

## 22.9[kV] CNCV케이블 지중배전계통의 3상 비일괄 동심중성선 다중접지방식에 대한 이론적고찰

(A Consideration on 3-Phase Non-Loop, Multiple-Point Ground Method in 22.9[kV]  
CNCV Underground Cable Systems)

전명수 · 송중호\*

(Myung-Su Jeon · Joong-Ho Song)

### 요 약

현재 국내에서 사용되고 있는 22.9[kV]-y 배전 방식은 지중 케이블로 전력을 공급하고 있으며, 선로 운영상 배전 케이블 선로의 동심중성선을 케이블 접속 구간마다 3선 일괄 접지하는 3상 일괄 다중접지방식을 채택하고 있다. 이 방식에서는 동심중성선에 부하 전류의 약 40%[(전력구)~50%](관로)의 동심중성선 순환 전류가 발생하고 있다. 본 논문은 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 새로운 3상 비일괄 동심중성선 다중접지방식을 제안하고 있으며, 케이블의 허용전류계산, 케이블차폐층의 유기전압 및 선로에서 발생하는 유도장애등의 기술적인 문제들을 종합적으로 해석하고 있다.

### Abstract

In 22.9[kV]-y distribution systems, underground cables are provided with 3-wire loop multiple-point ground in which each coaxial-neutral line of the distribution cable lines(A, B, C phases) is 3-wire common grounded at every connecting section. In the underground cable distribution systems, circulating current flows in the coaxial-neutral lines and its magnitude amounts to about 40~50[%] load currents, even though loads are balanced. This paper presents a new ground method to overcome such a problem and a comprehensive analysis in terms of current capacity of power cables, induced voltage of cable sheath, and electromagnetic interference voltage from power cable lines.

Key Words : Corculating current in co-axial neutral lines of distribution cables, Multiple-point ground,  
Non-loop multiple-point ground, Induction interference, Tolerant Current of cables

\* 교신저자 : 서울산업대학교 전기공학과 부교수

Tel : 02-970-6415, Fax : 02-978-2754

E-mail : joongho@snut.ac.kr

접수일자 : 2007년 10월 16일

1차심사 : 2007년 10월 22일

심사완료 : 2007년 10월 31일

### 1. 서 론

22.9[kV]-y 지중케이블배전 방식은 배전 선로의 동심중성선을 일정 구간 마다 접지하는 3상 일괄 동심중

## 22.9[kV] CNCV케이블 지중배전계통의 3상 비일괄 동심중성선 다중접지방식에 대한 이론적고찰

성선 다중 접지방식을 채택하고 있다[1-4]. 이러한 다중 접지방식은 동심 중성선을 대지에 직접 접지하기 때문에 지락 사고 시 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 방지 하고자 케이블 접속 구간마다 동심 중성선을 일괄 접지하는 방식으로 배전 계통을 운영 하고 있다[1-4].

3상 일괄 동심중성선 다중접지방식을 사용하는 목적중 하나는, 정상시에는 불평형 부하전류를, 지락 사고시에는 동심 중성선의 대지 전위 상승을 일정값 이하로 제한하여 배전 계통을 안전하게 유지하기 위해서이다. 그러나 지중 배전 선로에서 각상의 부하가 불평형이 되는 것은 물론 평형일 경우에도 동심 중성선에는 부하 전류에 비례하는 동심 중성선 순환전류가 발생되고 있기 때문에 불필요한 손실전력이 발생한다. 이러한 손실전력으로 케이블의 내부 온도가 상승되어 케이블의 허용전류용량이 감소한다[5].

본 논문은 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 3상 비일괄 다중접지방식을 제안하고, 기존의 일괄 다중접지방식과 새롭게 제안하는 비일괄 다중접지방식의 이론적 해석을 전개하면서 그 특성을 비교 검토하고 있다. 전력케이블의 허용전류, 케이블차폐층의 유기전압 및 발생 유도장에 등의 기술적인 문제점들을 공사방식에 따라서 종합적으로 해석한 결과를 중심으로 이들 2가지 접지방식을 비교분석하고 있다.

