

시스순환전류 저감장치 설치시 거리계전기 응답 특성 평가

정재균* 이종범
원광대

강지원
한전전력연구원

Evaluation of Distance Relay Operation Characteristic with the Reduction Devices Installed in Underground Power Cable Systems

Chae-Kyun Jung* Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Ji-Won Kang
KEPRI

Abstract - This paper analyses the operation characteristic of distance relay when the single line to ground occurs in underground power cable systems that reduction device of sheath circulating current is installed. To apply that reduction device to actual system, the change of line impedance calculated at relay point is also analysed by the connection type of SVLs and fault location, fault inception angle with the installation of reduction device of reactor or not.

1. 서 론

지중송전계통은 대도시를 중심으로 전력전송 수단으로서 중요한 역할을 담당하고 있으며 지중화를 또한 더욱 증가할 것으로 전망된다. 그러나 국내 지중송전계통의 건설은 체계적인 연구에 의한 기준에 의해 시스템을 구성하기 보다는 지리적 특성 등 여러 가지 포괄환경에 의존해 시공하는 사례가 많이 발생하고 있다. 이러한 이유로 여러 지중계통에서 직매식, 판로식, 전력구식의 방식이 한 T/L에서 혼합되어 포설되는 사례와 각 접속합간의 길이불평형 현상이 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 계통의 전기적인 불평형 현상을 심화시켜 시스순환전류를 과다하게 흐르게 하는 원인이 되고 있다. 이러한 과다한 시스전류는 시스전류에 의한 손실을 증가시키며, 단위길이 당 도체와 시스의 손실 비를 증가시키게 된다. 또한 이러한 영향은 케이블의 총 열저항을 상승시켜 허용전류를 저감시키게 된다. 따라서 지금까지의 많은 연구를 통해[1-4]시스순환전류의 특성 및 상승원인에 대한 분석이 이루어 졌으며, 이를 바탕으로 다양한 순환전류 저감방안과 저감장치가 개발되었다. 특히 저감방안 중 임피던스 성분의 투입에 의한 저감장치가 가장 현실적인 방안이면서 효과적인 것으로 분석 되었다.

본 논문에서는 이와 같은 시스순환전류 저감장치의 실제 적용을 위해 저감장치가 설치된 계통에서 고장 발생시 SVL 결선방식과 고장위치, 고장 발생위상별로 계전기 설치점에서 거리계전기가 보는 임피던스의 변화 특성을 저감장치 설치 이전과 비교하여 분석함으로써 저감장치 설치에 따른 거리계전기 응답 특성을 검토하였다.

2. 지중송전계통 모델링 및 저감장치

2.1 지중송전계통 모델링

본 논문의 분석에 사용된 모델은 154kV 2000mm² OF 케이블 계통으로 케이블 선로 길이는 6.254km이며, 부하전류는 300A, 포설방식은 전력구식과 판로식이 혼합된 형태이고, SVL 결선방식은 대지간 방식을 사용하고 있는 실제 운전중인 계통이다. 그림 1에서는 모델계통의 케이블 접속형태 및 각 접속합간의 구간길이를 나타내었다.

2.2 시스순환전류 저감장치

지금까지의 연구를 통해 시스순환전류 저감을 위한 현실적인 방안으로 리액터를 이용한 시스순환전류 저감장치를 제시하였으며[1-3], 이는 순환전류가 상승하는 구간 절연접속합(IJ)의 크로스본드 리드선에 설치된다. 표 1에서처럼 모델계통의 #11(IJ)에 저감장치 2.65mH의 리액터를 설치하였을 때 순환전류는 대체로 큰 폭으로 저감하였으며, 평균 저감율은 84.98%를 보여 높은 저감효과를 보였고, 이는 실제통의 실증시험을 통해서도 증명되었다[1-3].

2.3 시스순환전류 저감장치 보호방안

시스순환전류 저감장치는 정상 운전시 높은 저감효과를 보여 시스순환전류 과다로 문제가 되고 있는 지중케이블 구간인 시스전류를 저감시킴으로써 시스회로 손실율이 감소되며, 이로 인해 상당한 지중송전계통의 송전용량 증대 효과가 있을 것으로 기대된다. 그러나 시스순환전류 저감장치는 크로스본드 리드선에 직렬로 설치되

