

초전도케이블의 실계통 적용가능 개소 도출 및 적용효과 검토

이승렬 윤재영 김중을
한국전기연구원

Specific Case selection and basic power system analysis
for applying HTSC to KEPCO system

Lee, Seung-Ryul Yoon, Jae-Young Kim, Jong Yeul
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This study aims at analyzing a power system, in case of installing HTS cable in the system. First of all, we determine the case that HTS cable can be applied to KEPCO systems and analyze the static state of power system. Then we propose a solution of the problem resulting from the analysis.

(zero)에 가깝고, L과 C는 동일 전압계급의 상전도 케이블에 비해서 각각 50%, 75% 내외가 될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 일반적인 계통현상 해석을 위해서 고장전류, 전압강하, 전력조류 재분배 문제에 중점을 두어 검토한다.

1. 서 론

초전도케이블은 상전도케이블에 비해서 저전압대용량 송전, 유리한 포설입지, 환경친화성 등의 여러 가지 장점을 가지며, 초전도케이블의 개발에 관련된 다양한 연구가 진행되어왔다. 이러한 세계적인 추세에 따라서 현재 우리나라 역시 초전도케이블을 개발 중에 있으며, 이와 관련된 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이와 더불어서, 초전도케이블을 전력계통에 적용하였을 경우, 실제 발생할 수 있는 계통현상에 대한 검토가 필요하지만, 지금까지 초전도케이블에 관련된 연구 중 계통에 직접 적용하여 계통검토를 한 연구는 미미한 실정이다. 본 연구에서는 전력계통 해석에 중점을 두어서, 실계통에서 초전도케이블을 적용할 수 있는 CASE를 도출하고, 이러한 CASE에 대해서 초전도케이블을 전력계통에 적용하였을 때의 계통현상을 검토한다. 단, 본 연구에서는 초전도케이블의 계통적용시의 일반적인 계통특성을 검토하기 위해서 전력계통의 대표적인 해석프로그램인 미국 PTI사의 PSS/E를 이용한 정적 상태의 계통현상만을 모의한다. 향후 초전도케이블의 과도특성현상인 고장전류에 의한 초전도과과(Quenching) 현상, 초전도복귀(Recovery) 현상 등을 정확히 모의하기 위해서는 순시치 해석프로그램인 EMTDC를 이용한 모의가 필요하다.

2. 초전도케이블의 기본특성

초전도케이블의 기본적인 특성은 [표 1]과 같다.

[표 1] 초전도케이블의 기본특성

항목	기본특성	비고
선로 데이터	$R \approx 0$ (초전도상태)	
	$R = R_q$ (초전도과과상태)	
	L=상전도케이블의 약 50%	
	C=상전도케이블의 약 75%	
전력손실	거의 없음	상전도케이블 - 약 2~3%
고장전류	상전도 케이블에 비해 유리	상세 계통검토 필요
전압강하	상전도 케이블에 비해 불리	
전력조류 재분배	적용 CASE에 따른 검토필요	

현재 개발중인 초전도 케이블의 선로정수는 R은 거의 0

3. 초전도케이블 적용가능 CASE 도출

본 연구의 목적은 한국 실계통에서 초전도케이블 적용가능 CASE 도출 및 각 CASE에 대한 기본적인 계통특성을 검토하는 것이다. 그러므로 초전도케이블 적용가능 CASE로는 가장 일반적이며 대표적인 경우를 선택하였으며, CASE 도출 기준데이터는 2010년 Peak 실계통 데이터이다.

3.1 과부하로 인한 향후 증설계획이 있는 선로 (남대전 - 신홍)

2010년 peak 계통의 선로 과부하율이 높은 지중선로들 중 2011년 이후 선로증설계획(1회선)이 있는 경우를 선택하였다. 이러한 경우, 선로를 증설하는 대신 기존 선로를 송전용량이 큰 초전도케이블로 교체 가능할 것으로 판단된다. ([표 2] 참조)

[표 2] 과부하

선로	남대전 - 신홍 (3회선)	
	2004년 peak	2010년 peak
연도별		
전력조류량	153MVA × 3	194.6MVA × 3
정격용량	197MVA × 3	197MVA × 3
(과)부하율	77.7%	98.8%

※ 남대전 - 신홍 : 2011년 이후 1회선 추가증설 예정 (한국전력 2002년 장기송변전 설비계획 참조)

