

과도상태에서의 시스순환전류 저감장치 보호방안에 관한 연구

김지원^{*} 정재균^{**} 이종범^{**} 이동일^{*} 정길조^{*}
^{*}KEPRI ^{**}원광대 ^{*}KEPRI

A Study on the Protection Methods of Sheath Circulating Current Reduction Device in Transient State

Ji-Won Kang^{*} Chae-Kyun Jung^{**} Jong-Beom Lee^{**} Dong-Il Lee^{*} Gil-Jo Jung^{*}
^{*}KEPRI ^{**}Wonkwang University ^{*}KEPRI

Abstract - Sheath circulating current is increased as the change of sheath mutual impedance which is caused by imbalance of cable system, and different section length between joint box. If excessive current flows in sheath, sheath loss will be increased and then transmission capacity of underground transmission system is reduced.

Accordingly, This paper proposed sheath current reduction device using resistor and reactor and proved the reduction effect of that device using EMTP/ATP. And also in this paper, when transients are occurred at the underground system with reduction device by ground fault and lightning surge, we analyzes transient effect of system variously. From this result, authors establish the protection methods of sheath circulating current reduction device.

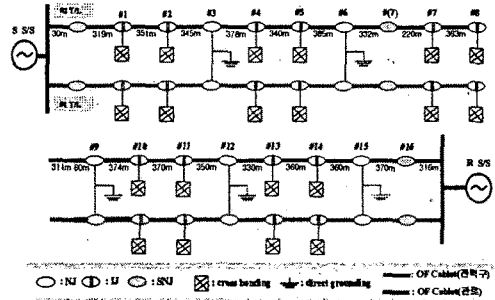


그림 1. 케이블 접속형태 및 구간길이

1. 서 론

국내 지중송전계통은 154kV 뿐만 아니라 345kV 송전계통에서도 OF케이블이 운전중에 있으며, 곧 345kV XLPE 케이블이 운전계획중에 있다. 이처럼 지중송전계통은 대도시를 중심으로한 전력전송 수단으로서 중요한 역할을 담당하고 있으며 지중화율 또한 더욱 증가할 것으로 전망된다. 그러나 국내 지중송전계통의 건설은 체계적인 연구에 의한 기준에 의해 시스템을 구성하기보다는 지리적 특성 등 여러 가지 포설환경 의존해 시공하는 사례가 많이 발생하고 있다. 따라서 많은 지중계통에서 혼합포설형태 및 접속합간의 길이불평형 현상이 나타나고 있으며, 이로 인해 케이블계통의 전기적인 불평형 현상이 심화되어 시스순환전류가 과다하게 흐르고 있다[1-5].

따라서 본 논문에서는 실제 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 실제계통에 대한 실측값과 EMTP/ATP 해석결과와 비교를 통해 시뮬레이션의 신뢰도를 검증하였으며, 시스순환전류 개선방안으로 저항과 리액터를 제안하였다. 또한 저감장치가 설치된 지중송전계통에 1선지락오장 및 뇌 써지 침입으로 인한 과도발생시 시스계통의 과도현상 변화 특성과 저감장치에 미치는 영향을 다양하게 검토하였으며, 저감장치 보호방안 적용에 따른 시스 전위 및 전류 감소효과를 비교 분석하여 다양한 시스순환전류 저감장치 보호방안을 수립하였다. 시스순환전류 저감장치는 크로스본드 리드선과 직렬로 접속되므로 저감장치가 파손되면 리드선은 단선되며, 시스계통의 크로스본드 접지 기능이 상실된다. 따라서 단선된 부분에서 높은 시스전위가 발생하게 되며, 이는 절연통보호장치(SVL)를 포함한 방식층과 절연체에도 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 지중송전계통에 과도발생시 시스순환전류 저감장치를 최대한 완벽히 보호할 수 있는 방안을 수립하여 제시하였다.

2. 정상운전시 시스순환전류

그림 1은 2회선 154kV 2000mm² OF 케이블 계통의 케이블 접속형태 및 구간길이를 나타내었다. 케이블 선로공장은 6.254km이며, 부하전류는 300A, 포설방식은 전력구식과 관로식이 혼합된 형태이고, SVL 절선방식은 대지간방식을 사용하는 실제 운전중인 계통이다.

2.1 정상상태 해석 및 실측값과의 비교분석

그림 1의 실제계통 시스순환전류 측정결과 혼합포설형태로 되어있는 #9-#12의 크로스본드 구간에서 가장 높은 전류 값을 보였다. 실제로 혼합포설은 접속합간의 길이불평형과 더불어 케이블의 상간 간격 및 높이의 고저차등을 유발시키고 지형적 구조 및 특성차이로 인해 여러 가지 전기적 불균형 현상이 나타나고 있는데, 이는 도체와 타상 시스간 상호임피던스 및 시스 상호임피던스 등에 불평형을 초래하여 시스순환전류를 상승시키는 요인으로 작용하고

표 1. #2 T/L의 시뮬레이션 및 실측값 비교

T/L 접속합	#2 T/L 시스순환전류[A]								
	A-C			B-A			C-B		
	계산	실측	오차	계산	실측	오차	계산	실측	오차
#1(IJ)	4.89	3.25	1.64	9.5	4	5.5	7.07	4.05	3.02
#2(IJ)	4.88	13.05	8.17	3.42	10.65	7.23	7.38	5.9	1.48
#3(NJ)	14.09	13.15	0.94	16.5	5.8	10.7	15.8	7.45	8.35
#4(IJ)	6.14	4.25	1.89	5.56	11.45	5.89	9.15	12.2	3.05
#5(IJ)	6.59	8.35	1.76	10.5	5.15	5.35	10.9	14.6	3.7
#6(NJ)	27.7	19.05	8.65	30.6	18.35	12.25	21.7	29.5	7.8
#7(IJ)	20.3	18	2.3	24	21.1	2.9	18.9	24.3	5.4
#8(IJ)	32.9	17.8	15.1	25.5	23.45	2.05	30.2	29.45	0.75
#9(NJ)	61.59	50.6	10.99	81.98	78.9	3.08	97	80.95	16.05
#10(IJ)	53.9	56.1	2.2	64.3	72	7.7	82.3	69.9	12.4
#11(IJ)	75.2	61.6	13.6	92.7	83.8	8.9	64.9	78.35	13.45
#12(NJ)	75	56.8	18.2	44.7	72.4	27.7	56.4	62.55	6.15
#13(IJ)	10.7	5.85	4.85	12.1	10.3	1.8	14.4	11.05	3.35
#14(IJ)	4.99	3.5	1.49	4.53	4.25	0.28	1	3.2	2.2
#15(NJ)	25.7	15	10.7	22.3	16.35	5.95	26.4	16.75	9.65

있다. 표 1에서는 #2 T/L의 실측값과 시뮬레이션을 통한 계산값을 비교하여 나타내었다. 표에서처럼 실측값과 계산값은 오차가 매우 적게 나타났으며 모델링에 적용할 수 없는 지중계통 주변의 환경적인 영향을 감안한다면 실측값과 계산값은 상당히 일치하는 것으로 평가되어 본 논문의 시뮬레이션 방법 및 결과는 정확성이 있다고 사료된다.

