

시스 순환전류 저감장치의 개발 및 전기적 특성 검토

하체웅* · 김정년* · 김동욱* · 감지원** · 김재승***
LG 전선(주)* · 전력연구원** · 한국전력공사***

Development of Restraining-unit of Sheath Circulating Current and Its Electrical Characteristics

C. W. Ha* · J. N. Kim* · D. W. Kim* · J. W. Kang** · J. S. Kim***
LG Cable Ltd.* · KEPRI** · KEPCO***

Abstract - In order to reduce the sheath circulating current, same arrangement and balanced length of cable are required for the underground cable system.

But practically, changing the whole arrange of cable which is already constructed is impossible. Therefore, It is necessary to apply the restraining-unit of sheath circulating current at the cross-bonding wire of insulated joint because the impedance of restraining-unit is able to reduce sheath circulating current at a normal condition. Even at a transient state, the restraining-unit must maintain electrical and mechanical characteristics. In this paper, the features of restraining-unit developed by LG Cable as well as the electrical test results are described. It proves that the restraining-unit is applicable to the underground cable system where sheath circulating current rises.

1. 서 론

지중 송전 구간 내 케이블의 회선수가 증가함에 따라 기존의 1회선 송전 때보다 케이블 시스에 흐르는 순환전류가 증가하고, 그 양상도 또한 복잡해지는 결과를 가져와 전력손실, 케이블의 열화 및 시스 유기전압에 의한 인체에 위해요소가 발생할 우려가 있다.

특히, 실제 지중송전계통에서 시스 순환전류가 증가할 경우 시스 손실을 증가시켜 시스의 온도가 상승하게 되고 결국 허용전류 감소의 한 요인이 된다. 관로포설의 경우 시스 순환전류에 의한 손실률을 0.05로 가정하고 있는데 이 경우 시스에는 허용전류의 12%보다 큰 순환전류가 흐를 수 있으며, 36% 이상이 되면 허용전류를 10%이상 감소시킬 수 있다. 또한 전력구 포설의 경우 시스 순환전류에 의한 손실률을 0.03으로 가정하고 있는데 이 경우 시스는 허용전류의 10%보다 큰 시스 순환전류가 흐를 수 있으며, 48% 이상이 되면 허용전류를 10% 이상 감소시킬 수 있다.[1]

따라서 시스 순환전류를 저감하기 위한 다양한 방법들이 제시되고 있는데, 신설 선로에 대해서는 케이블 간 이격거리 균일, 접속함 간 거리 불평형 해소, 포설방식 혼합의 최소화 등이 있고, 기설 선로에 대해서는 시스 순환전류를 저감시키기 위한 저감장치의 설치 등이 있을 수 있다.[1,2]

하지만 저감장치는 정상 상태 뿐만 아니라 과도 상태 및 사고 시에도 기존 계통에 영향을 미치지 않아야 되고 저감장치 제품에 있어서 파손이나 열화 등이 발생되어서는 안된다.

본 논문에서는 연구소가 자체 개발한 시스 순환전류 저감장치의 외형, 전기적 특징 및 저감장치 구비조건에 따른 테스트 결과에 대해서 기술하였다. 테스트 결과를 통해서 시스 순환전류를 저감시킬 수 있는 저감장치에 대해서 실 선로 적용에 필요한 신뢰도를 확보 할 수 있었고 저감장치 설치에 따른 시스 순환전류 감소가 가능

하게 되어 지중선로의 합리적 및 경제적 운영에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 시스 순환전류 저감장치의 개발 및 특징

저감장치가 갖추어야 할 조건은 실 계통을 고려하였을 때, 정상상태에서 시스 순환전류를 저감시켜야 하고 과도 및 사고전류가 흘렀을 때 전력계통 뿐만 아니라 저감장치 제품의 특성을 변화시켜서는 안 된다. 이러한 특성을 고려하여 2절에서는 저감장치가 구비해야 할 조건에 대해서 기술하였다. 그리고 3절에서는 자체 개발한 시스 순환전류 저감장치에 대하여 과도 및 단시간 전류 특성 시험 등을 실시한 결과에 대해서 기술하였다.