### 2. 3상 일괄 다중접지 방식의 문제점

현재 사용중인 22.9[kV]-y 다중접지계통에 사용하는 CNCV 케이블은 그림 1과 같으며, 현재의 22.9[kV]-y 다중접지 CNCV 케이블 지중배전설비 계통은 그림 2와 같이 구성되어 있다. 전력선 도체에 흐르는 부하전류가 도체를 둘러싸고 있는 동심중성선에 유도하는 유기전압이, 동심중성선에 흐르는 순환전류의 발생원인이 되고 있다. 계통의 접지선에는 A, B, C상의 벡터 합성 전류가 접지선을 통하여 흐르게 되므로 서로 상쇄 되어 적은 값의 전류가 흐르고 있다. 그러나 그림 2와 같이 A, B, C 3상의 동심

중성선 각각을 단락시킨 후 일괄 접지하므로 3선을 단락시킨 동심중성선 상호간에는 순환회로가 구성된다. 발생된 중성선 유기전압은 작은 저항의 중성선순환회로루프를 통하여 거의 단락된 것과 마찬가지로 지이므로, 대단히 큰 순환전류가 그림 2와 같은 순환회로에 흐르게 된다.

### 3. 3상 비일괄 다중접지 방식의 개요와 특징

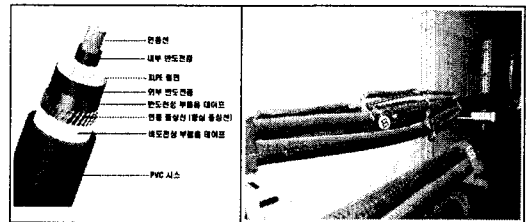


그림 1. 전력구 CNCV 케이블 구조 및 포설  
Fig. 1. CNCV cable and its configuration in cable tunnel

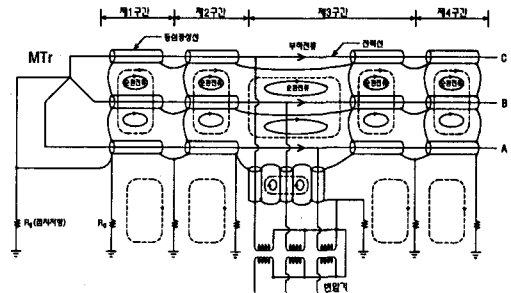


그림 2. 현재의 3상 일괄 다중접지 방식  
Fig. 2. Conventional loop, multiple-point ground systems

22.9[kV]-y 다중접지 계통의 CNCV 케이블은 케이블 연결점 또는 분기점 마다 동심중성선을 A, B, C 3선 모두 일괄하여 접지하므로 3선의 동심중성선이 단락 상태로 접지된다. 따라서 도체에 부하전류가 흐르게 되면 전자유도작용에 의해 동심중성선에 전압이 유기된다. 이 유기전압은 3상 단락되어있는 동심중성선의 회로에 부하전류의 46.7~51.6[%] 정도의 순환전류를 추가적으로 흐르게 한다[5]. 따라서 불평형 부하전류 발생 시에 그 불평형전류를 흐르게

해주고, 또 지락사고시 지락전류의 귀환 회로의 역할을 해주는 동심중성선의 본래 목적을 만족하면서 발생하는 순환전류를 완전하게 제거할 수 있는 방안의 강구가 필요하다. 그 해결 방법으로 그림 3과 같이 22.9[kV]-y 다중접지 계통의 CNCV 케이블 동심중성선의 시작점은 3선 일괄 접지하고, 종단점의 1상만을 중성선으로 사용하면서 접지하고, 종단점의 나머지 2상은 개방 하여 비접지로 하는 방안을 제안한다. 이 경우 순환 회로가 완전히 제거되면서 다중 접지 계통에는 변화가 없으므로 평상시 불평형 전류 및 지락시 고장전류 귀환에는 문제가 없을 뿐만 아니라 보호계전기 동작 조건에도 변화가 없게 된다.