2.2 시스순환전류 저감장치

본 논문에서는 시스순환전류 저감을 위해 저항과 리액터를 이용한 시스순환전류 저감장치를 제시하였으며, 이는 순환전류가 상승하는 구간 절연접속합(IJ)의 크로스본드 리드선에 설치된다. 그림 2에서는 SVL이 대지간방식으로 접속되어 있는 크로스본드 리드선에 저감장치를 설치한 단면도를 나타내었다. 저항 및 리액터는 그림 1 #2 T/L의 #11(IJ)에 각각 설치하였으며 표 2 ~ 표 3에서는 저감장치 설치에 따른 시스순환전류 저감효과를 도표로 나타내었다. 표에서처럼 저감장치를 설치하였을 때 순환전류는 대체로 큰 폭으로 저감하였다. 이중 저항을 #11(IJ) 크로스본드 리드선에 설치할 경우 각상 평균 저감율은 79.53%를 보였으며, 리액터를 #11(IJ)에 설치하였을 때는 84.98%를 보였다. 따라서 저항에 비해 리액터의 저감효과가 다소 많음을 알 수 있으며, #10 접속합보다는 #11 접속함에 설치하였을 때 저감효과가 더욱 좋게 나

타났다.

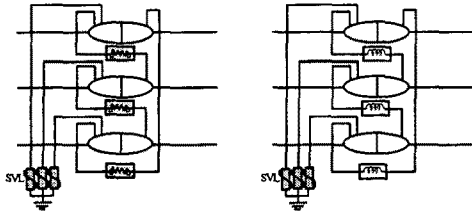


그림 2. 크로스본드 리드선에 저감장치 설치 도면

표 2. #11(IJ)에 저항(R) 설치

T/L	#2 T/L									
	시스순환전류[A]									
	A-C		저감율 [%]	B-A		저감율 [%]	C-B		저감율 [%]	
	저감장치 유	무		저감장치 유	무		저감장치 유	무		
#9(NJ)	5.8	61.59	90.58	5.87	81.98	92.8	14.1	97	85.46	
#10(IJ)	11	53.9	79.6	11.9	64.3	81.49	9.44	82.3	88.53	
#11(IJ)	8.53	75.2	88.66	13.6	92.7	85.33	8.51	64.9	86.89	
#12(NJ)	15.8	75	78.93	26.4	44.7	40.94	25.3	56.4	55.14	
평균저감율	84.44			75.14			79			

표 3. #11(IJ)에 리액터(L) 설치

T/L	#2 T/L									
	시스순환전류[A]									
	A-C		저감율 [%]	B-A		저감율 [%]	C-B		저감율 [%]	
	저감장치 유	무		저감장치 유	무		저감장치 유	무		
#9(NJ)	5.6	61.59	90.9	16.9	81.98	79.4	25.7	97	73.5	
#10(IJ)	2.7	53.9	94.99	3.61	64.3	94.38	7.17	82.3	91.3	
#11(IJ)	8.24	75.2	89.04	12.46	92.7	86.56	7.12	64.9	89.03	
#12(NJ)	3.43	75	95.43	16.7	44.7	62.64	15.4	56.4	72.7	
평균저감율	92.59			80.74			81.63			

표 4에서는 시스순환전류 저감장치 저항과 리액터 설치에 따른 시스유기전압을 비교하여 나타내었다. 검토결과 발생하는 최대 시스유기전압은 24.6V로 국내에서 규정하고 있는 시스유기전압 제한치인 50V에 충분한 여유를 가지고 있음을 알 수 있으며 표 5와 같이 저감장치 양단에 발생하는 전압도 높지 않았다. 따라서 정상 운전시 시스순환전류 설치에 따른 시스템의 변화는 크지 않을 것으로 판단된다.

표 4. 시스순환전류 저감장치 설치에 따른 시스유기전압 비교

T/L	#2 T/L				
	시스유기전압[V]				
저감장치 설치위치	무	저항(R)		리액터(L)	
		#10	#11	#10	#11
#9(NJ)	0.85	0.91	0.92	0.92	0.93
#10(IJ)	15.1	22.3	22.6	22.3	24.6
#11(IJ)	8.6	8.5	17.6	7.4	19.4
#12(NJ)	1.23	1.24	1.24	1.22	1.23

표 5. 저항 및 리액터 양단에 유기되는 전압

T/L	#2 T/L			
	저감장치전압[V]			
저감장치 설치위치	저항(R)		리액터(L)	
	#10	#11	#10	#11
A-C	7.7	9.03	12.8	9.2
B-A	13	14.4	7.3	13.4
C-B	7.76	9.07	7	9.5

그러나 저감장치는 임피던스 성분으로 크로스본드 리드선과 직렬로 접속되기 때문에, 이러한 저감장치가 설치되어 있는 지중송전계통에서 지락 및 뇌 세기 침입으로 인한 과도현상이 발생하면

고장전류는 저감되거나 임피던스 증가 영향으로 인해 시스의 전위가 상승하게 된다. 또한 저항 및 리액터의 저감장치 양단에도 높은 과전압이 유기 될 수가 있다. 특히 저항에 과전압이 발생하면 저항에서 소비되는 에너지 양의 증가로 고열이 발생하여 파괴될 수 있으며, 리액터는 High Frequency 성분의 세기가 침입하면 주 파수 증가로 인해 임피던스가 상승하여 높은 과전압이 발생하게 된다. 따라서 저감장치 취부시 시스 전위상승 및 저감장치에 발생하는 과도현상으로 인한 저감장치 손실을 예방할 수 있는 적절한 보호방안이 요구된다.