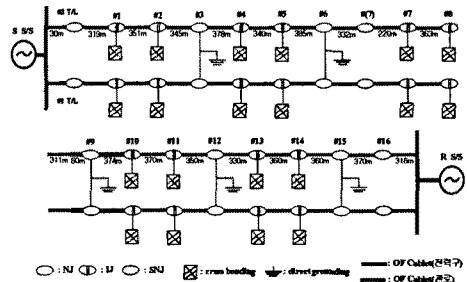


그림 1. 케이블 접속형태 및 구간길이

표 1. #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	
#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

기 때문에, 과도 발생에 의해 저감장치가 파괴되면 크로스본드 리드선은 단선되며, 단선된 크로스본드 리드선을 중심으로 양쪽은 모두 편단접지가 되므로 고장전류가 귀로 하지 못하여 저감장치가 설치되어 있는 접속합에 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압은 매우 상승하게 된다. 또한 이러한 과전압은 방식층 및 절연통에도 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 지중송전계통에 과도 발생시 저감장치 보호를 위한 방안으로 그림 2와 같이 저감장치에 SVL과 같은 특성을 가지는 보호 장치(RDP-Reduction Device Protector)를 제안하였다[4].

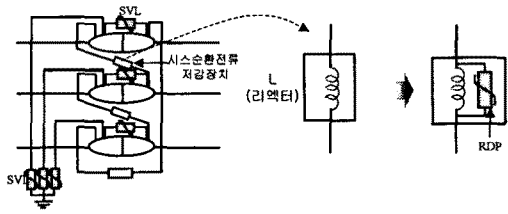


그림 2. 시스순환전류 저감장치 및 보호장치

RDP는 저감장치에 흐르는 과전류를 분배하여 저감장치에 유겨될 수 있는 과전압을 억제시키며, 저감장치가 파괴되면 크로스본드 형태가 파괴되어 케이블 계통 전체에 심각한 영향을 줄 수 있으므로 시스 및 방식층 보호전압보다 낮은 전압에서 저감장치를 보호해야 한다. 또한 이와 같은 뇌저지 및 1선지락고장 검토를 통해 저감장치 보호장치의 보호효과에 대한 분석 결과 대지간 방식과 교차

비직접 방식에서 각각 SVL 절선방식을 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속하는 방안의 보호효과가 가장 우수함을 입증하였다[4].

따라서 본 논문에서는 저감장치 리액턴 설치된 경우와 저감장치 보호장치가 동시에 설치된 경우, 그리고 저감장치가 없는 계통의 동일지점에서 동일 위상의 1선지락고장이 발생하였을 때 계전기기가 설치되어 있는 전원단에서의 임피던스를 비교함으로써 저감장치 설치로 인한 선로의 임피던스 변화 특성을 검토하였다.

3. 케이블 임피던스 계산

3.1 케이블 대칭분 임피던스 계산

본 논문에서는 케이블의 정상(역상)분 임피던스와 영상분 임피던스로 분리하여 계산식을 제시하고자 한다. 시스의 절지저항이 영이고 크로스분당이 이상적으로 되어 있다고 가정하고 케이블의 등가회로를 구성하여 정상분 임피던스 계산식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[5-6].

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{GMD_{3c}}{GMR_{1c}} \times 10^3 \right] \quad (1)$$

여기서,

Z_1, Z_2 : 케이블 정상(역상)분 임피던스 [Ω/km]

R_c : 도체 교류저항 [Ω/km]

GMR_{1c} : 도체간 기하학적 평균반경 [mm]

GMD_{3c} : 도체간 기하학적 평균거리 [mm]

μ_0 : 자유공간의 투자율 [H/m]

이다.

국내의 케이블은 도체 둘레를 시스가 감싸고 있고 또한 지락고장은 도체와 시스 사이의 절연이 파괴되어 접촉에 의해 일어나는 경우가 대부분으로 고장전류는 시스를 통해 대지로 흐르게 되는 특성을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 특성을 고려하여 고장전류가 시스를 통해 대지로 귀로하는 경우 적용 가능한 식 (2)를 이용해 케이블 영상분 임피던스를 계산하였다. 그리고 식 (3)·식 (5)는 Z_{ca} (케이블 도체만의 영상분 임피던스), Z_{co} (케이블 시스만의 영상분 임피던스), Z_{mo} (케이블 도체와 시스간 상호 임피던스)의 임피던스 계산식을 각각 나타내었다.

$$Z_0 = Z_{ca} - \frac{Z_{mo}^2}{Z_{so}} \quad (2)$$

$$Z_{ca} = R_c + R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3c}} \times 10^3 \right] \quad (3)$$

$$Z_{so} = R_s + R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3s}} \times 10^3 \right] \quad (4)$$

$$Z_{mo} = R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3s}} \times 10^3 \right] \quad (5)$$

여기서,

R_e : 등가대지저항 [Ω/km]

R_s : 시스 교류저항 [Ω/km]

GMR_{3s} : 시스의 평균반경 [mm]

GMR_{3c} : 3상 케이블도체 전체를 하나의 단도체로 간주한 경우 그 단도체의 GMR[mm]

D_e : 등가 대지 귀로간 거리 [m]

이다.

