

지중배전선로 비일괄공동접지기술 시행 효과에 대한 연구

이재봉\*, 전명수\*\*  
 한국전력공사 전력연구원\*, 일렉컨설팅\*\*

An effect of applying new separate commongrounding technology for Underground distribution line

LEE JAE-BONG\*, JEON MYUNG-SOO\*\*  
 Korean Electric Power Research Institute\*, Elec-Consulting\*\*

**Abstract** - 우리나라의 전력 계통은 대도시 중심부 등 사람의 왕래가 빈번한 곳이나 신도시 지역 등에 22.9kV-y 배전 방식으로 CNCV 지중 케이블로 전력을 공급하고 있으며, 선로 운영상 케이블의 동심중성선을 일정 구간마다 3선 일괄 공동 접지하는 다중 접지방식을 채택하고 있다.

이는 지락 사고시에는 동심 중성선의 대지 전위 상승을 일정 값 이하로 제한함과 동시에 보호계전기의 동작을 원활히 하기 위함이다. 그러나 지중 배전 선로에서 각 상(A,B,C상)의 부하가 불평형이 될 때는 물론 평형일 경우에도 동심 중성선에는 부하 전류에 비례하는 동심 중성선 순환 전류가 발생되고 있기 때문에 불필요한 손실 전력이 발생하며, 이러한 손실 전력으로 케이블의 내부 온도가 상승되어 케이블의 송전용량이 감소하게 된다.

따라서 2006년 7월12일~14일 대한전기학회 하계학술대회에 이에 대한 문제점과 대책으로 비일괄공동접지에 관한 연구를 발표 한 바 있으며, 본 연구는 일괄공동접지방식의 기능을 저해하지 않으면서 비일괄공동접지기술을 안전하게 시행하는 방법과 예상되는 문제점 및 시행효과 검증에 관한 연구이다.

1. 서 론

우리나라의 배전방식은 22.9kV-y 다중접지방식으로 변전소로부터 가공배전선로 또는 CNCV 케이블을 이용하여 지하에 매설된 배전 선로를 통하여 전력을 공급하며, 도시 외곽 또는 농어촌 지역의 경우 가공선 형태로, 대도시 중심부 등 사람의 왕래가 빈번한 곳이나 신도시 지역 등에서는 공급 신뢰도 및 도시 미관을 고려하여 지중으로 전력을 공급하고 있으며, 선로 운영상 배전 선로의 중성선을 일정 구간마다 일괄공동접지방식으로 하는 다중 접지방식을 채택하고 있다. 이러한 다중 접지방식은 동심 중성선을 대지에 직접 접지하기 때문에 지락 사고시 건전상의 전압 상승이 적어 전력 설비의 절연 및 지락 전류의 검출이 용이 하고 보호 계전기 등이 신속하게 동작하는 장점이 있는 반면 지락 고장시 고장전류가 크고 대지전위 상승 등의 단점도 있다.

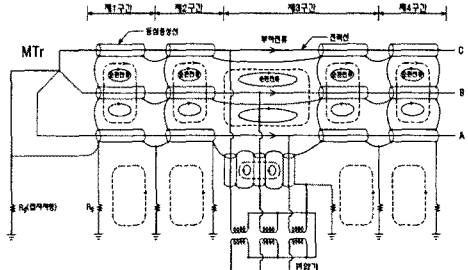
중성선의 전위가 상승되는 것을 방지 하고자 케이블 접속 구간마다 동심 중성선을 일괄 접지하는 방식으로 배전 계통을 운영 하고 있으며, 이는 고압과 저압을 공통으로 사용함에 따라 정상시에는 불평형 부하전류를, 지락 사고시에는 동심 중성선의 대지 전위 상승을 일정 값 이하로 제한하여 배전 계통을 안전하게 유지하기 위해서이다. 그러나 지중 배전 선로에서 각 상(A,B,C상)의 부하가 불평형이 될 때는 물론 평형일 경우에도 동심 중성선에는 부하 전류에 비례하는 동심 중성선 순환 전류가 발생 되고 있기 때문에 불필요한 손실전력이 발생하며, 이러한 손실전력으로 케이블의 내부 온도가 상승되어 케이블의 전류용량이 감소 한다.

