구한다.
- ② 각 선로의 전압분포 기여도를 나타내는 무효전력 손실감도지표 PI를 구한다.

선로의 무효전력손실감도 PI는 식(1)과 같이 정의한다.

$$PI_j = \frac{\text{increment of } Q_{\text{loss of } j\text{th line}}}{\text{Max (increment } Q_{\text{loss of lines}})}$$

- ③ 손실감도지표가 큰 선로를 초전도케이블로 대체하여 ①과 같이 전압안정도 한계전력을 구한다.
- ④ 각 case에 대한 증분수송전력을 구하고 타당성을 검토한다.

표 3 Base Case계통의 선로 조류와 PI
Table 3 Power Flow and Performance Index of Base Case System

Line No.	From bus	To bus	Incremental Q Flow [Mvar]	PI[PU]
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

이에 따라 검토대상 case는 표 4와 같이 선정하였다.

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

case	계통개요	초전도케이블 적용선로선정	관측 모션
I	Base Case		#4, #5
II	①,② line 초전도화	PI 우선순위	#4, #5
III	③,④ line 초전도화	PI 우선순위	#4, #5

2.3.1 CASE I : IEEE-14 Bus Test System

그림 4는 Base case 계통의 부하를 증가시켰을 때 #4, #5 모션의 P-V 곡선이다. 초기상태의 총발전전력 전압감소를 보였으며, VCPI(Voltage Collapse Proximity Index)도 가장 큰 값을 보였다.

초기 총부하전력은 339MW 전압안정도 한계전력은 678MW로서 붕괴지점까지 2배의 부하증가가 가능하였다.

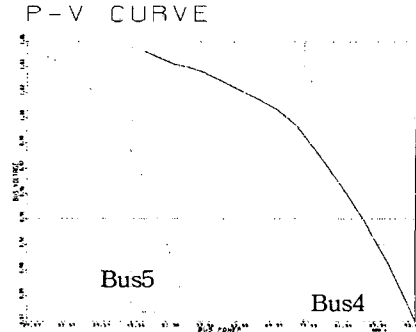


그림 4 초기계통의 P-V curve
Fig. 4 Base Case System P-V Curve

2.3.2 Case 2 : 초전도케이블 적용

각 선로의 PI 중 가장 높은 PI를 보인 선로중 상위 2개 선로(①,②)에 대해 초전도케이블을 교체한 결과 P-V curve는 그림5와 같다. 초기치는 손실전력이 초전도 케이블의 적용에 의해 손실이 소폭감소하였으며, 전압안정한계전력은 1169.5MW+j253.6

Mvar로서 case 1에 대비, 1.7배의 전송능력 증가를 보였다.

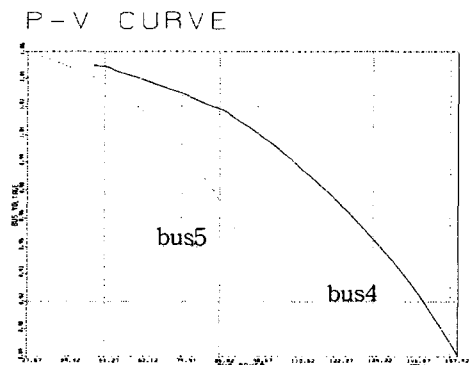


그림 5 case2 - ①,②선로 초전도화
Fig. 5 Case2 - HTS Cable applied ①,② Line

2.3.3 Case 3 : 초전도케이블 적용

동일한 방법으로 Case2에 추가로 상위 2개 선로(③,④)에 대해 초전도케이블을 추가한 결과 P-V curve는 그림6과 같다. 초기치는 손실전력이 초전

도 케이블의 적용에 의해 손실이 45%감소하였으며, 전압안정한계전력은 1765MW+j382Mvar로서 case 1에 대비, 2.6배의 전송능력 증가를 보였다.

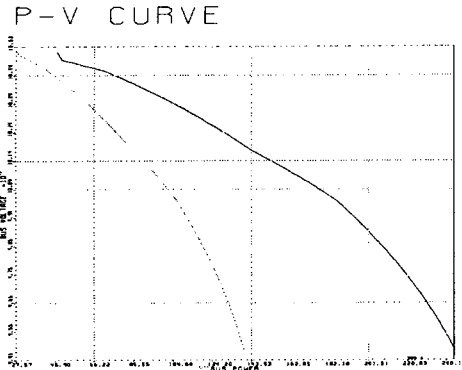


그림 6. case3 - ①,②,③,④선로 초전도화
Fig.6 Case3 - HTS Cable applied ①,②,③,④ Line

2.3.4 비교 요약

이상의 각Case에 대한 정상상태의 전압안정한계지점까지 계통의 상황을 요약하면 표5와 같다.

표 5 초전도케이블 응용 전압안정도 개선효과
Table 5 Voltage Stability Enhanced Effect by HTS cable

		ΣP_R	ΣQ_c	ΣP_L	ΣQ_L	P_{loss}	Q_{loss}	Q_c	Sh.
case1	초기점	343.2	54.6	339	73.5	4.2	11.9	28.2	-2.1
	붕괴점	740.4	322.5	678	147	62.4	199.6	24.1	-1.5
case2	초기점	343.2	54.6	339	73.5	4.0	29.1	26.4	-2.1
	붕괴점	1276.6	671.4	1169.5	253.6	107.0	441.5	22.3	-1.5
case3	초기점	340.9	52.1	339	73.5	1.91	5.71	25	-2.1
	붕괴점	1865.1	965.9	1765	382.3	107.7	609.1	22.1	-1.7

3. 결 론

초전도 케이블이 가지는 전력수송향상능력과 상대적으로 낮은 무효전력손실에 착안하여 전압안정도 향상효과를 모의계통에 대하여 검토하여 보았다. 그 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전압안정도로 제약되는 계통에 3상 일체형 CDC형 고온 초전도 케이블의 설계 데이터를 사용, 무효전력 손실 감도가 큰 선로에 교체한 결과, 기본case

대비 case2는 70%, case3는 160%의 추가부하부담 능력 증가를 가져올 수 있었다.

2. 전력시장 운용시 전압안정도한계로 인한 송전제한 혼잡비용을 초전도 케이블을 적용하면 경감 시킬 수 있으므로 초전도 케이블 적용시 단순 열용량 증대효과에 대한 추가 이득으로 고려되어야 한다.
3. 실용화 검토에서는 해당 전압계급에 대한 고온 초전도 케이블 및 교체대상 선로의 선로정수와 초전도 선로의 냉각장치 설치를 위한 주변여건이 면밀히 검토되어야 하며, 또한 고장발생시 초전도 케이블의 보호에 대한 연구가 추후 보완되어야 실질적 적용이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 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
- [2] "초전도 케이블의 실증시험 및 평가-초전도 전력케이블 시스템 개발" 중간보고서 2003. 7. 31 산업자원부
- [3] 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