3. 시스순환전류 저감장치 설치에 따른 과도특성 검토

3.1 시스순환전류 저감장치 보호방안

시스순환전류 저감장치는 정상 운전시 높은 저감효과를 보여 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 지중케이블 구간의 시스전류를 저감시킴으로써 시스피로손실이 감소되며, 이로 인해 상당한 지중송전계통의 송전용량 증대 효과가 있을 것으로 기대된다. 그러나 시스순환전류 저감장치는 크로스본드 리드선에 직렬로 설치되기 때문에, 만약 과도 발생에 의해 저감장치가 파괴되면 크로스본드 리드선은 단선되며, 단선된 크로스본드 리드선을 중심으로 양쪽은 모두 편단전압이 되므로 고장전류가 커져서 하지 못하여 저감장치가 설치되어 있는 접속함에 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압은 매우 상승하게 된다. 또한 이러한 과전압은 방폭 및 절연통에도 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 논문에서는 지중송전계통에 과도 발생시 저감장치 보호를 위한 방안으로 그림 3과 같은 저감장치 보호 유닛을 제안하였다.

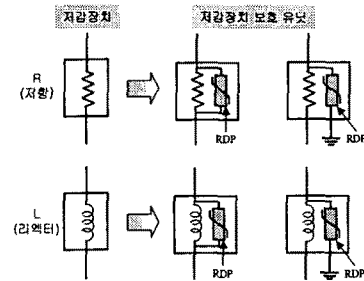
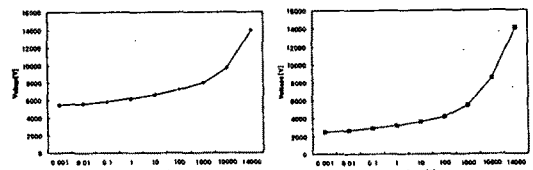


그림 3. 시스순환전류 저감장치 보호방안

그림 3에 나타난 저감장치 보호 유닛은 저감장치에 SVL과 같은 기능을 하는 저감장치 보호장치(RDP-Reduction Device Protector)를 병렬로 접속하여 정상 운전시는 동작하지 않으며, 저감장치 양단에 과전압이 발생하게 되면 RDP의 V-I 특성곡선에 의해 동작하게 된다. 따라서 저감장치에 흐르는 과전류를 분배하여 저감장치에 흐르는 전류를 저감시킬 수 있으며, 저감장치에 유기되는 과전압도 줄일 수 있다. 저감장치에 유기되는 과전압은 저항과 리액터의 임피던스 크기 및 크로스본드 리드선의 선로 임피던스와 SVL의 절선방식에 따라 영향을 받지만, 저감장치가 파괴되면 크로스본드의 형태가 파괴되어 전체적인 케이블계통에 심각한 영향을 줄 수 있으므로 시스 전압보다 낮은 상태에서 저감장치를 보호해야 한다. 따라서 RDP는 SVL에 비해 동작조건을 완화시켜 보다 낮은 전압에서 동작하도록 하였으며, 본 논문에서는 저감장치에 보호장치 RDP가 병렬로 접속된 방식과 RDP의 하단을 접지하는 방식을 보호장치가 설치된 저감장치 유닛으로 제안하였고, EMTPL을 이용한 다양한 과도해석을 통해 보호효과를 검토하였다. 그림 4는 SVL과 RDP의 V-I 동작특성에 대한 그래프를 나타내었다.



SVL V-I 특성곡선 RDP V-I 특성곡선
그림 4. SVL 및 RDP V-I 특성곡선

표 6은 대지간방식(D) 및 교류비접지 방식(K)으로 SVL이 결

선된 계통에서 각각 저항 및 리액터를 이용한 시스순환전류 저감장치 보호를 위한 보호 방법을 그림 3과 같은 방법으로 대지간방식(D) 및 교락비접지 방식(K)에 따라 4방안씩 8가지 방안을 제시하였다. 또한, 각 SVL 결선방식에 따른 보호방안 마다 표 6에서와 같이 약형을 제시하였으며, 앞으로는 모든 보호방법을 약형으로 언급하겠다.

표 6. 시스순환전류 저감장치 보호방법

저감장치	SVL 결선방식	약칭	보호방법
저항 리액터	대지간방식(D)	DK	대지간방식+교락비접지방식
		DKC	대지간방식+교락비접지방식+RDP 병렬접속
		DC	대지간방식+RDP 병렬접속
		DCG	대지간방식+RDP 병렬편단접지
	교락비접지방식(K)	KD	교락비접지방식+대지간방식
		KDC	교락비접지방식+대지간방식+RDP 병렬접속
		KC	교락비접지방식+RDP 병렬접속
		KCG	교락비접지방식+RDP 병렬편단접지

3.2 1선지락고장

케이블의 1선지락고장은 케이블 내의 도체와 시스 사이의 절연 파괴에 의한 접촉에 의해 발생한다. 따라서 고장전류는 양단 변전소 및 보통접속함(NJ)의 직결점지 지점을 통해 분산되는 특성이 있으며, 다회선 케이블의 경우, 모선 및 대지로 흘러나가는 영상분 지락전류가 직결 점지선을 통해 인접회선으로 유입되어 타 회선에서 영향을 미치게 된다.

그림 1의 #11(IJ)에 저항 및 리액터의 저감장치가 설치되어 있는 2회선 지중송전계통에서 1선지락고장이 #2 T/L의 S/S로부터 1.5km, 3km, 4km, 5km에서 각각 발생하였을 때, 대지간방식으로 SVL이 결선되어있는 방식 뿐 아니라, 교락비접지 방식에서 저감장치 설치에 따른 시스전위 상승 및 저감장치에 발생하는 과전압과 과도전류를 다양하게 검토하였다. 또한 저감장치의 특성 및 저감장치 보호방안에 따른 과도현상 변화 특성을 검토하여 표 6에 제시한 저감장치 보호방안에 대해서도 충분히 검토하였다.

그림 5에서는 저감장치가 없는 경우 #2 T/L의 5km에서 1선지락고장이 발생하였을 때 각각 결선방식에 따라 2회선 케이블 계통의 #11 절연접속함 시스에 흐르는 고장전류의 파형을 나타내었다. 그림에서처럼 고장이 발생한 #2 T/L에는 13kA의 고장전류가 발생하고, 고장이 발생하지 않은 #1 T/L에서도 직결점지점을 통한 영상분 지락전류의 유입 등의 원인으로 0.35kA의 고장전류가 발생하였다.