따라서 이 같은 문제점과 대책에 대하여 2006년7월 대한전기학회 하계학술대회에 "22.9kV 배전계통 CNCV 케이블 동심중성선에 발생하는 순환전류 문제점 및 대책(비일괄공동접지기술)"이 발표 된 바 있으며, 본 연구에서는 일괄 공동접지 방식의 문제해결방안으로 제안된 비일괄공동접지 적용시 예상되는 중성선 개방 단단의 전위상승, 중성선 단선시 안전성 문제 여부, 접속재 절연 파괴시 차단기 동작여부, 접속재 양단의 전위차로 인한 접속재 열화 여부, 지락 고장시 계전기의 동작 여부 등에 대한 문제점과 비일괄공동접지 방식 적용시 효과에 관하여 현장 실험을 위주로 확인 검증을 하고, 또한 시공시 발생 가능한 문제들을 예측 해결 함으로써 안전하게 시행할 수 있는 방법에 관한 연구이다.

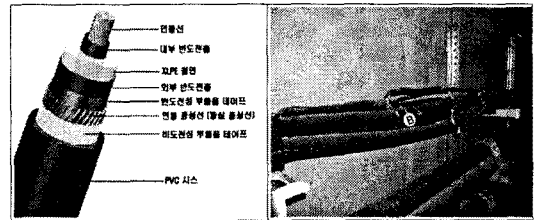
2. 본 론

2.1 동심중성선 순환전류 발생원인 및 문제점

22.9kV-y 다중 접지 계통에 사용하는 CNCV 케이블은 전력선 도체에 흐르는 부하전류에 의해 도체를 둘러싸고 있는 동심중성선에 전자유도에 의한 유기전압이 발생되고 A, B, C 상을 단락시킨 후 일괄 접지하므로 접지선에는 A, B, C 상의 합성 전류인 작은 전류가 접지선을 통하여 대지로 흐르게 되지만 3선을 단락시킨 중성선 상호간에는 유기전압을 단락시키는 순환전류가 흐르며, 그 값은 포설방법 및 도체 위치에 따라 도체전류의25%에서 55%에 이르며 그 순환회로는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 현재의 공급계통

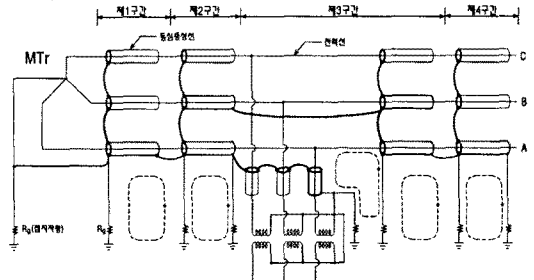


<그림 2> 전력구 CNCV 케이블 구조 및 포설

2.2 동심중성선 순환전류 제거 방안

2.2.1 기 설치된 시설

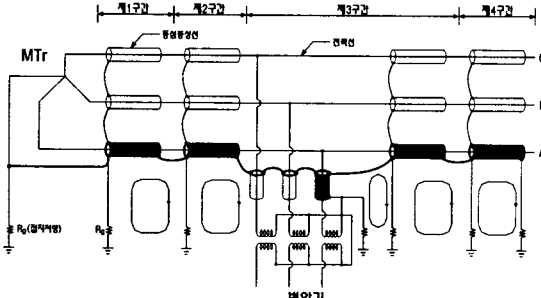
22.9kV-y 다중접지 계통의 CNCV 케이블 동심중성선을 시작점은 3선 일괄 접지하고 종단점 1상을 중성선으로 사용하면서 접지하고 2상은 개방 하여 비접지로 하여 순환 회로는 차단되나 다중 접지 계통에는 변화가 없다.



<그림 3> 기 설치된 시설

### 2.2.2 신설 선로에 대한 시설

임의 1선을 중심 중성선 전용 케이블로 사용하고 피복 색깔을 차별화(백색 등)하여 중성선으로 연속접지하고 나머지 2선의 시작점은 3선을 일괄접지하고 종단점을 개방하여 사용하므로 현장은운용상 혼선 없이 용이하게 시공할 수 있을 것이다.



