

22.9kV 배전계통 CNCV 케이블 동심중성선에 발생하는 순환전류 문제점 및 대책

전 명 수, 송 중 호, 구 성 완
 서울산업대학교, 서울산업대학교, 대한전기학회

Problems and solution for the circulation current at the neutral line in the 22.9kV CNCV cable distribution system.

JEON MYUNG-SOO, SONG JOONG-HO, GU SUNG-WAN

Seoul National University of Technology, Seoul National University of Technology, The Korean Institute of Electrical Engineers

Abstract - 우리나라의 전력 계통에 있어, 22.9kV-y 배전 방식은 변전소로부터 배전 선로를 통해, 대도시 중심부 등 사람의 왕래가 빈번한 곳이나 신도시 지역 등에 지중 케이블로 전력을 공급하고 있으며 선로 운영상 배전 선로의 중성선을 일정 구간마다 3선 일괄 접지하는 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 용이하고 보호 계전기 등이 신속하게 동작한다. 계통 사고 등으로 인하여 동심 중성선의 전위가 상승되는 것을 방지하고자 케이블 접속 구간마다 동심 중성선을 일괄 접지하는 방식으로 배전 계통을 운영하고 있다. 이는 지락 사고시에는 동심 중성선의 대지 전위 상승을 일정값 이하로 제한하여 안전하게 유지하기 위해서이다. 그러나 지중 배전 선로에서 각 상(A,B,C상)의 부하가 불평형이 되는 것은 물론 평형일 경우에도 동심 중성선에는 부하 전류에 41.5%(전력구)-51.6%(관로)의 동심 중성선 순환 전류가 발생되고 있기 때문에 순환전류로 인한 손실이 도체 손실의 76%에 달하며, 이러한 손실 전력으로 케이블의 내부 온도가 상승되어 케이블의 전류 용량이 관로의 경우 20% 정도 감소하게 된다. 본 연구는 이러한 문제점을 해결하는데 목적이 있다.

1. 서 론

최근에는 전 세계적으로 심각한 에너지 위기에 직면하고 있으며 특히 우리나라는 에너지 자원의 95%이상을 외국에 의존하고 있는 것이 현실이며, 22.9kV-y 배전 방식은 변전소로부터 지상 및 지하에 매설된 배전 선로를 통해 공장, 빌딩 등 비교적 규모가 큰 수용가에게 직접 전력을 공급하거나 2차 변압기를 통해 소규모 공장 내지 일반 가정에 전력을 공급하는 주요 간선으로서, 도시 외곽 또는 농어촌 지역의 경우 가공선 형태로, 대도시 중심부 등 사람의 왕래가 빈번한 곳이나 신도시 지역 등에서는 도시 미관을 고려하여 지중으로 전력을 공급하고 있으며, 선로 운영상 배전 선로의 중성선을 일정 구간마다 접지하는 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 용이하고 보호 계전기 등이 신속하게 동작한다. 그러나 계통 사고 등으로 인하여 동심 중성선의 전위가 상승되는 것을 방지하고자 케이블 접속 구간마다 동심 중성선을 일괄 접지하는 방식으로 배전 계통을 운영하고 있다. 이는 고압과 저압을 공통으로 사용함에 따라 평상시에는 불평형 부하전류를, 지락 사고시에는 동심 중성선의 대지 전위 상승을 일정값 이하로 제한하여 배전 계통을 안전하게 유지하기 위해서이다. 그러나 지중 배전 선로에서 각상(A,B,C상)의 부하가 불평형이 되는 것은 물론 평형일 경우에도 동심 중성선에는 부하 전류에 비례하는 동심 중성선 순환 전류가 발생되고 있기 때문에 불필요한 손실전력이 발생하며 이러한 손실전력으로 케이블의 내부 온도가 상승되어 케이블의 전류용량이 감소한다. 또한 케이블 혹은 메타로 전류 측정시에는 배전선의 실제 부하전류와 동심 중성선의 순환전류가 벡터합성값으로 나타나기 때문에, 실제 전류값보다 적게 나타나므로 부하관리에도 어려움이 많이 발생된다.