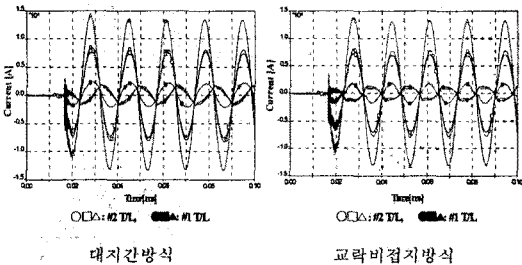


그림 5. 2회선 지중케이블에 1선지락고장시 #11에서 시스전류

3.2.1 저항(R)을 저감장치로 이용한 경우

순환전류 저감장치가 설치되어 있는 지중송전계통에 1선지락고장 발생시 시스에 미치는 과도특성 변화 및 저감장치에 미치는 영향을 다양하게 분석하였다.

표 7에서는 저항 설치시 #10 및 #11 접속함에 유기되는 시스대지간 전압 및 절연통간 전압을 나타내었다. 표에서처럼 SVL 결선방식에 따라 시스대지간전압은 교락비접지 방식에서 높게 발생하며, 반대로 절연통간전압은 대지간 방식에서 높게 발생하고 있다.

그림 6에서는 지락고장 위치에 따라 저감장치 저항에 흐르는 전류를 SVL 결선방식으로 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 평균적으로 대지간방식에 비해 교락비접지 방식에서 평균 0.8kA 정도가 많이 흐르며, 저감장치가 설치되어 있는 4km 지점에서 지락고장이 발생했을 때 교락비접지 방식에서 5.66kA를 보여 가장 높은 전류를 나타내었다. 따라서 4km 지점에서 1선지락고장이 발생할 경우 시스대지간 전압, 절연통간 전압 및 저감장치에 흐르는 전류가 가장 높게 발생하였다.

표 7. 1선지락고장시 저감장치 저항 취부시 시스 전압

지락고장 위치	#11(IJ)에 크로스본드 리드선에 저항 설치							
	대지간방식				교락비접지방식			
	시스대지간 전압[kV]		절연통간 전압[kV]		시스대지간 전압[kV]		절연통간 전압[kV]	
#10(IJ)	#11(IJ)	#10(IJ)	#11(IJ)	#10(IJ)	#11(IJ)	#10(IJ)	#11(IJ)	
1.5km	7.9	9.16	16.6	16.45	16.6	16.1	8.67	8.49
3km	8.32	9.33	16.3	15.6	16.5	15.9	8.84	8.47
4km	8.45	9.8	16.4	17.1	16	17	9.07	8.93
5km	8.8	9.48	16	16.07	10.6	10.5	8.02	7.78

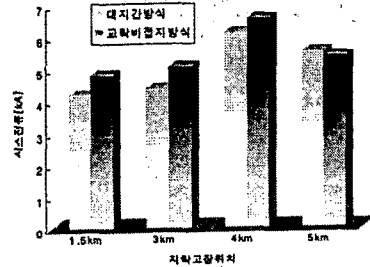


그림 6. 저감장치 저항에 흐르는 전류

표 8에서는 #11(IJ) 접속함 크로스본드 리드선에 저항을 설치했을 때 저감장치에 가장 큰 영향을 미친 4km 지점에서 1선지락고장 발생시 저감장치 보호방안 적용에 따른 시스대지간 전압 및 절연통간 전압을 나타내었다. 표에서처럼 대지간방식에서 DC 및 DCG는 절연통간 전압이 보호방안이 없는 경우의 17.1kV에 비해 약간 감소되나 8.6kV가 감소되는 DK 및 DKC에 비해 비교적 높은 전압이 발생하였다. 또한 시스대지간 전압은 모두 비슷하나 DCG에서 가장 낮은 6.73kV를 보였다. 한편 교락비접지 방식에서는 보호방안이 없는 경우 17kV였던 시스대지간 전압이 KCG에서는 6.88kV 가장 적었고 KD 및 KDC는 8.8kV를 나타내었으나 KC는 저감효과가 없었다. 절연통간 전압은 모든 방식에서 0.6kV 정도 약간 저감된 값을 유지했다. 그림 7에서는 대지간방식에서 보호방안에 따른 시스대지간 전압의 EMTP 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

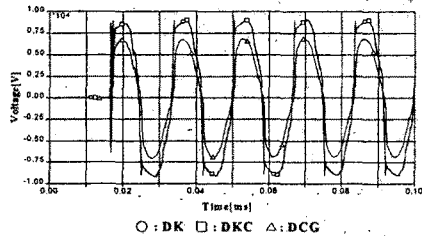


그림 7. 4km 지락고장시 대지간방식에서 보호방안에 따른 시스대지간 전압 파형

표 8. 저감장치 보호방안 적용에 따른 시스 전압

고장종류	SVL 결선방식	보호방안	1선지락고장(4m)	
			#11(IJ)에 크로스본드 리드선에 저항 설치 시스대지간전압[kV]	절연통간전압[kV]
대지간방식	DKC	DK	8.95	8.64
		DKC	8.91	8.63
		DC	8.92	15.3
		DCG	6.73	13.7
		KD	8.8	8.24
교락비접지방식	KDC	KD	8.8	8.24
		KDC	8.8	8.24
		KC	16.7	8.23
		KCG	6.88	8.22

그림 8에서는 각 저감장치 보호방안에 따라 저감장치에 흐르는 전류를 그래프로 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 교락비접지 방식에서 KC가 5.86kA, KCG가 5.7kA로 비교적 높은 전류가

발생하고 있으며 KD에 비해서도 KDC는 5.08kA로 가장 낮은 전류를 보였다. 또한 대지간방식에서도 DKC가 가장 낮은 전류를 보였다.

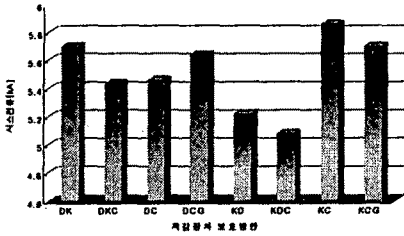


그림 8. 저감장치 보호방안에 따라 저감장치에 흐르는 전류

저항을 저감장치로 사용하는 지중송전계통에서 1선지락고장 발생시 저감장치를 보호하기 위한 보호방안을 적용하여 보호효과를 검토하기 위해 크로스본드 리드선에 저감장치로 저항이 설치된 접속함에서의 시스템 전위상승과 저감장치에 흐르는 고장전류를 각각 비교하여 분석하였다. 분석결과 대지간방식에서는 절연통간 전압에서 DK와 DKC가 가장 낮은 값을 보였으나 DKC는 DK에 비해 전류 저감효과가 더욱 좋게 나타났다. 따라서 대지간방식에서 보호효과가 우수한 순으로 정리하면 DKC, DK, DC, DCG로 대지간방식에 교락비접지 방식을 혼합하고 RDP를 저감장치로 병렬로 접속하는 방안인 DKC의 저감효과가 가장 좋았다. 또한 교락비접지 방식의 보호효과는 KDC, KD, KCG, KC의 순으로 대지간방식과 마찬가지로 교락비접지에 대지간방식으로 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속하는 방안인 KDC의 저감효과가 가장 좋게 나타났다.