2.1 저감장치의 구비 조건

저감장치는 스위칭 및 뇌 서지 침입 시 제품의 절연에 문제가 없어야 한다. 더욱이 지중계통에서 지락사고가 발생 하여 수~수십kA 사고전류가 흘렀을 때 저감장치는 충분한 단시간 전류 강도를 가져야 한다. 이러한 특성을 고려하였을 때 저감장치가 갖추어야 할 구비 조건은 다음과 같다.[1,3]

- (가) 상시의 시스 전류에 대해서는 선로의 임피던스에 비해서 적당히 높은 고 임피던스를 가져서 사고시의 대전류에 대해서는 대부분을 시스 귀로가 될 수 있도록 극히 낮은 저 임피던스 특성을 가질 것
- (나) 저감장치 내에서 고주파를 발생하여 근접통신선에 대한 유도장해를 일으키지 않도록 비포화 부분의 전압 특성은 직선성을 가질 것
- (다) 선로의 예상 최대지락전류에 대해서 충분한 단시간전류 강도를 가질 것
- (라) 절연성능 및 내수성능은 케이블 본체 및 여기에 부착하는 방식층 보호 장치와 동등 이상일 것
- (마) 소형 경량으로서 협소한 장소에서도 용이하게 취부할 수 있을 것
- (바) 상규사용상태에 있어서는 무보수 및 무점검 에서도 충분히 그 성능을 유지할 수 있을 것

따라서, 위의 조건을 만족하는 저감장치를 그림 1과 같이 제작하였다.

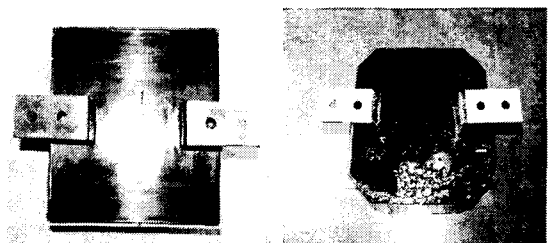


그림 1. 시스 순환전류 저감장치의 외관

그림 1에서 보듯이 시스 순환전류의 외장은 에폭시 몰드를 사용하여 방수 및 방폭 특성이 우수하도록 제작되었고, 단자는 동 부스바를 사용하여 크로스 본드 리드선 및 SVL(Sheath Voltage Limiter)의 접속이 용이하도록 하였다. 또한 벽면이나 지지대에 취부가 용이하도록 취부 단자를 부착하였다.

연구소에서 제작한 시스 순환전류 저감장치는 일본에서 제작하였던 것이 비해서 크기나 중량이 상당히 적으면서도 동등 이상의 성능을 발휘할 수 있도록 하였다. 이러한 시스 순환전류 저감장치의 크기 및 중량을 표 1에 나타내었다.[3]

표 1. 시스 순환전류 저감장치의 크기 및 중량 비교

항목		25kA용(일본)	25kA용(LG)
철심		有	有
외장		고무물딩	에폭시물딩
크기 (mm)	폭	700	240
	길이	295	250
	높이	170	140
중량		46	29

2.2 시스 순환전류 저감장치의 주요 특성

시스 순환전류 저감장치의 테스트 항목은 일본의 저감장치의 그것을 따랐다. 단지 전압-전류 특성 시험에서 비포화 임피던스 특성 부분은 저감장치를 우리나라 특성에 맞춰 소형으로 제작함에 따라 약간의 변동이 발생하였지만 실제동 운영 시 영향이 없다. 또한 맨홀이나 열악한 조건에 저감장치 취부가 가능하도록 하기 위해서 방수 특성을 포함시켰다. 저감장치가 갖춰야할 주요 특성을 표 2에 나타내었다.