3.2 말단부하

말단부하 수전의 경우 향후 부하급증이 예상되는 경우의 선로를 초전도케이블로 교체하는 CASE를 고려할 수 있으나, 모든 부하의 향후 증가량을 예측하는 것은 매우 어려운 문제이므로 본 연구에서는 현재의 말단부하에 대해서 초전도케이블을 적용하였을 경우의 기본적인 계통특성을 검토하기 위한 CASE를 선택하였다. 우선, 부하 밀집지역인 서울지역(서울전력관리처 및 남서울전력관리처)에서 케이블로서 수전하는 모든 말단부하를 대상으로 하였으며, 이 중에서 선로의 길이 및 말단부하 크기에 따른 결과비교를 위해서 다음 [표 3]과 같은 검토 CASE를 선정한다. 도출된 CASE에 대해서 154kV 초전도케이블로 교체하는 경우와 22.9kV 초전도케이블로 교체하는 경우의 PSS/E 계통검토를 수행한다.

[표 3] 검토사례

수전 방법	선로		회선 수	길이 [km]	전력 조류 [MW]	부하 [MW]
	From	To (부하)				
단방향 수전	옥인	운니	2	3.1	28	28
	신길	봉천	2	3.3	95	95
	신내	중계	2	5.9	108	108
	성동1	왕십리	2	0.34	109	109
양방향 수전	중부1	마포	1	6.7	56.4	68
	신촌		1	2.8	11.6	
	강동	풍납	2	5.3	92.2	125
	석촌		2	3.0	32.8	
	정자	죽전	1	8.0	89.5	109
	수지	1	5.0	19.5		
	사당	신림	1	4.8	53.3	100
봉천S	1		3.6	46.7		

4. PSS/E를 이용한 CASE별 계통검토

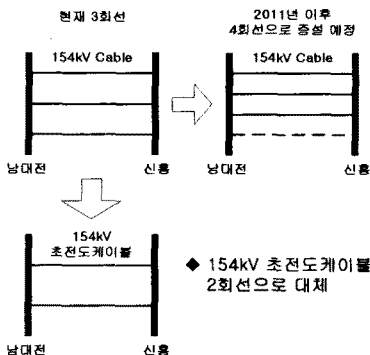
해석대상 계통은 2010년 Peak 계통이며, 초전도선로의 데이터로서, 현재 개발 중인 초전도케이블 데이터의 정확한 수치는 알 수 없으나, 일반적으로 알려진 데이터로서 아래와 같은 값을 적용하여 해석하였다. 본 연구는 초전도과피상태모의가 아닌 정상상태 즉, 초전도케이블의 초전도상태의 계통해석이 목적이므로, 저항값은 초전도상태에서의 수치인 0(zero)을 적용하였다.

- 저항(R) = 0
- 리액턴스(L)
= 동일전압계급 상전도 케이블의 50%
- 정전용량(C)
= 동일전압계급 상전도 케이블의 75%

4.1 기존 154kV 선로의 154kV 초전도케이블로의 대체말단부하

4.1.1 과부하로 인한 항후 증설계획이 있는 선로 (남대전 - 신흥)

남대전 - 신흥은 3회선으로서 (과)부하율은 2004년에서 77.8%에서 2010년 98.8%이며, 2011년 이후 1회선을 증설하여 4회선으로 운전할 예정이다(한국전력 2002년 장기 송변전 설비계획 참조). 항후 4회선으로 증설하는 대신 154kV 초전도케이블 2회선으로 대체하는 경우(그림 1 참조)를 고려하여 기본적인 계통검토를 하였다. 이 때 적용하는 초전도케이블의 용량은 500MVA로 가정하였다.



[그림 1] 154kV 초전도케이블 적용방안
[표 4] 154kV 초전도케이블 적용효과

항 목		초전도케이블 적용 전	초전도케이블 적용 후
전압	남대전	1.02571 PU	1.02354 PU
	신흥	1.02475 PU	1.02318 PU
전력조류 (남대전 → 신흥)	유효전력	594.6 MW	600.8 MW
	무효전력	41.7 MVAR	53.4 MVAR
	(과)부하율	98.8 %	59.1 %

[표 4]의 결과에 의하면 전압은 전체적으로 약간 감소하지만 그 크기는 무시할 만하며, 전압강하는 매우 적으므로 전체계통관점에서 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 전력조류결량의 결과에 따르면 선로용량 면에서 장점을 가짐을 알 수 있다. 따라서 상기 CASE의 경우는 계통적용에 문제가 없을 것으로 사료된다.