3.2.2 리액터(L)을 저감장치로 이용한 경우

다음은 #11(IJ) 접속함에서 크로스본드 리드선에 저감장치 1Ω의 리액터(L)를 설치하였을 때, 1선지락고장 발생시 시스에 미치는 과도 특성 변화 및 저감장치에 미치는 영향을 분석하였다. 표 9에서는 각각 1.5km, 3km, 4km, 5km 지점에서 1선지락고장이 발생시 대지간방식과 교락비접지 방식에 따른 #10과 #11 접속함의 시스템 전압과 절연통간 전압을 나타내었다. 표에서처럼 저감장치가 설치되어있는 4km 지점에서 지락 발생시 가장 높은 과전압이 발생하고 있으며, 전체적으로 저항을 사용한 경우에 비해 약간 낮은 전압 분포를 보이고 있다. 다만 고조파가 다소 포함된 지락고장이 발생할 경우에는 전압이 약간 상승할 것으로 예상된다.

표 9. 1선지락고장시 저감장치 리액터 후부시 시스템 전압

지락고장 위치	#11(IJ)에 크로스본드 리드선에 리액터 설치							
	대지간방식				교락비접지방식			
	시스템대지간 전압(kV)		절연통간 전압(kV)		시스템대지간 전압(kV)		절연통간 전압(kV)	
	#10(IJ)	#11(IJ)	#10(IJ)	#11(IJ)	#10(IJ)	#11(IJ)	#10(IJ)	#11(IJ)
1.5km	8.46	8.6	2.51	5.37	16.1	15.4	2.65	5.57
3km	8.12	8.4	3.17	5.3	15.9	15.3	4.15	6.1
4km	9	11	3.9	7.5	16.5	16.4	4.2	8.01
5km	8.71	9.8	2.31	8.3	14.4	14.2	1.16	5.8

그림 9에서는 지락고장 발생 지점에 따라 저감장치 리액터에 흐르는 전류를 SVL 결선방식별로 비교하여 나타내었다. 저항과 마찬가지로 대지간방식에 비해 교락비접지방식에서 약 0.82kA 정도 높은 전류 분포를 보이고 있으며, 교락비접지 방식의 4km 지점에서 지락고장이 발생하였을 경우 11kA로 가장 높은 전류 값을 보였다.

표 10에서는 #11(IJ) 접속함 크로스본드 리드선에 리액터를 설치했을 때 저감장치에 가장 높은 과전압으로 인한 영향이 나타나는 4km 지점에서 1선지락고장 발생시 저감장치 보호방안 적용에 따른 시스템대지간 전압 및 절연통간 전압을 나타내었다. 표에서처럼 대지간방식에서는 보호방안이 없는 경우 유기되는 절연통간 전압 7.5kV에 비해 모든 보호방안에서 약간 감소하였으며, 시스템대지간 전압은 DCG에서 3.1kV의 전압이 감소하였고, DK에서도 2.12kV의 저감효과가 있었으나, 그 외 보호방안과의 차이는 크지 않았다. 한편 교락비접지방식의 시스템대지간 전압은 보호방안이 없는 경우 16.4kV가 유기되었으나 보호방안 적용결과 KC의 저감효과는 없으나 KCG는 6.6kV로 저감효과가 가장 좋았다. 또한 KD 및 KDC에서도 6.9kV의 저감효과가 나타났다.

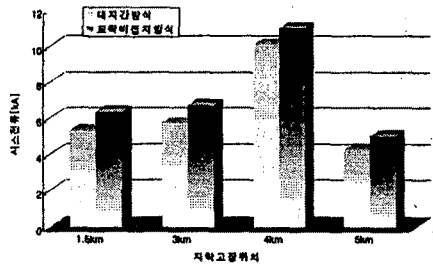


그림 9. 저감장치 리액터에 흐르는 전류

그림 10에서는 교락비접지 방식에서 저감장치 리액터에 대한 보호방안에 따른 시스템대지간 전압의 EMTF 시뮬레이션 결과를 나타내었으며, 그림 11에서는 각 저감장치 리액터 보호방안에 따라 저감장치에 흐르는 전류를 그래프로 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 대지간방식에서는 DCG가 9.35kA를 보였으나 DK, DKC, DC는 평균 9.5kA를 보여 저감효과에 차이는 크게 발생하지 않았으나, 교락비접지방식에서는 KC의 경우 10.95kA로 가장 높은 전류값을 보였으며 KCG는 9.6kA, KD와 KDC는 각각 9.51kA와 9.5kA의 순으로 나타났다.

표 10. 저감장치 보호방안 적용에 따른 시스템 전압

고장종류	보호방안	1선지락고장(4km)	
		#11(IJ)에 크로스본드 리드선에 리액터 설치	
		시스템대지간 전압(kV)	절연통간 전압(kV)
대지간방식	DK	8.88	6.5
	DKC	8.93	6.44
	DC	8.94	6.59
	DCG	7.9	6.4
교락비접지방식	KD	9.47	7.45
	KDC	9.46	6.18
	KC	16.1	7.2
	KCG	6.6	7.03