표 2. 시스 순환전류 저감장치의 주요 특성

항목	세부사항
전압-전류 특성	<ul style="list-style-type: none"> 비포화 임피던스 특성(30[A]이하) $V/I = 0.5 \pm 50\%$ 비포화 최대 단자전압 50[V] 포화의 경우(200[A])이상 $\Delta V/\Delta I = 0.15[\Omega]$ 이하 200[A] 통전시 최대 단자전압 50[V] 이하
단시간 전류 특성	<ul style="list-style-type: none"> 25[kA] 용 : 실효치 25[kA] (제 1과 파고치는 25[kA]×2.5배)×0.1초×3회 40[kA] 용 : 실효치 40[kA] (제 1과 파고치는 40[kA]×2.5배)×0.1초×3회 또는, 40[kA]×0.6초×1회
절연 성능	<ul style="list-style-type: none"> 耐 상용주파 파고전압 4[kV]×1분(대지간) 耐 표준충격파 전압 ±21[kV]×10회(대지간) ±42[kV]×10회(단자간) 절연저항 10[MΩ] 이상
방수 특성	<ul style="list-style-type: none"> JIS C 0920(전기기계기구의 방수시험 및 고형물 침입에 대한 보호등급)에 근거하여 150[mm]이상 침수시켜 5분간 경과 후 5[MΩ] 이상의 절연성능

3. 시스 순환전류 저감장치의 테스트 결과

2절에서 제시한 시스 순환전류 저감장치의 주요 특성을 근거로 저감장치에 대하여 전압-전류 특성부터 방수 특성까지의 테스트를 완료 하였고, 모든 테스트의 결과를 다음에 나타내었다.

3.1 저감장치의 전압-전류 특성 시험

시스 순환전류 저감장치의 전압-전류 특성 시험은 정상상태에서는 전류를 변화하면서 단자전압을 측정하는 다음 결과를 가지고 포화 및 비포화 특성을 만족하는지를

판정 해야만 한다.

표 3에 10~200A까지의 전류를 인가 하였을 때의 저감장치의 전압, 저항, L, Gauss를 나타내었다. 또한 그림 2는 실제 테스트 하였던 상황을 나타낸 것이다.

표 3. 저감장치의 V-I 특성 시험

전류(A)	#1971				#2971				#3971			
	전압(V)	저항(Ω)	L(μH)	Gauss	전압(V)	저항(Ω)	L(μH)	Gauss	전압(V)	저항(Ω)	L(μH)	Gauss
10	6.1	0.610	1.62	6.315	6.7	0.670	1.78	6.908	6.5	0.650	1.72	6.729
20	10.8	0.540	1.43	11.181	11.5	0.575	1.53	11.805	11.7	0.586	1.56	12.112
30	14.38	0.478	1.27	14.887	15.1	0.533	1.34	15.632	15.23	0.538	1.35	15.767
40	16.72	0.418	1.11	17.309	17.4	0.436	1.15	18.013	17.46	0.437	1.16	18.075
50	18.49	0.370	0.98	19.141	19.1	0.382	1.01	19.773	19.23	0.385	1.02	19.828
60	20.05	0.334	0.89	20.765	20.65	0.344	0.91	21.378	20.8	0.347	0.92	21.533
70	21.35	0.305	0.81	22.102	22.01	0.314	0.83	22.785	22.1	0.316	0.84	22.879
80	22.8	0.283	0.75	23.395	23.22	0.280	0.77	24.038	23.34	0.282	0.77	24.162
90	23.66	0.263	0.70	24.514	24.29	0.270	0.72	25.146	24.4	0.271	0.72	25.260
100	24.69	0.247	0.65	25.580	25.30	0.253	0.67	26.222	25.47	0.255	0.68	26.367
150	29.14	0.194	0.52	30.167	29.82	0.189	0.53	30.871	30	0.200	0.53	31.057
200	32.82	0.158	0.44	34.090	33.72	0.159	0.45	34.928	33.63	0.170	0.45	35.125
250	35.53	0.146	0.39	37.817	37.41	0.150	0.40	38.728	37.58	0.150	0.40	38.904

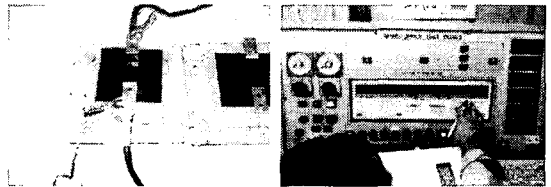


그림 2. 저감장치의 전압-전류 특성 시험

표 3에서 보듯이 시스 순환전류의 30A 이하의 비포화 임피던스 특성은 $V/I = 0.5\Omega \pm 34\%$ 가 발생하였고, 200A 이상의 포화의 경우 $\Delta V/\Delta I = 0.15\Omega$ 이상이 측정 되어 표 2의 시스 순환전류 저감장치의 주요 특성을 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 저감장치의 단시간 전류 특성 시험