4.1.2 말단부하

상기 도출된 말단 부하 CASE에 대해서 154kV 초전도케이블을 적용한 후의 전압 및 고장전류를 확인해보았으며, 각 CASE별로 그 결과가 유사한 경향을 보이므로, 이 중 일부만을 [표 5, 6]에 나타내었다. 단방향 및 양방향 말단수전의 경우 전체적으로 전압은 약간의 저하현상이 있지만 약 0.1%내외로서 무시할 만한 정도이며, 선로 전압강하정도는 기존 상전도 케이블에 비해서 작은 것으로 나타난다. 고장전류는 CASE별로 약간의 차이가 있지만, 초전도케이블을 적용에 따른 영향이 매우 적음을 알 수 있다.

[표 5] 말단수전시 전압 및 고장전류

CASE	모선	전압[pu]		고장전류[kA]	
		HTSC 적용 전	HTSC 적용 후	HTSC 적용 전	HTSC 적용 후
CASE-154 -1-WAY-1	옥인	1.04163	1.04042	26.40	26.39
	운니	1.04159	1.04040	25.00	25.69
CASE-154 -1-WAY-2	신길	1.03535	1.03463	34.66	34.66
	봉천	1.03489	1.03444	31.75	33.17
CSAE-154 -2-WAY-1	중부1	1.04242	1.04147	28.22	28.22
	신촌	1.04141	1.04058	26.29	26.47
	마포	1.04126	1.04062	24.13	25.68
CASE-154 -2-WAY-2	강동	1.04552	1.04336	40.37	41.19
	석촌	1.04478	1.04296	41.09	41.65
	풍납	1.04476	1.04297	39.87	41.20

전력조류의 결과는 단방향 말단수전의 경우의 결과는 상전도케이블을 적용하였을 경우와 동일한 결과를 나타내고 있으므로 결과에서는 생략하였다. 양방향 말단수전의 경우, [표 6]에 나타낸 것과 같이 CASE에 따라서 약간의 조류배분이 바뀌는 결과가 있었지만 계통에 큰 문제는 없으며, 용량이 큰 부하의 경우 초전도케이블을 적용한다면 적합할 것으로 판단된다.

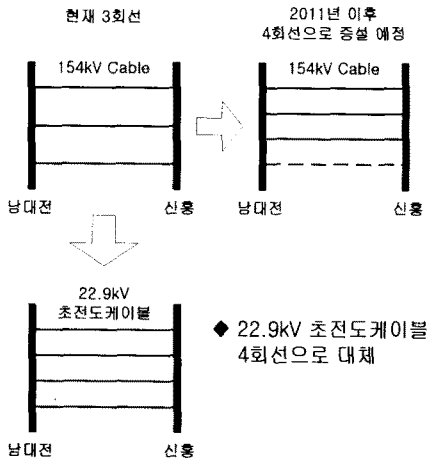
[표 6] 양방향 말단수전시 전력조류

CASE	선로	회선	유효전력 [MW]		무효전력 [MVAR]	
			HTSC 적용전	HTSC 적용후	HTSC 적용전	HTSC 적용후
			CASE-154 -2-WAY-1	중부1-마포	1	56.4
	신촌-마포	1	11.6	-16.7	8.9	-0.9
CASE-154 -2-WAY-2	강동-풍납	2	92.2	106.2	55.2	57.2
	석촌-풍납	2	32.8	18.8	5.2	3.2

4.2 기존 154kV 선로의 22.9kV 초전도케이블로의 대체

4.2.1 과부하로 인한 향후 증설계획이 있는 선로 : 남대전 - 신흥

154kV 기존 선로를 22.9kV 초전도케이블로 교체하는 경우 여러 가지 경제적인 이점이 있기 때문에, 초전도케이블의 중요한 적용대안으로서 각광받고 있다. 이를 고려해서 상기의 남대전-신흥에 대해서 154kV 상전도케이블 4회선으로 증설하는 대신 [그림 2]와 같이 22.9kV 초전도케이블 4회선으로 교체하는 경우를 상정하여 기본적인 계통검토를 하였다.