<그림 4> 신중설 시설

### 2.3 중심중성선 순환전류 제거에 따른 효과

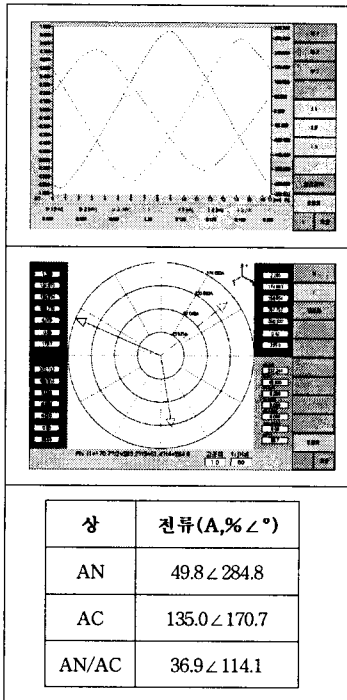
#### 2.3.1 허용전류 증가에 따른 이용률 증가

<표 1> 허용전류 및 이용률 비교표 [참고문헌[1]]

구 격		허용전류[A]		이용률 증가(%)	비 고
		현재	비일괄접지		
CNCV 325mm <sup>2</sup>	관로 (요람배열)	602	727	20.76	평균증가율 18%
	전력구 (3각배열)	622	726	16.72	

#### 2.3.2 순환전류 제거에 의한 손실전력 경감

현장 측정값과 학술적 근거에 의한 계산값을 비교하여 다양한 현장여건을 감안하여 사용가능한 수식을 도출하였다.



<그림 5> 측정시간 : 2008-07-09 15:59  
(측정회로 AC-BC-CC-AN)

<표 2> 현장측정 DATA

측정 장소	구 분	$I_A$	$I_B$	$I_C$	평균	비 고
경기형일회 신설S/S 소각DL	입괄접지	부하전류 [A] 140.6	143.3	140.6	141.5	2회신구간 (소각 DL, 특약 DL)
	순환전류	63.2	63.7	62.7	63.2	
	중성선 전류비율 %	45.0	44.5	44.6	44.7	
	중성선 전류[A]	-	-	-	-	
2008.04.10 11시54분~ 12시20분	입괄접지	부하전류 [A] 136.8	140.8	137.8	138.5	1회신구간
	순환전류	14.0	-	-	14	
	중성선 전류비율 %	-	-	-	10.1	
	중성선 전류[A]	-	-	-	-	
강서지점 신설S/S 신속DL	입괄접지	부하전류 [A] 61.3	48.9	68.9	56.4	1회신구간
	순환전류	25.3	21.2	26.0	24.8	
	중성선 전류비율 %	41.3	43.3	47.5	44	
	중성선 전류[A]	-	-	-	-	
2008.04.17 15시09분~ 15시43분	입괄접지	부하전류 [A] 62.1	48.4	68.9	56.8	3개회선 평행구간
	순환전류	-	-	11.28	11.28	
	중성선 전류비율 %	-	-	-	19.8	
	중성선 전류[A]	-	-	-	-	
부천시지점 역곡S/S 속내DL	입괄접지	부하전류 [A] 135	176.7	155.4	155.7	3개회선 평행구간
	순환전류	49.8	68.4	72.5	63.6	
	중성선 전류비율 %	36.9	38.7	46.6	40.7	
	중성선 전류[A]	139.9	187.9	161.1	183	
2008.7.9 15시08분~ 16시01분	비일괄 공통접지	부하전류 [A] 165	-	-	165	3연모두 평균 43.1% 2회 0% 1회 13.3%
	순환전류	-	-	-	10.1	
중성선전류 전계형전계	입괄접지	3선	-	-	43.1	3연모두 평균 43.1% 2회 0% 1회 13.3%
	비일괄공통 접지	2선 1선	-	-	13.3	

#### 2.3.3 중성선 순환전류 계산결과

대지의 지하 평균 온도 20℃ 및 실제의 평균 부하전류 150~200[A] 에서 현장 실측값 등을 비교 검토하여 케이블 중성선 평균사용 온도를 25℃로 가정할 경우 그 비율은 아래와 같다.  
순환전류 계산은 일본 전기기술규정 배전편을 참조하여 계산하였다. 상세 계산과정은 2.4절에 나타내었다.