3.2 1선지락고장시 선로 임피던스 계산 알고리즘

지중송전계통에서 1선지락고장이 발생하였을 때 계전기에서 측정한 전압과 전류를 이용한 임피던스 계산식은 식 (6)과 같다.

$$Z_{Cable} = \frac{V_A}{I_A + I_0 \cdot \left(\frac{Z_{ca} - Z_{ca}}{Z_{ca}} \right)} \quad (6)$$

여기서,

V_A : 계전기에서의 측정전압[kV]

I_A : 계전기에서의 측정전류[kA]

I_1, I_2, I_0 : 측정전류의 대칭분[kA]

이다.

계전기 설치점에서 추출된 전압과 전류는 고장위상에 따라 고조파 및 DC 음색을 포함하고 있다. 특히 0도 고장의 전류는 많은 DC성분을 포함하고 있으며 90도 고장의 전압은 많은 고조파 성분을 포함하고 있다. 따라서 본 논문에서는 FIR 필터를 통해 전류의 DC 음색을 제거하고 db4 웨이브렛 필터와 DFT 필터를 이용해 기 본파를 추출하여 거리계전기 임피던스 계산 알고리즘을 수행하였으며 저감장치 설치와 저감장치의 보호장치 설치 유무에 따른 계 전기가 보는 임피던스의 변화를 비교 검토하였다.

4. 저감장치 설치에 따른 임피던스 변화

본 논문에서는 시스순환전류 저감장치 설치에 따른 고장시 선로 임피던스 변화를 분석하기 위해 다양한 검토 케이스를 설정하였다. 설정된 케이스는 먼저 SVL 절선방식별로 구분하였으며, 고장 발생 위상각에 따라 분리하여 검토하였다. 또한 고장위치는 저감장치 설치 이전점(2km 지점)과 저감장치 설치점(4km 지점), 그리고 저감장치 설치 이후점(5km 지점)으로 분리하여 동일지점, 동일고장 발생 위상각에서 시스순환전류 저감장치 설치 유무와 저감장치의 보호장치 설치 유무에 따른 선로 임피던스의 변화 특성을 다양하게 검토 하였다. 분석된 케이스의 이름은 대지간방식은 "D", 교락비접지 방식은 "K", 저감장치는 "R", 보호장치는 "P"의 약어를 조합하여 사용하였다.

4.1 저감장치 설치점 이전의 고장

본 논문에서 검토한 모델계통에서는 이미 시스순환전류가 가장 상승하는 구간인 #11(IJ)에 저감장치 2.65mH의 리액터를 설치하여 상당한 시스전류가 저감됨을 확인하였다. 이러한 계통에서 저감장치 설치점 이전 구간인 2km 지점에서 고장이 발생 하였을 때 거리계전기가 보는 선로 임피던스를 저감장치와 보호장치 설치 유무에 따라 비교하여 검토하였다.

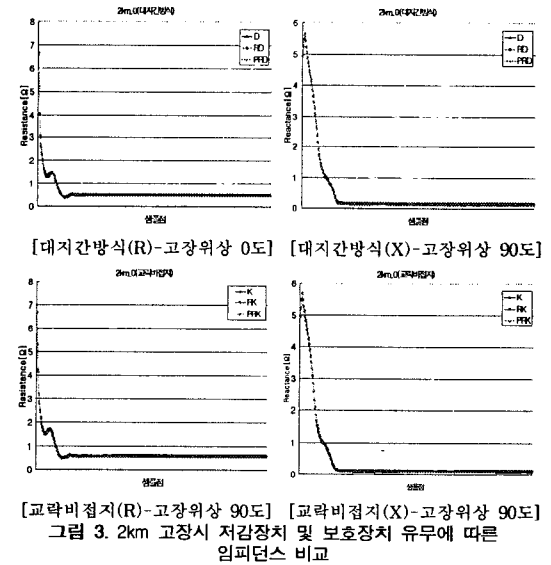


그림 3. 2km 고장시 저감장치 및 보호장치 유무에 따른 임피던스 비교

그림 3은 2km 고장시 저감장치 및 보호장치 유무에 따른 저항과 리액턴스를 비교한 그래프이다. 그림에서처럼 각 SVL 절선방식에서 고장위상에 관계없이 저감장치 및 보호장치에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다.