[그림 2] 22.9 kV 초전도케이블 적용방안

그 결과를 다음 [표 7]에 나타내었는데, 조류배분 문제 및 전압강하 문제가 심각함을 알 수 있다. 즉, 기존의 154kV 케이블을 22.9kV 초전도 케이블로 교체함에 따라서 교체한 초전도선로에 전력조류가 매우 적게 흐름을 알 수 있으며, 이 경우 [표 9]의 결과와 같이 주위의 기타 선로로 조류가 우회하여 흘러서 과부하 선로가 존재하게 된다. 그러므로 이러한 경우, 계통관점에서 반드시 조류배분 문제의 해결이 반드시 필요하다. 또한 전압강하 문제는 조상설비 투입 등의 조치를 취함으로써 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

[표 7] 전압결과

모선	전압계급 [MW]	전압	
		초전도케이블 적용 전	초전도케이블 적용 후
남대전	154	1.02571	1.02451
남대전22	22.9	-	0.98730
신흥	154	1.02475	0.99284
신흥22	22.9	-	0.98587

[표 8] 전력조류결과

선로	전압 계급 [kV]	전력조류	
		유효전력 [MW]	무효전력 [MVAR]
초전도케이블 적용 전 (남대전-신흥, 3회선)	154	594.6	41.7
초전도케이블 적용 후 (남대전22-신흥22, 4회선)	22.9	45.6	8.8

[표 9] 과부하선로

선로	용량 [MVA]	초전도케이블 적용 전		초전도케이블 적용 후	
		전력조류 [MVA]	과부하율 [%]	전력조류 [MVA]	과부하율 [%]
신우천1 - 용운	192	124.7	64.9	310.4	161.7
용운 - 대화	192	109.1	56.8	294.0	153.1

4.2.2 말단부하

말단부하 CASE에 대해서 22.9kV 초전도케이블로 대체한 후의 결과를 [표 10]에 나타낸다. 전체적으로 약간의 전압저하현상이 발생하며, 선로에 흐르는 전력조류량에 비례하여 전압강하 문제가 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 전압강하 문제가 해소되는 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로, 22.9kV 초전도케이블을 적용시 나타나는 전압강하 문제는 조상설비를 투입함으로써 해결 가능할 것으로 판단된다. 또한 고장전류는 큰 문제가 없으며 양방향 말단수전의 경우, 조류배분에 약간의 변화가 있었지만 계통에는 큰 문제를 일으키지 않는 것으로 판단된다.

[표 10] 단방향 말단수전시 전압 및 고장전류

CASE	모선	전압계급 [kV]	전압 [pu]		고장전류 [kA]	
			HTSC 적용 전	HTSC 적용 후	HTSC 적용 전	HTSC 적용 후
CASE-229 -1-WAY-1	운니	154→22.9	1.0416	1.0154	25.00	15.44
	옥인	154	1.0416	1.0366	26.40	26.39
	옥인22	22.9	-	1.0183	-	17.74
CASE-229 -1-WAY-2	봉천	154→22.9	1.0349	0.9415	31.75	15.61
	신길	154	1.0354	1.0299	34.66	34.66
	신길22	22.9	-	0.9533	-	18.14
CASE-229 -1-WAY-3	중계	154→22.9	1.0401	0.9950	36.91	14.25
	신내	154	1.0403	1.0341	43.84	43.82
	신내22	22.9	-	1.0013	-	18.46
CASE-229 -1-WAY-4	왕십리	154→22.9	1.0432	0.9539	52.68	18.5
	성동1	154	1.0433	1.0406	53.43	53.42
	성동22	22.9	-	0.9552	-	18.82