2. 본 론

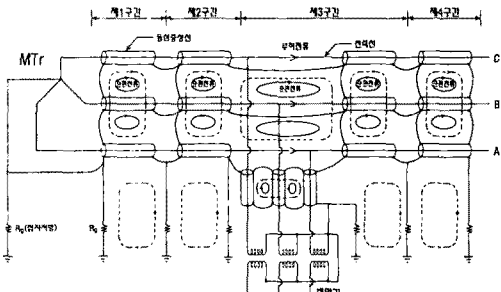
2.1 동심중성선 순환전류 발생원인 및 현장 측정값

현재 사용중인 22.9kV-y 다중접지계통에 사용하는 CNCV 케이블은 전력선 도체에 흐르는 부하전류에 의해 도체를 둘러싸고 있는 동심 중성선에 전자유도에 의한 유기전압이 발생되고 A,B,C 3상을 단락시킨 후 일괄 접지하므로 접지선에는 A, B, C상의 합성 전류가 접지선을 통하여 흐르게 되지만 3선을 단락시킨 중성선 상호간에는 유기전압을 단락시키는 순환전류가 흐르며, 그 값은 아래와 같다.

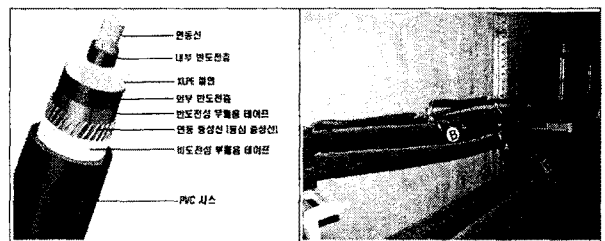
〈표 1〉 김복현 논문 DATA (1978.6)

표 1-1-2 異種電線 配線の 中性線 損失率
 Table N-1-2 Compare the results of the field tests to the Calculated neutral loss.

電線구경	配線方式	異種電線	中性線電流	損失率
200 mm ²	방선식	102	39	0.42
		121	45	0.41
		108	36	0.38
		210	72	0.35
	방관식	117	59	0.73
		140	72	0.77
		175	88	0.73
		204	104	0.76
325 mm ²	방선식	222	123	0.56
		238	119	0.74
		135	61	0.58
		149	68	0.59
	방관식	156	72	0.52
		175	81	0.52
		197	92	0.67
		240	115	0.66
241	110	0.60		

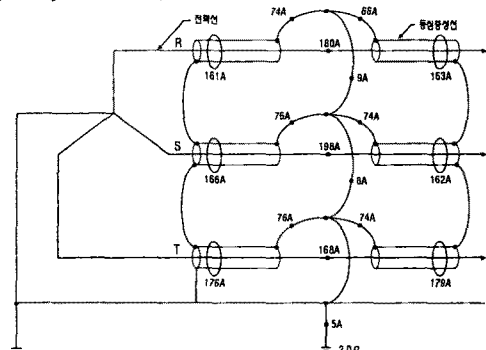


〈그림 1〉 현재의 공급계통



〈그림 2〉 전력구 CNCV 케이블 구조 및 포설

가. 측정장소: 154kV 원남 S/S 서울대 #2 D/L (22.9kV-Y)
 나. 측정개소: 원남 S/S 인출 전력구 (케이블 접속점 온도 32~34℃)
 다. 선 종: CNCV 325mm²