<표 3> 순환전류 및 손실비율(25℃ 사용할 경우)

구 분	평균부하전류	평균중성선 순환전류 $I_n$	평균중성선손실 $P_L = w/kw/Line$	평균사용온도
전력구 (정3각배열)	$I_L$	0.34284 $I_L$ (34.284%)	0.02042 $I_L^2$	25℃
관로 (수평배열)	$I_L$	0.41536 $I_L$ (41.536%)	0.02997 $I_L^2$	

### 2.4 중성선 순환전류계산

#### 2.4.1 계산규격

- ☐ 차폐층 순환전류계산
  - 일본 전기 기술 규정 배전편 1999. JEC 7001
- ☐ 차폐층 저항계산
  - 한국전력공사 배전설계(지중)기준 부록 1
- ☐ 케이블 규격
  - 한국전력공사 잠정구매시방서

#### 2.4.2 적용 케이블 및 계산자료

- ☐ 규격 : CNCV 325mm<sup>2</sup>
- ☐ 중성선 : 2.3×26
- ☐ S: 케이블 중심간 거리[m] : 0.051 (한전구매규격)
- ☐  $r_m$  : 차폐층 평균 반경 [m] :  $0.044 \times \frac{1}{2} = 0.022$  (한전구매규격)
- ☐ 계산상수 (일본전기기술 규정)

$$x_m = 2\omega \log_e \frac{S}{r_m} \times 10^{-4} [\Omega/km]$$

$$= 2 \times 2\pi \times 60 \times \log_e \left( \frac{0.051}{0.022} \right) \times 10^{-4}$$

$$=0.06339[\Omega/\text{km}]$$

$$a=2\pi \log e^2 \times 10^{-4}=0.05226[\Omega/\text{km}]$$

▣ 중성선 저항  $R_S$ (한전설계기준 배전(지중) 부록 1)

$$R_S = \frac{40 \times \rho_s \times [1 + a(T_3 - 20)]}{\pi \times d^2 \times n} \times \sqrt{1 + (\pi ds/LS)^2} \times 10^{-5} [\Omega/\text{cm}]$$

$\rho_s$ : 중성선 열저항(1.724)

$a$ : 중성선 저항온도계수(0.00393)

$T_3$ : 중성선 최대사용온도[°C]

$d$ : 중성선 소선경 mm (2.3)

$n$ : 중성선 소선수(26)

$d_s$ : 중성선 중심경(43.7)

$L_s$ : 중성선 피치(368)

### 2.4.3 중성선 순환전류 계산서

< 중성선 온도 25°C >

● 중성선 저항 (한전설계기준 배전(지중) 부록 1)

$$R_S = \frac{40 \times \rho_s \times [1 + a(T_3 - 20)]}{\pi \times d^2 \times n} \times \sqrt{1 + (\pi ds/LS)^2} \times 10^{-5} [\Omega/\text{cm}]$$

$$= \frac{40 \times 1.724 \times [1 + 0.00393(25 - 20)] \times \sqrt{1 + (\pi \times 43.7/368)^2} \times 10^{-5}}{\pi \times 2.3^2 \times 26}$$

$$= 0.17369 \times 10^{-5} [\Omega/\text{cm}]$$

$$= 0.17369 [\Omega/\text{km}]$$

1) 3각 배열

$$I_{AN} = \frac{-jX_m}{R_s + jX_m} \left( \frac{-1 + j\sqrt{3}}{2} \right) I_B$$

$$= \frac{-j0.06339}{0.17369 + j0.06339} I_B$$

$$= 0.34284 I_B$$

$$|I_{AN}| = |I_{BN}| = |I_{CN}|$$

2) 수평 배열

가) 관련 상수

$$M = \frac{R_s}{X_m + a}$$

$$= \frac{0.17369}{0.06339 + 0.05226}$$

$$= 1.50186$$

$$N = \frac{R_s}{X_m - a/3}$$

$$= \frac{0.17369}{0.06339 - 0.05226/3}$$

$$= 3.77834$$

나) 중성선 전류

$$I_{AN} = \frac{-(1 - \sqrt{3}N) + j(M + \sqrt{3})}{2(M + j)(N + j)} I_B$$

$$= \frac{-(1 - \sqrt{3} \times 3.77834) + j(1.50186 + \sqrt{3})}{2(1.50186 + j)(3.77834 + j)} I_B$$