[표 11] 양방향 말단수전시 전압 및 고장전류

CASE	모선	전압계급 [kV]	전압 [pu]		고장전류 [kA]	
			HTSC 적용 전	HTSC 적용 후	HTSC 적용 전	HTSC 적용 후
CASE-229 -2-WAY-1	마포	154→22.9	1.0413	0.9744	24.13	14.62
	중부1	154 kV	1.0424	1.0369	28.22	28.21
	중부22	22.9 kV	-	0.9897	-	14.95
	신촌	154 kV	1.0414	1.0356	26.29	26.04
	신촌22	22.9 kV	-	0.9817	-	15.01
CASE-229 -2-WAY-2	풍납	154→22.9	1.0448	0.9805	39.87	29.20
	강동	154 kV	1.0455	1.0358	40.37	37.44
	강동22	22.9 kV	-	0.9919	-	29.75
	석촌	154 kV	1.0448	1.0346	41.09	38.99
	석촌22	22.9 kV	-	0.9874	-	29.87
CASE-229 -2-WAY-3	죽전	154→22.9	1.0408	1.0215	35.24	14.05
	정자	154 kV	1.0415	1.0379	43.57	43.43
	정자22	22.9 kV	-	1.0228	-	14.89
	수지	154 kV	1.0407	1.0367	37.52	35.34
	수지22	22.9 kV	-	1.0335	-	14.76
CASE-229 -2-WAY-4	신림	154→22.9	1.0394	0.9353	37.20	15.25
	사당	154 kV	1.0399	1.0340	42.02	42.00
	사당22	22.9 kV	-	0.9631	-	15.53
	봉천S	154 kV	1.0398	1.0338	38.80	38.05
	봉천S22	22.9 kV	-	0.9493	-	15.56

[표 12] 양방향 말단수전시 전력조류

CASE	선로	회선	전압계급 [kV]	유효전력 [MW]		무효전력 [MVAR]	
				HTSC 적용 전	HTSC 적용 후	HTSC 적용 전	HTSC 적용 후
CASE - 229 -2WAY - 1	마포-중부1	1	154	56.4	-	24	-
	마포-중부22	1	22.9	-	31.7	-	15.3
	마포-신촌	1	154	11.6	-	8.9	-
	마포-신촌22	1	22.9	-	36.3	-	17.6
CASE - 229 -2WAY - 2	풍납-강동	2	154	92.2	-	55.2	-
	풍납-강동22	2	22.9	-	60.2	-	29.2
	풍납-석촌	2	154	32.8	-	5.2	-
	풍납-석촌22	2	22.9	-	64.8	-	31.4
CASE - 229 -2WAY - 3	죽전-정자	1	154	89.5	-	14.2	-
	죽전-정자22	1	22.9	-	51.6	-	0
	죽전-수지	1	154	19.5	-	0.7	-
	죽전-수지22	1	22.9	-	57.4	-	16.3
CASE - 229 -2WAY - 4	신림-사당	1	154	53.3	-	23	-
	신림-사당22	1	22.9	-	48.8	-	23.6
	신림-봉천S	1	154	46.7	-	25.4	-
	신림-봉천S22	1	22.9	-	51.2	-	24.8

5. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 초전도 케이블의 계통적용가능 개소를 도출하여, 이를 실계통에 적용하였을 경우의 기본적인 계통현상을 확인해보는 것에 목적을 두고 있으며 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 154kV 기존케이블을 154kV 초전도케이블로 교체하는 경우 특별한 문제는 발생하지 않으므로, 적용 가능할 것으로 판단된다.
- 154kV 기존케이블을 22.9kV 초전도케이블로 교체하는 경우, 선로에 흐르는 전력조류에 비례하여 전압강하문제가 발생하며 이는 조상설비를 투입함으로써 해결가능하다.
- 비 말단부하에서 기존의 154kV 케이블을 22.9kV 초전도케이블로 교체하여 적용하는 경우, 경제적인 면에서 이점이 매우 크다. 그러나 기술적인 면에서 조류배분의 문제가 발생할 소지가 있으므로, 이에 대한 대책방안 수립 및 이러한 문제가 발생하지 않는 적용가능 개소의 도출이 요구된다.
- 향후 154kV 기존케이블을 22.9kV급 초전도케이블로 대체 가능한 개소 도출 및 문제점 해결을 위한 지속적인 연구가 필요하다.
- 본 연구에서는 PSS/E를 이용하여 전력계통관점에서 초전도케이블의 정적인 계통현상을 검토하였으며, 향후 과도특성을 고려한 계통검토 역시 필요할 것으로 판단된다. 초전도케이블의 과도특성을 정확하게 모의하기 위해서는 순시치 해석프로그램인 EMTDC를 이용한 검토가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Richard Silbergliitt, Emile Etedgui, Anders Hove, "Strengthening the Grid"
- [2] 윤재영, "22.9kV 초전도케이블 적용간섭성 분석" 초전도케이블 기획자료, 2003
- [3] 한국전력공사, "2002년 장기 송변전 설비계획", 2002