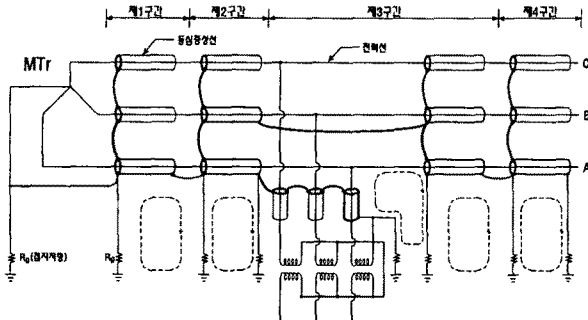


〈그림 3〉 실제 측정 도면 및 측정값

2.2 해결방안

2.2.1 기설치된 시설

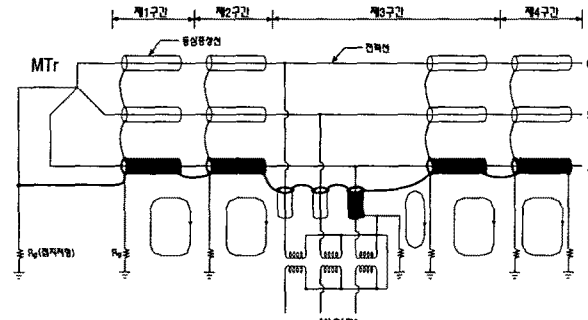
22.9kV-y 다중접지 계통의 CNCV 케이블 동심중성선을 시작점은 3선 일괄 접지하고 종단점 1상을 중성선으로 사용하면서 접지하고 2상은 개방 하여 비접지로 하여 순환 회로는 차단되나 다중 접지 계통에는 변화가 없다.



〈그림 4〉 기설치된 시설

2.2.2 신중설 시설

임의 1선을 동심 중성선 전용 케이블로 사용하고 피복 색깔을 차별화 (백색 등)하여 중성선으로 연속접지하고 나머지 2선의 시작점은 3선을 일괄 접지하고 종단점을 개방하여 사용하므로 현장운용상 혼선 없이 용이하게 시공할 수 있다.



〈그림 5〉 신중설 시설

2.3 동심중성선 순환전류 제거에 따른 효과

2.3.1 허용전류 증가에 따른 이용률 증가

〈표 2〉 허용전류 및 이용률 비교표

구 격		허용전류		이용률 증가(%)	비 고
		현재	비일괄접지		
CNCV 325 π	관로 (요람배열)	602	727	20.76	평균증가율 18%
	전력구 (3각배열)	622	726	16.72	

☐ 상시허용전류 I_p (배전 지중 설계기준 5900 부록)
정상상태에서 도체 온도가 최고 허용온도로 유지하도록 허용하는 100% 부하율의 연속 허용 전류를 말한다.

$$I_p = \left[\frac{\Delta Q_p - w_d(T_1/2 + T_2 + T_3 + T_4)}{rT_1 + nr(1 + \lambda_1)T_2 + nr(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{1/2} \dots \text{①식}$$

ΔQ_p = 도체온도 상승분

w_d = 유전체손실[w/m]

r = 교류도체실효저항[Ω /m]

λ_1 = 도체손실과 시스손실비[ws/wc]

λ_2 = 도체손실과 아모아손실비[wa/wc]

w_s = 시스손실[w/m]

w_c = 도체손실[w/m]

w_a = 아모아손실[w/m]

T_1 = 도체와 시스간의 열저항[$^{\circ}\text{C-m/w}$]

T_2 = 시스와 아모아간의 열저항[$^{\circ}\text{C-m/w}$]

T_3 = 케이블 외피의 열저항[$^{\circ}\text{C-m/w}$]

T_4' = 케이블 표면에서 관로내부까지의 열저항[$^{\circ}\text{C-m/w}$]

T_4'' = 관로자체의 열저항[$^{\circ}\text{C-m/w}$]

T_4''' = 관로의 외부 열저항[$^{\circ}\text{C-m/w}$]

$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''$

w_k = 타 케이블에서 발생한 총손실

$k = 1 \dots \text{NC} (K \neq P)$

NC = 케이블 회선수 혹은 관로수

n = 심선수

22kV CNCV 케이블의 경우 λ_2 와 T_2 는 고려하지 않으며, 심선수 n 은 1이다.

[계산조건]

- 도체의 온도상승 $\Delta Q_p = 50 (90-40)$ 로 보고 계산한다.

- λ_2 와 T_2 는 고려하지 않는다.

- n 은 1로 한다.

위의 조건을 고려하여 ①식을 간략화하면

$$I_p = \sqrt{\frac{50 - w_d(T_1/2 + T_3 + T_4)}{r[T_1 + (1 + \lambda_1)(T_3 + T_4)]}} \dots \text{②식}$$

- CNCV 케이블 325 π

동심중성선 108 π

☐ 동심 중성선에 45%의 순환전류 흐를때 식 ②에서 케이블 외부조건을 동일 조건이므로 고려하지 않을 경우 허용전류 I_p

$$I_p = \sqrt{\frac{50 - w_d \left(\frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right)}{r \left\{ T_1 + (1 + \lambda_1)(T_3 + T_4) \right\}}}$$

$$T_1 = \frac{\ell_1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} = 42.2$$

$$T_3 = \frac{30 \times \ell_3}{\pi d_5 \times 2.16} = 76.5$$

$$T_4 = \frac{8 \times \eta_3}{2\pi} \times \ln \left\{ \frac{2x_L}{D} + \sqrt{\left(\frac{2x_L}{d} \right)^2 - 1} \right\}$$