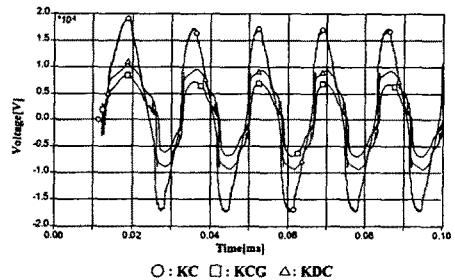


그림 10. 4km 지락고장시 교락비접지방식에서 보호방안에 따른 시스템대지간 전압 파형

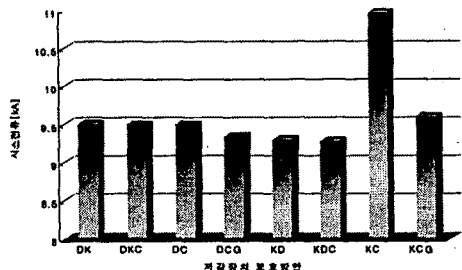


그림 11. 저감장치 보호방안에 따라 저감장치에 흐르는 전류 리액터를 저감장치로 사용하는 지중송전계통에서 1선지락고장

발생시 저감장치를 보호하기 위한 보호방안을 적용하여 보호효과를 검토하기 위해 크로스본드 리드선에 저감장치로 리액터가 설치된 접속함에서의 시스 전위상승 및 저감장치에 흐르는 고장전류를 비교하여 검토한 결과, 대기방식에서는 저감효과에 큰 차이가 발생하지 않았지만 DCG, DKC, DK, DC순으로 저감효과가 나타났다. 다만 DCG의 경우 고조파가 다양으로 포함된 고장발생이 발생할 경우 주파수 상승에 의해 저감장치 뿐 아니라 절연통간에도 일시적인 전압상승이 우려된다. 한편 교락비절지방식에서는 KC의 경우 가장 높은 시스대시간 전압이 유기되고 있고 저감장치에 흐르는 전류의 양도 가장 높아 저감효과가 가장 낮았고, 교락비절지에 대기방식으로 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속하는 방안인 KDC의 저감효과가 가장 좋게 나타났다. 저감효과가 좋은 순으로 나열하면 KDC, KD, KCG, KC의 순이다.

3.3 뇌써지

본 논문에서는 뇌격전류 피크값(10)을 60kA로 설정하였으며 뇌격파형은 2/70μs, 뇌써지 임피던스는 400Ω으로 하였다. 뇌격파형은 램프파를 사용하여 선형적으로 상승, 감쇠하는 것으로 근사화 하였다. 또한 뇌써지 해석을 위해 본 연구에서는 그림 1의 2회선 지중송전계통에 154kV 20km 가공선로 2회선을 같이 모델링 하여 혼합송전계통을 구성하였으며, 가공선로는 0.5km마다 10Ω으로 접지하였고, 지중선로의 케이블 헤드로부터 1km 떨어진 지점의 #2 T/L의 도체 A상에 직격뇌가 침입한 것으로 설정하여 뇌써지 침입시 시스순환전류 저감장치에 미치는 영향 및 저감장치 설치에 따른 시스의 과도현상 변화를 다양하게 검토하였다.

3.3.1 저항 및 리액터 저감장치 과도특성

표 11에서는 뇌격침입시 저항 및 리액터에 유기되는 시스대시간 전압 및 절연통간 전압을 대기방식 및 교락비절지방식에서 각각 저감장치 유무에 따라 비교하여 나타내었다. 표에서처럼 대기방식에서 시스대시간 전압은 SVL의 동작에 의해 저항 설치시 0.38kV의 전압이 상승하였고, 리액터 설치시는 2.19kV의 시스대시간 전압이 저감장치 없을 때에 비해 상승하였다. 반면 대기방식에서 SVL의 동작에 따른 저감효과가 지파되는 절연통간 전압은 리액터 설치시 뇌 써지 침입시 발생하는 High Frequency의 영향으로 임피던스가 상승하여 일시적으로 전압이 175kV까지 상승하였다. 따라서 리액터의 저감장치를 사용하는 대기방식에서는 저감장치 보호방안이 반드시 필요할 것으로 사료된다. 교락비절지방식에서는 저항 및 리액터에서 모두 대기방식에 비해 상승폭이 작았으며, 특히 절연통 양단간에 설치되어있는 SVL의 효과로 인해 리액터 설치시에도 절연통간전압이 9.77kV를 보여 일시적인 상승현상이 나타나지 않았다.

표 11. 뇌격 침입시 저감장치에 유기되는 시스전압

저감장치	대기방식		교락비절지방식	
	#11(IJ)		#11(IJ)	
	시스대시간 전압(kV)	절연통간 전압(kV)	시스대시간 전압(kV)	절연통간 전압(kV)
무	8.34	16.9	8.87	8.68
저항	8.72	22.2	9.45	9.13
리액터	10.53	175	13	9.77

그림 12에서는 #2 T/L에 뇌써지 침입시 저감장치 리액터를 사용하는 교락비절지 방식에서 저감장치에 흐르는 전류의 크기를 #2 T/L과 #1 T/L의 회선별로 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 #1 T/L에도 최대 0.25kA의 전류가 흘러 0.5kA가 흐르는 #2 T/L에 비해 적은 값이지만 뇌써지에 의한 영향이 나타나고 있음을 알 수 있다.

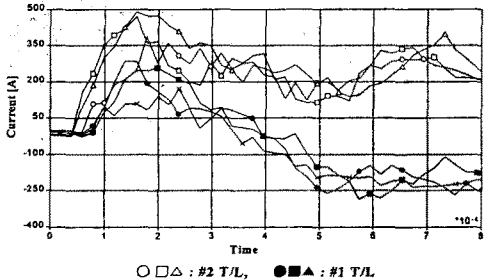


그림 12. 저감장치 리액터를 사용하는 교락비절지 방식에서 #2T/L과 #1T/L의 저감장치에 흐르는 전류 비교

표 12에서는 뇌격 침입시 저항과 리액터의 저감장치 각 상에

흐르는 시스전류를 SVL 결선방식별로 비교하여 나타내었다. 대기방식에서는 교락비절지 방식에 비해 저항 사용시는 약 1.66배, 리액터 사용시는 5배의 높은 전류가 발생하였으며, 저항 및 리액터를 비교한 결과 저항에 비해 리액터에 흐르는 전류의 크기가 더욱 적게 나타났다. 이는 뇌써지 침입시 나타나는 High Frequency의 영향으로 리액터의 임피던스가 상승하여 저항에 비해 전류의 크기가 상대적으로 크기 감소되는 것으로 사료되며, 또한 이 때 발생하는 과전압은 SVL의 동작에 의해 저감될 수 있다.

표 12. 뇌격 침입시 저감장치 각 상에 흐르는 시스전류

저감장치	SVL 결선방식	#11(IJ) 시스전류[kA]		
		A-C	B-A	C-B
		저항	13.09	10.7
리액터	대기방식	2.46	2.54	2.5
	교락비절지	0.38	0.47	0.5

3.3.2 저감장치 보호방안 적용에 따른 과도특성

크로스본드 리드선과 직렬로 저항 및 리액터의 시스순환전류 저감장치가 설치된 케이블 계통에 뇌써지가 침입하면 시스 전위 뿐 아니라 저항 및 리액터에 높은 과전압이 발생하게 되어 저감장치의 절연강도가 초과될 경우 파괴될 가능성이 많다. 만약 저감장치가 파괴되면 크로스본드 시스템의 기능이 상실되어 판단점지의 형태 되므로 매우 높은 과전압을 발생시켜 저감장치 외에 다른 지중설비 및 케이블에도 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 특히 리액터 설치시 고주파에 의한 임피던스 증가로 인해 일시적으로 전압이 상승하는 대기방식의 경우에는 저감장치에 대한 보호방안이 더욱 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 표 6에서 제시한 저감장치 보호방안을 도입하여 뇌 써지 침입시 시스의 과도특성 및 시스순환전류 저감장치의 보호방안 적용에 따른 변화특성에 대해 분석하였다.