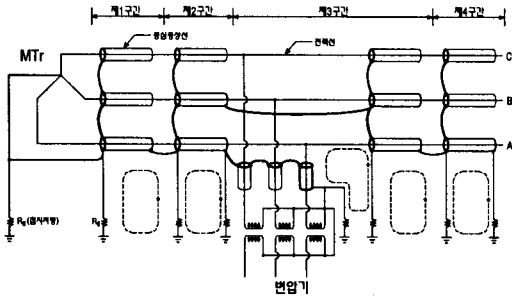


그림 3. 새로 제안하는 3상 비일괄 다중접지 방식  
Fig. 3. Proposed non-loop, multiple-point ground systems

### 4. 3상 비일괄 다중접지방식의 이론적 해석 및 특성 고찰

#### 4.1 전력 케이블의 허용전류 계산

정상 상태에서 도체 온도를 최고 허용온도로 유지할 때, 100[%] 부하율의 연속 허용 전류는 다음 식 (1)과 같다[3].

$$I_P = \left[ \frac{\Delta Q_P - w_d(T_{1/2} + T_2 + T_3 + T_4)}{rT_1 + nr(1 + \lambda_1)T_2 + nr(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서  $\Delta Q_P$ =도체온도 상승분,  $w_d$ =유전체손실[w/m],  $r$ =교류도체실효저항[Ω/m],  $\lambda_1$ =도체손실과 시스손실비[ $w_s/w_c$ ],  $\lambda_2$ =도체손실과 아모아

손실비[ $w_a/w_c$ ],  $w_s$ =시스손실[w/m],  $w_c$ =도체손실[w/m],  $w_a$ =아모아손실[w/m],  $T_1$ =도체와 시스간의 열저항[°C-m/w],  $T_2$ =시스와 아모아간의 열저항[°C-m/w],  $T_3$ =케이블 외피의 열저항[°C-m/w],  $T_4'$ =케이블 표면에서 관로내부까지의 열저항[°C-m/w],  $T_4''$ =관로자체의 열저항[°C-m/w],  $T_4'''$ =관로의 외부 열저항[°C-m/w],  $T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''$ ,  $wk$ =타 케이블에서 발생한 총손실,  $k=1 \dots \dots NC$  ( $K \neq P$ ),  $NC$ =케이블 회선수 혹은 관로수,  $n$ =심선수, 22.9[kV] CNCV 케이블의 경우  $\lambda_2$ 와  $T_2$ 는 고려하지 않으며, 심선수  $n$ 은 1이다. 도체의 온도상승  $\Delta Q_P=50$ 으로 간주하여 계산한다.  $\lambda_2$ 와  $T_2$ 는 고려하지 않는다. 이상의 조건을 고려하여 식 (1)을 간략화하면 다음 식과 같다.

$$I_P = \sqrt{\frac{50 - w_d(T_1/2 + T_3 + T_4)}{r[T_1 + (1 + \lambda_1)(T_3 + T_4)]}} \quad (2)$$

이 일련의 계산을 수행하기 위하여 필요한 CNCV 케이블(325[mm<sup>2</sup>], 동심중성선 108[mm<sup>2</sup>])의 전기적 파라미터는 복잡한 계산과정을 거쳐서 아래와 같이 정리할 수 있다. 직류도체저항  $r_0 = 568.44 \times 10^{-7}$  [Ω/cm], 교류도체저항  $r = 7.4839 \times 10^{-7}$  [Ω/cm] 정전용량  $C = 0.256$  [μF/km], 유전체손  $w_d = 2.144 \times 10^{-4}$  [w/cm], 중성선저항  $r_s = 2.0176 \times 10^{-6}$  [Ω/cm]

가. 3상 일괄 다중접지 방식(전력구공사)

그림 2와 같은 3상 일괄 다중접지방식에서 동심중성선에 45[%]의 순환전류가 흐를 경우(전력구)의 허용전류를 계산해 본다. 식 (2)에서 케이블 외부조건은 동일 조건이므로 허용전류  $I_P$ 를 계산하기 위한 파라미터들의 계산은 다음과 같다.

$$T_1 = \frac{\ell_1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} = 42.2, \quad T_3 = \frac{30 \times \ell_3}{\pi d_5 \times 2.16} = 76.5, \\ T_4 = \frac{8 \times \eta_3}{2\pi} \times \ln \left\{ \frac{2x_L}{D} + \sqrt{\left( \frac{2x_L}{D} \right)^2 - 1} \right\}, \quad \eta = \text{지하수 기하에 따른 열저항 감소율}(0.35), \quad L = \text{전력구 중심}$$