$$= 0.45508 I_B$$

$$I_{BN} = \frac{-j}{N + j} I_B$$

$$= \frac{-j}{3.77834 + j} I_B$$

$$= 0.25886 I_B$$

$$I_{CN} = \frac{-1(1 + \sqrt{3}N) + j(M - \sqrt{3})}{2(M + j)(N + j)} I_B$$

$$= \frac{-1(1 + \sqrt{3} \times 3.77834) + j(1.50186 - \sqrt{3})}{2(1.50186 + j)(3.77834 + j)} I_B$$

$$= 0.53515 I_B$$

<표 4> 현장측정 DATA와 계산값의 비교 분석

항목	구분	A상	B상	C상	평균	비고
		측정값 관로 %	41.1	42.2	46.5	43.1
중성선전류/부하전류	계산값 % 수평배열	34.28	34.28	34.28	34.28	25°C 기준
		45.51	25.59	53.51	41.54	
현장 측정값-수평배열계산		-	-	-	1.56	분포시공은 수평배열여 가차운 것으로 추정함

### 2.4.4 중성선 전력손실 계산

비일괄공동집지로 개선시 편단집지 되는 2선은 100% 순환전류가 개선되나 중성선으로 사용되는 어느 1선은 다중집지되므로 약 10% 정도의 순환전류가 잔존하게 된다. 따라서 본 논문에서 는 3선중 2선의 전력손실 경감효과만 계산하기로 한다.

325[mm] CNCV Cable 1회선의 손실 전력 경감량 계산은 다음과 같다.

“예”

계산조건 : 25°C 기준

CNCV Cable 규격 : 325[mm]

길이 : 1.5[km]

부하전류: 연간최대부하 7.139[kW] (200[A])

역률 : 0.9

전용구간 : 0.5 [km]

분산부하구간 1[km] (분산부하 : 분산계수  $\frac{1}{3}$ )

년평균부하율 : 70%

공급일수 : 365일

배열방법 : 수평배열

$$\text{동심중성선손실} = [\text{동심중성선저항} \{ (\text{평균부하전류} \times \text{순환전류비율})^2 \times (\text{전용구간거리} + \text{부하구간} \times \text{분산계수}) \} \times 2 \text{선} \times \text{공급시간}]$$

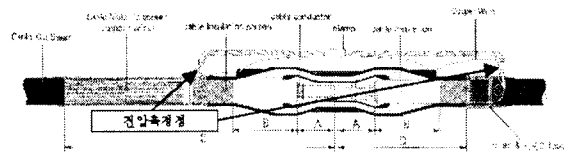
$$P_w = [0.17369[\Omega/\text{km}] \times \{ (200[\text{A}] \times 0.7 \times 0.4154)^2 \times (0.5 + 1 \times \frac{1}{3}) \} \times 2 \times 24 \times 365] \times 10^{-3}$$

$$= 8.576[\text{kWh}/\text{년}]$$

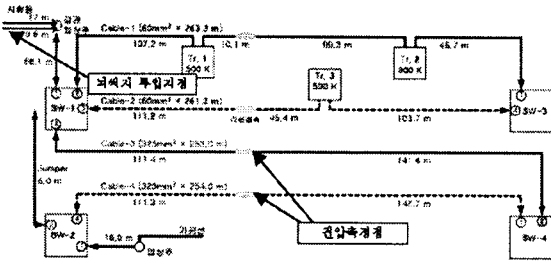
## 2.5 비일괄공동집지로 개선할 경우 예상 가능한 문제점들의 현장실증실험

### 2.5.1 안정성 관련 실험

○ 시험 준비사항



<그림 6> 직선접속재 표준 시공도면(325SQ용)



<그림 7> 지중배전계통 모의시험선로(고형)

### 2.5.2 시험 및 분석결과

#### 1. 뇌서지 침입시 중성선 개방단 전위상승으로 인한 접속 감소 손상 여부

- A상 케이블의 중성선 분리부분에서 뇌서지에 의한 전압상승은 최대치 400V가 나타났으며, 맨홀 내부에서 방전음이 들렸으나 캠코더에 의한 촬영에도 불구하고 발생 위치는 관찰하지 못함.