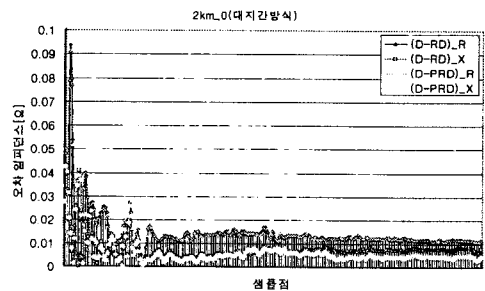


그림 4. 2km 고장시 오차 임피던스(대지간방식-0도)

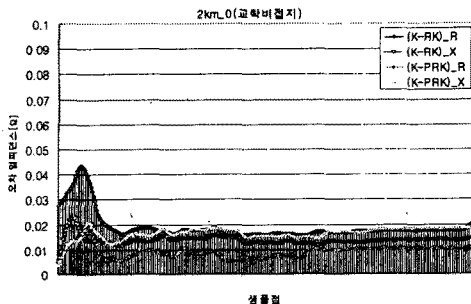


그림 5. 2km 고장시 오차 임피던스(교락비점지-0도)

그림 4와 그림 5에 나타난 오차 그래프에서도 알 수 있듯이 대지간 방식과 교락비점지 방식에서 계전기 동작 이후로부터 오차의 차이가 크게 나타나지 않음을 알 수 있으며 저감장치 및 보호장치 설치에 따른 오차의 크기도 저항은 0.021Ω, 리액턴스는 0.015Ω으로 크지 않았다.

4.2 저감장치 설치점에서의 고장

동일 계통에서 저감장치 설치점인 4km 지점에서 고장이 발생하였을 때 거리계전기 보는 선로 임피던스를 저감장치와 보호장치 설치 유무에 따라 비교하여 검토하였다.

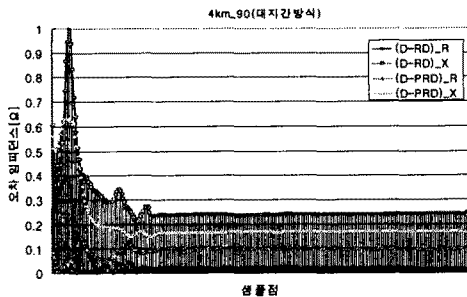


그림 6. 4km 고장시 오차 임피던스(대지간방식-90도)

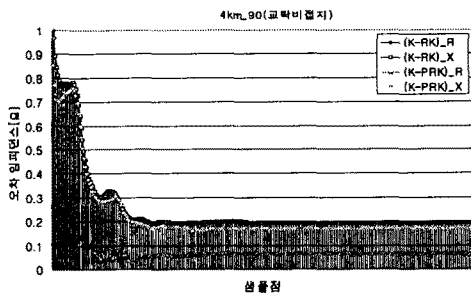


그림 7. 4km 고장시 오차 임피던스(교락비점지-90도)

그림 6과 그림 7은 저감장치 리액터 설치점인 4km 지점에서 고장이 발생하였을 때 저감장치 및 보호장치 설치 유무에 따른 오차 임피던스를 나타내었다. 그림에서처럼 최대오차를 기준으로 계전기 동작 이후에 SVL 결선방식에 따른 오차는 크지 않았으며, 고장위상 변화에 따른 차이도 크지 않았다. 그러나 저감장치 및 보호장치 설치에 따른 오차의 크기는 저항에 비해 리액턴스의 오차가 큰 값을 보였으며, 최대오차를 기준으로 저항은 0.086Ω, 리액턴스는 0.245Ω으로 저감장치 설치 이전인 2km과 비교하여 더욱 높은 값을 나타내었다.

4.3 저감장치 설치점 이후의 고장

본 절에서는 저감장치 설치점 이후의 지점인 5km 지점에서 고장이 발생하였을 때 거리계전기 보는 선로 임피던스를 저감장치와 보호장치 설치 유무에 따라 비교하여 검토하였다. 그림 8은 대지간 방식 0도 고장시 오차 그래프를 나타내었다. 그림에서처럼 오차 임피던스는 4km 고장과 비교해 큰 차이를 보이지 않았다.