η = 지하수 기하에 따른 열저항 감소율(0.35)

L = 전력구 중심까지의 매설깊이[m] $(120+H) \cdot 225$

D = 전력구 등가직경[m] $\sqrt{\text{높이} \times \text{직경}}$ (214)

g = 도양의 고유열저항 [$^{\circ}\text{C-m/w}$] (100)

ℓ_1 = 절연체의 고유열저항 (450)

d_2 = 절연체 외경(반도전층 포함 39.1)

d_1 = 도체외경 (21.7)

ℓ_3 = 표면방산 고유저항 (900)

d_5 = 케이블 외경 (52.0)

$$\begin{aligned} \sigma \quad I_p &= \sqrt{\frac{50 - 2.144 \times 10^{-4} (42.2/2 + 76.5 + 7.656)}{7.4839 \times 10^{-7} \{42.2 + (1 + 0.545)(76.5 + 7.656)\}}} \\ &= \sqrt{\frac{49.977 \times 10^7}{1288.88}} \\ &= 622[\text{A}] \end{aligned}$$

☐ 도체 손실과 동심중성선 손실비 λ_1 은

$$\sigma \quad \lambda_1 = \frac{I_s^2 r_s}{I^2 r} = \frac{(0.451)^2 \times 2.0176 \times 10^{-6}}{I^2 \times 7.4839 \times 10^{-7}} = 0.545$$

☐ 동심중성선에 전류가 흐르지 않을 경우 허용전류

$$\begin{aligned} \sigma \quad I_p' &= \sqrt{\frac{49.977 \times 10^7}{7.4839 \times (42.2 + 76.5 + 7.656)}} \\ &= \sqrt{\frac{49.977 \times 10^7}{888.339}} \\ &= 726[\text{A}] \end{aligned}$$

☐ 정3각형 배열의 경우

동심중성선 전류를 제거하는 본 기술적용의 경우 케이블의 전류 용량 증가율

$$\text{증가율} = \frac{726 - 622}{622} \times 100 = 16.72\%$$

▣ 관로공사의 경우

동심중성선 전류 현황(김복현 논문 참조)

〈표 3〉 현장실험 Data

도체 굵기 325㎟		
부하전류[A]	중성선 전류[A]	중성선전류비율
117	59	0.504
140	73	0.521
175	88	0.503
204	104	0.510
222	122	0.549
235	119	0.506
평균		0.516

동심중성선에 51.6%의 순환전류가 흐르고 이때 325㎟의 허용전류 I_p 는 도체 손실과 동심중성선 손실비 λ_1 은

$$\lambda_1 = \frac{I_s^2 r_s}{I^2 r} = \frac{(0.516)^2 \times 2.0176 \times 10^{-6}}{1^2 \times 7.4839 \times 10^{-7}} = 0.717$$

케이블 표면에서 관로 내부 열저항 관로 자체 열저항, 관로 외부열저항은 전력구의 합성값 $T_4 = 7.656 [t-c/w]$ 와 같은 것으로 계산함

$$I_p = \sqrt{\frac{50 - w_d \left(\frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right)}{r \{ T_1 + (1 + \lambda_1)(T_3 + T_4) \}}}$$

$$\sigma I_p = \sqrt{\frac{50 - 2.144 \times 10^{-4} (42.2/2 + 76.5 + 7.656)}{7.4839 \times 10^{-7} \{ 42.2 + (1 + 0.717)(76.5 + 7.656) \}}} = \sqrt{\frac{49.977 \times 10^7}{1379.21}} = 602 [A]$$

동심중성선에 전류가 흐르지 않을 경우 허용전류

$$\sigma I_p' = \sqrt{\frac{49.977 \times 10^7}{7.4839 \times (42.2 + 76.5 + 7.656)}} = \sqrt{\frac{49.977 \times 10^7}{945.64}} = 727 [A]$$