표 13. 저감장치 저항 설치시 보호방안에 따른 시스전압

SVL 결선방식	보호방안	저감장치	#10(IJ)		#11(IJ)	
			시스대시간 전압[kV]	절연통간 전압[kV]	시스대시간 전압[kV]	절연통간 전압[kV]
대기방식	DK	저항	8.09	8.75	9.05	9.12
		DKC	8.06	8.96	6.5	9.21
		DC	8.9	19.3	8.3	13.5
		DCG	9.54	19	7.17	12.8
		KD	8.09	9.06	9.5	9.07
교락비절지방식	KDC	저항	8	9	9.49	9.1
		KC	9.39	9.1	10.1	9.06
		KCG	9.42	9.09	5.74	10.1

표 13에서는 뇌써지 침입시 순환전류 저감장치 저항이 설치된 계통에서 보호방안 적용에 따른 시스대시간 전압 및 절연통간 전압을 SVL 결선방식별로 비교하여 나타내었다. 표에서와 같이 대기방식에서 #11 접속함에 발생하는 절연통간 전압은 보호방안이 없을 때 22.2kV에 비해 많은 전압이 저감되었으며, 시스대시간 전압은 DK에서 가장 높았던 반면 DKC에서는 6.5kV로 가장 적게 발생하였다. 교락비절지방식에서는 KCG에서 시스대시간 전압이 5.74kV로 가장 낮았으며, KD, KDC 등의 보호방안의 보호 효과에 대한 차이는 크게 나타나지 않았다.

표 14. 저감장치 리액터 설치시 보호방안 적용에 따른 시스전압

SVL 결선방식	보호방안	저감장치	#10(IJ)		#11(IJ)	
			시스대시간 전압[kV]	절연통간 전압[kV]	시스대시간 전압[kV]	절연통간 전압[kV]
대기방식	DK	리액터	9.13	10.24	9.75	9.58
		DKC	8.13	9.91	10.39	10.16
		DC	9.5	17.5	9.3	18.5
		DCG	9.5	17.7	8.38	17.0
		KD	8.22	9.02	10.3	9.43
교락비절지방식	KDC	리액터	8.75	9.09	9.8	9.1
		KC	10.89	9.18	11.9	9.24
		KCG	10.1	9.47	9.45	12.8

표 14에서는 뇌써지 침입시 저감장치 리액터가 설치된 계통에서 보호방안 적용에 따른 시스대시간 전압 및 절연통간 전압을 SVL 결선방식별로 비교하여 나타내었다. 대기방식에서 저감장치 보호방안이 없을 때 절연통간 전압이 주파수의 영향으로 일시적으로 170kV까지 상승하였으나 보호방안 적용결과 절연통간 전

압은 DK, DKC에서 9.58 kV와 10.16kV를 보여 SVL과 DKC의 RDP의 동작에 의한 보호효과가 우수하다는 것을 알 수 있다. 반면 DCG 방안에서는 보호효과가 전혀 나타나지 않았다. 교락비접지 방식에서는 KDC가 가장 좋은 보호효과를 보였으며, KD의 보호효과도 비교적 양호하게 나타났다.

그림 13에서는 뇌써지 침입시 각각 저감장치 저항에 흐르는 전류의 크기를 대지간방식과 교락비접지 방식에서 각각 나타내었다. 그림에서처럼 대지간방식에서 전류 저감효과는 DKC에서 6.57kA로 6.52kA가 감소되어 저감효과가 가장 좋았으며 DC는 6.19kA, DK는 3.49kA가 감소되었으나 DCG에서는 전류 저감효과가 나타나지 않았다. 교락비접지 방식에서는 KDC와 KC는 저감효과가 나타났으나 KD 및 KCG에서는 전류 저감효과가 나타나지 않았다.

또한, 그림 14에서는 저감장치 리액터에 흐르는 전류의 크기를 대지간방식과 교락비접지 방식에서 각각 나타내었다. 그림에서처럼 리액터에서는 전체적으로 저항에 비해 전류의 발생이 적었으며, 보호방안 적용에 따른 전류 감소효과도 저항에 비해 양호하게 나타나고 있다. 대지간방식에서 저감장치에 흐르는 전류의 크기는 보호방안이 없을 때 2.54kV 였으나, 보호효과가 나타나지 않은 DCG의 방안을 제외한 모든 방안에서 0.5kA 이하로 저감되었으며, 저감효과는 DKC, DC, DK의 순으로 나타났다. 또한 교락비접지 방식에서는 보호방안이 없는 경우에도 대지간방식보다 훨씬 적은 0.5kA의 전류가 발생하였으며, KDC 및 KC에서 0.32kA로 저감효과가 가장 좋았다.

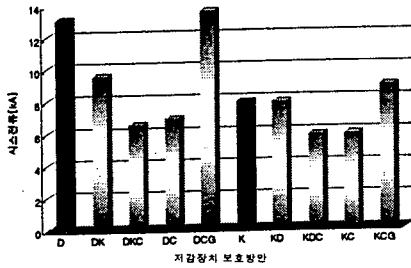


그림 13. 보호방안에 따른 저항에 흐르는 전류

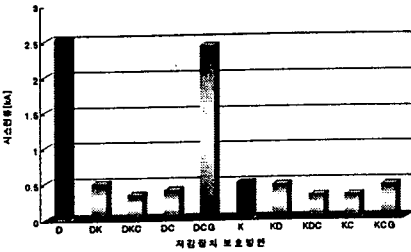


그림 14. 보호방안에 따른 리액터에 흐르는 전류

저항을 저감장치로 사용하는 혼합송전계통에서 뇌써지 침입시 보호방안을 적용한 후 보호효과를 검토하기 위해 크로스본드 리드선에 저항이 설치된 접속함에서의 시스 전위상승 및 저감장치에 흐르는 고장전류를 비교하여 검토하였다. 이 결과 대지간방식에서는 저감장치에 흐르는 전류의 저감효과가 나타나지 않은 DCG의 저감효과가 가장 적었으며, DKC, DC, DK 순으로 나타나 대지간방식에 교락비접지방식을 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속하는 방안인 DKC의 저감효과가 가장 우수하였다. 또한 교락비접지 방식에서도 SVL 결선방식을 혼합하고 RDP를 병렬로 접속한 KDC의 방안의 보호효과가 가장 우수하였으며, KC, KD, KCG의 순으로 나타났다.