#### 2. 중성선 단선사고시 고장전류 귀로 확보 불가로 인한 안전상 위험요인

- 가공선로에 비하여 지중선로는 외부환경에 노출되지 않고 지중에 놓여 있으며 중성선이 케이블의 외피 내부에 존재함으로써 중성선의 단선사고가 발생할 확률이 거의 희박하므로 중성선 단선사고에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단됨.

그럼에도 불구하고 접속지점에서 중성선이 단선된 상태에서 케이블 절연고장이 발생할 경우에도 고장전류가 대지를 통하여 귀환되어 차단기 동작이 적절하게 이루어질 것으로 판단되며, 접지점 부근의 대지전위 상승은 1.5m 거리에서 438V로 제한될 것으로 추정됨.

#### 3. 접속재 절연파괴시 고장전류의 통전지연에 의한 차단기 동작 여부

- 기존 접지방식에서는 직선접속재 고장시 고장전류가 인접한 중성선으로 방전되어 흐르게 되나 비일괄 공동접지방식에서 중성선 개방단을 접속재에서 멀리 제거 놓거나 일부를 제거하는 경우, 중성선으로 방전하지 않고 접속재 표면을 통하여 중성선으로 전류가 흐르게 되어 표면이 과열될 수 있으므로 절단된 부분을 전기적으로만 절연되고 현 상태의 형상을 유지하게 하면(접속재의 표면을 통하여 중성선으로 전류가 흐르게 됨 방지) 이러한 영향을 방지할 수 있을 것으로 판단됨.

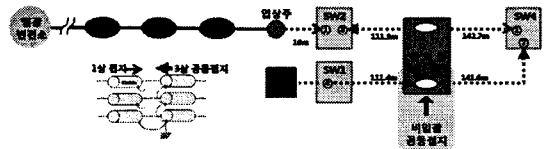
#### 4. 외피 반도전층 동심중성선 양단 전위차로 미세전류에 의한 접속재 열화 가능성

- 접속재 3개 중 2개는 중성선이 절단되어 개방단 전위차에 의한 미세 전류가 접속재로 흐르게 되어 접속재의 온도 상승요인은 되지만, 중성선 순환전류 제거에 의한 케이블 전체 온도 감소와 케이블에 의한 방열작용으로 인하여 접속재의 전체적인 온도 상승은 발생하지 않을 것임.

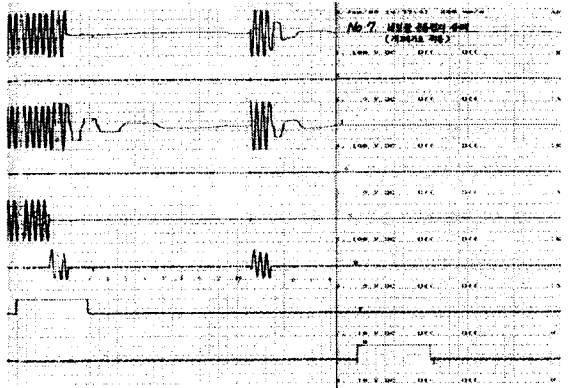
### 2.5.3 보호계전기 동작시험

비일괄공동접지 상태에서 1선지락 발생시 리클로저의 동작이 일괄공동접지방식인 기존의 계통과 동일하게 동작 하였고, 중성선이 단선된 경우에도 거의 동일하게 보호 차단되었으며 중성선이 floating된 부분에서는 방전음이 발생함

### □ 비일괄 공동접지 방식에서 케이블 지락고장 모의시험



<그림 8> 시험회로



<그림 9> 시험결과 파형

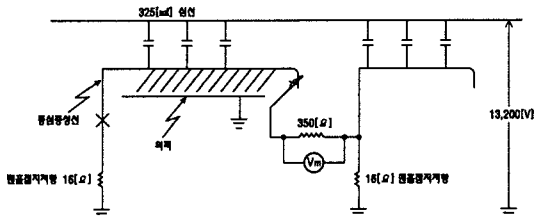
※ AFG에서 각상의 전압 및 전류를 측정하여 기록계에서 출력

다. 리클로저 동작시간 및 고장전류

- 17:07:22 복선 35 C상 1343 [A], N상 1342 [A]
- 17:07:25 남선 14C상 1155 [A], N상 1156 [A]
- 17:07:23 연구간 248A상 1299 [A], N상 1286 [A]