표 2와 표 3에서는 각 고장발생 위치에 따라 저감장치 및 보호장치 설치 유무에 따른 오차 임피던스 총괄표를 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이, 저감장치 설치점 이전의 고장(2km)의 경우에는

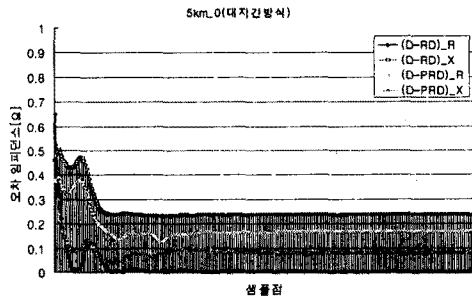


그림 8. 5km 고장시 오차 임피던스(대지간방식-0도)

표 2. 저감장치 및 보호장치 유무에 따른 임피던스(대지간방식)

고장위상 오차 임피던스	0도				90도				
	R[Ω]		X[Ω]		R[Ω]		X[Ω]		
고장 위치	SVL 결선	D-RD	D-PRD	D-RD	D-PRD	D-RD	D-PRD	D-RD	D-PRD
2km	대지간	0.012	0.012	0.007	0.004	0.008	0.009	0.01	0.006
4km	대지간	0.004	0.086	0.245	0.156	0.018	0.1	0.242	0.168
5km	대지간	0.002	0.085	0.238	0.165	0.001	0.072	0.232	0.16

표 3. 저감장치 및 보호장치 유무에 따른 임피던스(교락비점지)

고장위상 오차 임피던스	0도				90도				
	R[Ω]		X[Ω]		R[Ω]		X[Ω]		
고장 위치	SVL 결선	K-RK	K-PRK	K-RK	K-PRK	K-RK	K-PRK	K-RK	K-PRK
2km	교락비	0.017	0.011	0.014	0.018	0.021	0.012	0.015	0.016
4km	교락비	0.025	0.067	0.196	0.164	0.025	0.065	0.196	0.172
5km	교락비	0.016	0.06	0.195	0.163	0.016	0.064	0.193	0.16

오차가 발생이 적었으나, 저감장치 설치점(4km)과 이후(5km)의 지점에서 발생한 고장의 경우는 그에 비해 오차가 크게 나타나고 있다. 또한 저항에 비해 리액터에서 발생하는 오차가 크게 나타났다. 따라서 이와 관련된 연구가 지속적으로 이루어져야 될 것으로 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 시스순환전류 저감장치와 보호장치 유무에 따라 1선지락고장이 발생했을 때 거리계전기가 보는 임피던스의 변화를 분석하였다. 본 논문에서 분석한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 저감장치 설치 이전 지점에 고장이 발생하였을 경우, 저감장치 설치 유무에 따른 임피던스의 변화는 크지 않았다.
- 2) 저감장치 설치점과 이후 지점에서 발생한 고장의 경우 두 경우 간의 임피던스의 차이는 크지 않았으나, 이전 지점과 비교하면 리액턴스 성분의 오차가 크게 나타나고 있다.
- 3) 저감장치 설치점과 이후 지점에서 발생한 고장에서 저항에 비해 리액턴스 성분에서 발생하는 오차가 크게 나타났다.
- 4) 동일지점의 고장에서 고장위상, SVL 결선방식에 의한 차이는 크게 나타나지 않았다.
- 5) 발생된 리액터의 최대 리액터의 오차는 0.25Ω이하로 이는 거리계전기에 설정된 준을 가만하면 크지 않은 오차로 판단되나, 이에 대한 계속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] 정재균, 이종범, 장지원, 장태인 "지중송전계통에서 시스순환전류 해석 및 저감방안", 대한전기학회 논문지, Vol.50A, No.11, 2001
- [2] 장지원, 양해원 "지중송전계통에서 저감장치를 이용한 시스순환전류 저감방안에 관한 연구" 대한전기학회 논문지, Vol. 51A, No. 9, 2002
- [3] 장지원, 양해원 "해석 및 측정을 통한 시스순환전류 특성 및 상승 원인 검토" 대한전기학회 논문지, Vol.51A, No.10, 2002
- [4] 장지원, 정재균, 이종범, 이동일, 정길조, "과도상태에서의 시스순환전류 저감장치 보호방안에 관한 연구" 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2002. 11
- [5] 황재용, 이종범, "지중송전계통을 디지털 거리계전 알고리즘 개선" 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, No. 12, 2000
- [6] 정재균, 홍동석, 이종범, "웨이브렛 변환을 이용한 혼합송전계통에서의 디지털 거리계전 알고리즘에 관한 연구" 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2001. 11