● 관로공사의 경우

동심중성선 전류를 제거하는 본 기술적용의 경우 케이블의 전류용량 증가율

$$\text{증가율} = \frac{727 - 602}{602} \times 100 = 20.76\%$$

2.4 본기술적용시 예상문제점 검토요약

2.4.1 검토조건

평상시 상시 부하전류와 단락, 지락 고장시 고장 전류에 의한 유도장에 동심 중성선 전위 상승 보호계전기 동작상태 고장전류에 의한 동심중성선 전류 용량 등을 검토하였으나 다중 접지 계통의 조건에 변화가 없고 A,B,C 선중 1선의 동심 중성선(325㎟)의 경우 108㎟로 충분하며, 가공배전선로의 경우 중성선은 ACSR 95㎟로 사용하고 있음. 그 검토 결과를 종합하면 아래와 같다.

〈표 4〉 종합 검토 요약서

구 분	기 준 참 고 값	검 토 내 용	결 과	
안전 측면 (동심 중성선 전위 상승)	상시최대유기전압 100[V] (한전설계기준1650)	공장 300[m] 최대부하 595[A] (325㎟ 정격전류)에서 정3각배열: 10.80V/300m 요람배열: 17.52V/300m	문제 없음	
지락 사고	진전상의 전위상승	주변압기 중성점 접지 저항 값의 변화가 없으므로 비일괄 접지 방식에도 변화 없음.	현재와 동일	
	보호계전기 동작	OCGR 동작시간	현재와 동일	
	지락전류 검출	154/22.9kV, 45/60 MVA 사용기준	최대지락전류 770[kA]	현재와 동일
차폐 측면	정 전 유 도	각상의 불평형 전압값에 좌우됨	비일괄접지방식과 각상 전압의 크기 변화와는 무관함	현재와 동일
		상 시 전 자 유 도	기유전류 $3I_0$	3상 전력선 전류 + 동심중성선 전류의 합성전류 ($3I_0$)는 비일괄접지에서도 0(Zero)이 됨.
개폐 서지 및 뇌서지	1선 지락	기유전류 $3I_0$	동심중성선 1단 개방된 선에 지락시 유도 없음. 동심 중성선으로 사용하는 선고장시 다소 높을 수 있으나 0.5sec 이내 차단됨.	문제 없음
		개폐 서지 및 뇌서지	시스 중격 내전압 40[kV] 피뢰기정격전압 18[kV] (ES 126-650-664)	전력선에 서지 침입시 15~25%가 동심 중성선에 침입(4.5[kV])

3. 결 론

에너지의 90% 이상을 수입하여 사용하고 자원이 부족한 우리나라에서는 자원과 에너지의 절약이 절실한 현실에서 이미 CNCV 케이블의 3상 일괄 접지에 의한 순환전류로 인한 문제점을 제기한 논문이 수편있으며, CNCV 케이블 전력손실을 76% 정도 감소시키고 케이블 이용율을 20%정도 증가시킬 수 있는 본 연구는 기존의 양단 접지 방식과 편단접지 방식을 혼합 사용하는 방식으로 이미 검증된 기술을 단지 혼합 사용하는 기술이므로 본 연구 결과가 활용 되어 효율적인 전력공급이 될 수 있기를 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] ANSI/IEEE Std 575-1988
- [2] 전기기술, 김정철 저 技多利 (2001.4.5)
- [3] 22.9kv CV/CCN케이블의 중성선 전류가 허용전류미치는 영향 김복현 석사 논문 (1987.6.)
- [4] 차폐층의 허용전압 (한국전력공사 설계기준 1650)
- [5] 배전기준, 대한전기협회 배전규정전문위원회 (1997.4.10)
- [6] 한국전력공사배전 지중설계기준 5900부록.
- [7] 일진전기 케이블 카다록
- [8] 회로 이론, 이준용 저 동일출판사 (1996.1.20)
- [9] PRTECTIVE RELAYS APPLICATION GUIDE, (GEC, 1987)
- [10] 보호계전기실무, 한국전력공사 신기술사 출판(1997)
- [11] 지중전력케이블 제2권, 한국전력공사 송변전처(1995. 6)
- [12] 지중송전케이블시스템, 한국전력공사 송변전건설처(2002. 12)