### 2.5.4 중성선 Floating 현상과 확인방법

비일괄공동접지는 어떤 경우에도 중성선의 1단이 접지되어야 하나 양단 모두 개방되어 Floating 될 경우에는 중성선에 높은 정전유도 전압이 유지되어 인축감전 내지 접속재 표면으로의 누설전류에 의한 열화 또는 서지 침입시 방전 등의 위험이 있으므로 중성선 Floating 상태를 간편하게 확인토록 할 필요가 있으며, 그 일환으로 기존 일괄접지를 비일괄접지로 시공(동심중성선 3선중 2선 개방)시 필요한 케이블 접지상태 확인장치(CESM)에 안전시공 역할 및 동심중성선 부동상태를 확인할 수 있는 이상 전압과 환선음을 발하는 검진기능을 보유하여 Floating 시공되는 일이 없도록 하여야 하며, 그 검출 원리는 다음과 같다.



<그림 10> 동심중성선 Floating 상태 확인 개념도

1. CNCV 325[mm] 정전용량 C=0.33 [ $\mu\text{F}/\text{km}$ ]  
(일진전기 카탈로그 적용)

가. 300[m]의 충전용량

$$P = WCV^2 = 0.33 \times 10^{-6} \times 0.3 \times 13,200^2 \times 3.14 \times 60 \\ = 6,499.7[\text{VA}] \approx 6,500[\text{VA}]$$

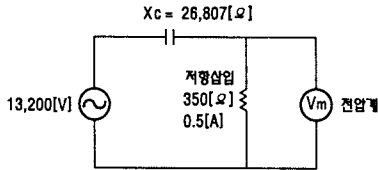
나. 충전전류  $I_c$

$$I_c = \frac{6,500}{13,200} = 0.4924[\text{A}]$$

$$X_c = \frac{V}{I_c} = \frac{13,200}{0.4924} = 26,807[\Omega]$$

다. 150[V] 전압계 내부저항 : 120,000[ $\Omega$ ]

2. 상대단에 중성선 접지 개방될 경우



<그림 11> 등가회로

가. 전압계에 나타나는 전압

$$V_m = 13,200 \times \frac{350}{\sqrt{26,807^2 + 350^2}} = 172[\text{V}]$$

3. 상대단에 중성선 접지가 개방(Floating)되지 않을 경우

가. 부하전류 595[A]일 경우  $V_m=17[\text{V}]$  정도

나. 즉 최대 부하시에도 20[V]미만이 되며,  
개방되면 172[V]/300[m]가 된다.

### 3. 결 론

에너지의 90% 이상을 수입하여 사용하고 있는 우리나라로서는 자원과 에너지의 절약이 절실한 현실에서 이미 CNCV 케이블의 3상 일괄접지에 의한 순환전류로 인한 문제점을 제기한 논문이 수편 있으며, CNCV 케이블 전력손실을 50% 정도 감소시키고 케이블 이용율을 20%정도 증가 시킬 수 있는 본 연구는 기존의 중성선 공동접지방식과 편단접지 방식을 혼합 사용하는 기술로서 우리나라 전력계통 특성상 문제는 없는지 현장 실증시험을 통하여 검토 분석결과 기존에 제시되었던 학술적 논리와 실험결과가 순환전류 제거에 의한 효과를 검증하였다.

비밀팔공동접지 시공에 따른 안전성과 공급신뢰도에 대하여 계속 검토하고 있으며, 충분한 검토가 완료된 후 확대 보급되어 에너지 손실 및 자원절약에 이바지 할 수 있기를 기대한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 22.9kV 배전계통 CNCV 케이블 동심중성선에 발생하는 순환 전류 문제점 및 대책(대한전기학회학술대회 2006.7.12)
- [2] 차폐층의허용전압 (한국전력공사 설계기준 1650 )
- [3] 배전규정 일본전기기술규격위원회 (JESC E0004-1999)
- [4] 한국전력공사배전 지중설계기준 5900부록1.
- [5] 일진전기 케이블 카다록
- [6] 회로 이론,이준웅 저 동일출판사 (1996.1.20)
- [7] 보호계전기실무 , 한국전력공사 신기술사 출판(1997)
- [8] 지중전력케이블 제2권, 한국전력공사 송변전처(1995. 6)
- [9] 지중송전케이블시스템, 한국전력공사 송변전건설처(2002. 12)