시스 순환전류가 설치된 지중케이블 계통에서 지락사고가 발생 하였을 때 시스 순환전류 저감장치는 거의 제로에 가까운 임피던스 특성을 가져야 한다. 따라서 사고 전류가 시스를 통해서 흐르는데 있어서 아무런 문제가 발생하지 않아야 하고, 저감장치 자체도 사고전류에 대해서 충분한 전류 강도를 가져야 한다.

통상 15kV의 최대 지락전류는 35kA 정도가 흐른다고 가정 하였을 때, 고장전류의 분류 율 및 저감장치의 포화저항 등을 고려하여 시스 순환전류 저감장치엔 약 25kA 정도의 고장전류가 흐르게 된다.

따라서 단시간 전류 특성 시험을 위해서 저감장치에 25kA의 시험전류를 0.1초간 3회 인가 시험을 실시하였고 시험결과 제품에 이상이 발생하지 않았다. 시험 전류의 파고치는 62.5kA(제 1과 파고치는 25kA×2.5배)로 설정하였다.

그림 3은 실제 테스트 하였던 상황을 사진으로 나타낸 것이고 표 4는 단시간 전류 특성 시험 결과를 나타낸 것이다.

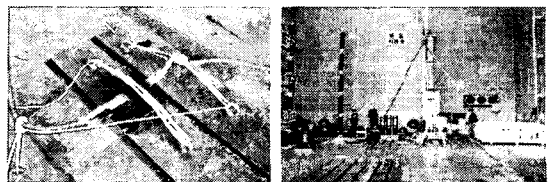


그림 3. 단시간 전류 특성 시험

표 4에서 보듯이 저감장치에 최대 66kA의 시험전류가

흘렀을 때 시험 전압은 700~900V의 전압을 나타내었다. 그림 4는 단시간 특성 시험 중 시험번호 HPC 4060-003의 실측 파형을 나타낸 것이다.

표 4. 저감장치의 단시간 특성 시험 결과

시험 번호	시험 전압 (60Hz, V)	시험 전류		통전시간 (초)	비고
		과고치 (kAp)	실효치 (kA)		
HPC 4060-003	700	25.6	12.3	0.1	50% Calibration
HPC 4060-004	900	66	25.4	0.1	이상 無
HPC 4060-005	900	62.5	25.4	0.1	이상 無
HPC 4060-006	900	62.5	25.4	0.1	이상 無

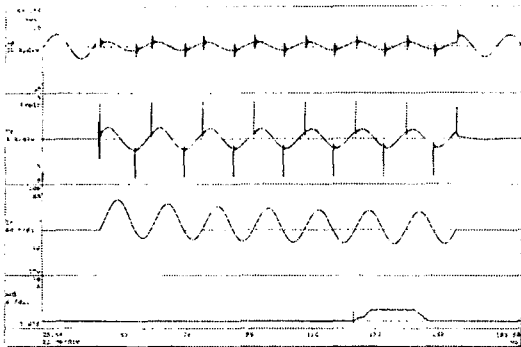


그림 4. 저감장치 단시간 전류 특성시험 실측 파형

3.3. 상용주파 교류 내전압 시험

상용주파 교류 내전압 시험을 위해서 대지-권선간에 4kV를 1분간 과전해서 권선과 대지간에 절연저항이 10MΩ 이상 나와야 되는데, 본 시험 결과 이상 없음을 확인 하였다. 그림 5는 상용주파 교류 내전압 테스트를 하였던 상황을 사진으로 나타낸 것이다.