한편, 크로스본드 리드선에 리액터가 설치된 접속함에서의 시스 전위상승은 저항과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았으나 전류의 저감효과는 매우 좋았다. 이는 리액터의 주파수성분이 증가함에 따라 임피던스가 증가하여 상대적으로 저감장치로 흘러가는 전류의 크기는 감소되며 이 때 발생하는 과전압은 SVL 및 보호방안의 RDP의 동작에 의해 저감되기 때문으로 사료된다. 대지간방식의 보호효과 검토 결과 DCG의 방안은 과전압 및 전류면에서 저감효과가 나타나지 않았으나 다른 방안은 DKC, DK, DC 순으로 보호효과가 나타났다. 또한 교락비접지 방식에서는 SVL이 절연통 및 저감장치와 병렬로 접속되어 있는 특성에 의해 전압상승도 크지 않았으며, 저감장치에 흐르는 전류의 양도 대지간방식에 비해 매우 낮은 전류를 보였다. 이와 같은 교락비접지 방식의 보호효과는 KDC, KC, KD, KCG 순으로 나타났다.

우 낮은 전류를 보였다. 이와 같은 교락비접지 방식의 보호효과는 KDC, KC, KD, KCG 순으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 시스순환전류 과다로 문제가 발생하고 있는 선로에 대한 개선방안으로 저항과 리액터의 저감장치와 설치된 지중송전계통에 1선지락고장 및 뇌 써지 침입으로 인한 과도 발생시 시스 계통의 과도현상 변화 특성과 저감장치에 미치는 영향, 저감장치 보호방안 적용에 따른 시스 전위 및 전류의 감소 효과 등을 다양하게 분석하였다.

1선지락고장의 경우 리액터에 비해 저항에서 발생하는 과전압 및 전류의 양이 적게 나타났다. 뇌써지 침입시에는 저감장치의 보호방안이 없는 경우 저항의 과전압이 리액터에 비해 높게 발생하였으나, 보호방안 도입으로 인해 저항과 리액터의 시스 과전압의 차이는 크지 않았다. 그러나 전류 저감효과면에서는 리액터에서 매우 좋은 특성을 보였다. SVL 결선방식에 의해 분석해보면 절연통간 전압은 교락비접지 방식에서 저감효과가 크며, 시스대지간 전압은 대지간방식에서의 저감효과가 크게 나타났고, 보호방안 적용 이전의 경우 저감장치에 흐르는 전류는 교락비접지방식이 약간 높았으나 차이는 크지 않았으며, 뇌써지 침입시에는 대지간방식이 교락비접지방식에 비해 월등히 높게 측정되었다. 그러나 보호방안을 적용한 결과 이에 대한 차이는 상당 부분에서 극복할 수 있었다.

또한, 저감장치 보호방안 적용에 따른 보호효과에 대해 검토한 결과 대지간방식 또는 교락비접지방식에서 저감장치에 RDP를 병렬로 접속하고 한쪽단을 접지 시키는 방안인 DCG와 KCG의 보호효과는 1선지락고장 및 뇌 써지 침입시 모두에서 적게 나타났으며, KC, DC의 방안도 1선지락고장시 지락전류 저감효과가 좋지 않았다. 반면, RDP를 사용하지 않고 대지간방식 및 교락비접지 방식만을 혼합한 KD 및 DK에서의 저감효과는 어느정도 나타났으나, 특히 KD 및 DK 방안에서 저감장치에 RDP를 병렬로 접속한 DKG, KDG 방안의 저감효과는 매우 우수하게 나타났다.

지락고장이나 뇌 써지 침입에 의해 지중 설비가 파손되면 전체적인 지중송전계통이 영향을 받을 수가 있다. 특히 시스순환전류 저감장치는 크로스본드 리드선과 직렬로 접속되어 있기 때문에 저감장치의 파손은 곧 크로스본드 접지 기능의 상실로 이어지며, 시스 회로가 단선 되어 단선된 양단에서 높은 시스 전위가 발생하게 된다. 이는 SVL을 포함한 방식출 및 절연통에도 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 시스순환전류 저감장치의 보호방안은 가능한 완벽히 보호할 수 있는 방안을 채택해야 될 것으로 사료된다. 또한 SVL을 포함한 RDP는 과전압에 의해 동작하나, 결정적인 열화의 원인은 과전류의 유입에 의한 영향으로 보고되고 있다. 따라서 이에 대한 영향도 고려하여 보호방안이 채택되어야 할 것으로 사료된다.

저항은 양단에 과전압이 발생할 경우, 소비되는 에너지량의 증가로 높은 과열이 발생하여 파괴될 우려가 많으므로, 본 연구에서는 시스순환전류 저감장치로 보호방안이 포함된 리액터를 사용하는 방안을 권장한다. 리액터는 특히 뇌써지 발생시에도 저항에 비해 과도로 인한 보호효과가 우수하게 평가되었다. 이와 같은 리액터에 대한 보호방안으로는 대지간방식과 교락비접지 방식에서 각각 SVL 결선방식을 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속한 DKC와 KDC의 방안이 반드시 고려 되어야 할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 정재균, 이종범, 강지원, 장대민, "지중송전계통에서 시스순환전류 해석 및 저감방안", 대한전기학회 논문지, Vol.50A, No.11, 2001
- [2] 강지원, 양해원, "지중송전계통에서 저감장치를 이용한 시스순환전류 저감방안에 관한 연구" 대한전기학회 논문지, Vol. 51A, No. 9, 2002
- [3] 강지원, 양해원, "해석 및 측정을 통한 시스순환전류 특성 및 상승 원인 검토" 대한전기학회 논문지, Vol.51A, No.10, 2002
- [4] 차재용 외5, "다회선 지중송전 케이블에서의 EMTF를 이용한 시스순환전류 분석, 대한전기학회 논문지, Vol.50A, No.10, 2002
- [5] 전력연구원, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구,1998
- [6] IEEE, "IEEE Guide for the application of sheath-bonding Methods for single-conductor cables and calculation of induced voltages and currents in cable sheaths, ANSI/IEEE Std 575-1988
- [7] J.S.Barrett, G.J.Anders, "Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths, and armour of electric power cables mathematical models and comparison with IEC Standard 287
- [8] M.G.Dwek, M.N.Eggleton, "Electric parameters of 400kV and 275kV cables used in England and Wales"