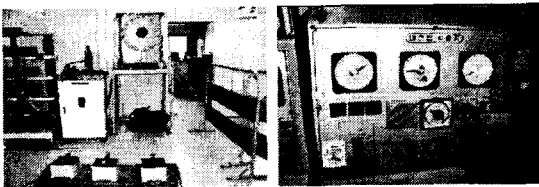


그림 5. 상용주파 교류 내전압 시험

3.4 충격 내전압 시험

저감장치는 각종 서지의 침입에 대해서 절연특성을 유지해야 하기 때문에 저감장치 보호용 SVL(Sheath Voltage Limiter)를 병렬로 취부 함으로서 저감장치를 보호 할 수 있다.[1]

하지만, 열악한 경우에 SVL의 파손 및 부동작 등을 고려하여 저감장치 자체만으로도 충격 내전압에 견딜 수 있도록 제작을 하였다.

따라서 저감장치 권선과 권선간에 ±42kV의 충격 내전압을 10회 인가해서 권선과 대지간에 절연 저항이 10MΩ 이상이 나와야 되는데 본 시험 결과 이상 없음을 확인하였다. 그림 6은 충격 내전압 테스트를 하였던 상황을 사진으로 나타낸 것이다.

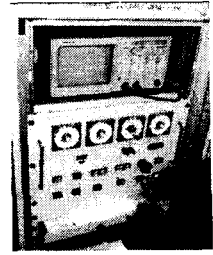


그림 6. 충격 내전압 시험

3.5 방수 특성시험

시스 순환전류는 거리가 불평형이 심한 곳에서 많이 흐르지만 전력구 방식과 맨홀방식의 혼합 포설이 이루어진 곳 같이 케이블 각 상간 이격거리가 불평형 인 곳에서 시스 순환전류가 많이 흐른다.

따라서 혼합 포설 지점에 대해서 시스 순환전류 저감장치를 취부하기 위해서는 전력구 뿐만 아니라 맨홀의 크로스본드 지점에 대해서도 시스 순환전류 저감장치를 설치할 수 있어야 한다. 하지만 맨홀인 경우 저감장치를 수중에 설치하여야 하는 경우도 발생한다.

연구소에서 개발한 저감장치는 그림 1과 표 2에서 보듯이 예폭시 물당의 수밀 구조로 구성되도록 하여서 맨홀 등의 열악한 환경에서도 방수 특성을 유지 할 수 있도록 제작하였다.

이러한 저감장치의 방수특성 시험은 저감장치를 150mm 이상 침수시켜서 권선과 대지 간의 절연저항이 10MΩ 이상이 나와야 되는데 본 시험 결과 이상 없음을 확인하였다. 그림 7은 방수특성 시험을 하였던 상황을 사진으로 나타낸 것이다.

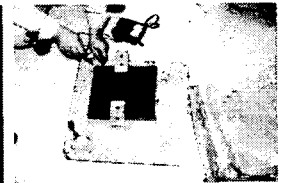
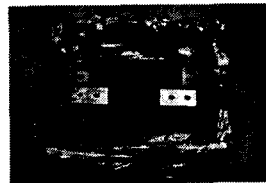


그림 7. 방수 특성 시험

4. 결 론

기설 선로의 시스 순환전류를 적용할 수 있는 가장 효과적인 방안으로 시스 순환전류 저감장치의 설치를 들 수 있다. 하지만 시스 순환전류 저감장치는 자체의 전기적 기계적 특성이 우수해야 하고, 각종 과도시나 고장 발생시 계통에 미치는 영향이 적어야 한다.

본 연구소에서는 이러한 특성을 만족하는 시스 순환전류 저감장치를 개발하여 각종 Test를 성공적으로 수행하였다. 따라서 시스 순환전류의 적용에 따른 시스 순환전류의 감소를 꾀할 수 있고 더나가 송전용량을 증대시켜 송전 운영에 있어서 합리적 및 경제적 운영을 꾀할 수 있다고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한전 전력연구원, "지중송전케이블 금속시스의 유기전압 및 순환전류 저감에 관한 연구", 보고서, 2003
- [2] 하체웅, 김정년, 이수길, 김동욱, 이종범, 장지원 "다회선 지중송전 케이블에서의 EMTP을 이용한 시스 순환전류 분석", 대한전기학회 논문지, Vol. 51A, No. 10, OCT. 2002
- [3] Teruji Nikaido, et al., "Development of bonding method for reducing sheath current on single core oil filled cable lines, 昭和電線電纜 review