22.9[kV] CNCV케이블 지중배전계통의 3상 비일괄 동심중성선 다중접지방식에 대한 이론적고찰

까지의 매설깊이[cm]  $(120+H) \cdot 225$ ,  $D$ =전력구 등  
 가직경[cm]  $\sqrt{\text{높이} \times \text{직경}}$  (214),  $g$ =토양의 고유열  
 저항 [ $^{\circ}\text{C-cm/w}$ ] (100),  $\ell_1$ =절연체의 고유열저항  
 (450),  $d_2$ =절연체 외경(반도전층 포함 39.1),  $d_1$ =  
 도체의외경(21.7),  $\ell_3$ =표면방산 고유저항 (900),  $d_5$   
 =케이블 외경(52.0)

$$I_p = 622[\text{A}] \quad (3)$$

이 경우 도체 손실과 동심중성선 손실비  $\lambda_1$ 은 다  
 음과 같다.

$$\lambda_1 = \frac{I_{sr}^2}{I_T^2} = 0.545 \quad (4)$$

나. 3상 비일괄 다중접지 방식(전력구공사)

그림 3과 같은 3상 비일괄 다중접지 방식(전력구)  
 에서 동심중성선에 순환전류가 흐르지 않으므로 이  
 경우의 허용전류는 다음과 같이 계산한다.

$$I_p' = 726[\text{A}] \quad (5)$$

정3각형 배열의 경우, 동심중성선 전류를 제거한  
 케이블의 전류용량 증가율은 약 16[%]이다.

다. 3상 일괄 다중접지 방식(관로공사)

표 1. 동심중성선 순환전류의 크기  
 Table 1. Circulating current into coaxial-neutral  
 lines

도 체 굵 기 325[mm <sup>2</sup> ]		
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
평 균		0.516

그림 2와 같은 3상 일괄 다중접지 방식(관로)에서  
 케이블의 동심중성선에 51.6[%]의 순환전류가 흐르  
 는 경우의 허용전류를 계산할 수 있다. 관로공사의

경우 동심중성선에 흐르는 순환전류의 비중은 표 1  
 과 같이 측정되었다[5].

동심중성선에 51.6[%]의 순환전류가 흐르고 있으  
 며, 이때 325[mm<sup>2</sup>]의 케이블의 허용전류  $I_p$ 를 계산  
 할 수 있다. 도체 손실과 동심중성선 손실비  $\lambda_1$ 은

$$\lambda_1 = \frac{I_{sr}^2}{I_T^2} = 0.717 \quad (6)$$

이다. 케이블 표면에서 관로 내부 열저항 관로 자체  
 열저항, 관로 외부열저항은 전력구의 합성값  $T_4$   
 $= 7.656[^{\circ}\text{C-cm/w}]$ 와 같은 것으로 계산한다.

$$I_p = \sqrt{\frac{50 - w_d \left( \frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right)}{r(T_1 + (1 + \lambda_1)(T_3 + T_4))}} = 602[\text{A}] \quad (7)$$

라. 3상 비일괄 다중접지 방식(관로공사)

그림 3과 같이 3상 비일괄 다중접지방식에서는 케  
 이블의 동심중성선에 순환전류가 흐르지 않으므로  
 이 때의 허용전류(관로공사)는 다음 식과 같다.

$$I_p' = 727[\text{A}] \quad (8)$$

관로공사의 경우 동심중성선 전류를 제거하는 본  
 기술을 적용한 경우 케이블의 전류용량 증가율은 아  
 래와 같다. 증가율 =  $\frac{727 - 602}{602} \times 100 = 20.76[\%]$ .  
 이상을 정리하면 다음 표 2와 같다.

표 2. 허용전류 및 이용률 비교표  
 Table 2. Tolerant current and availability of  
 cables

규 격		허용전류		이용률 증가(%)	비 고
		현재	신기술 적용		
CNCV 325[mm <sup>2</sup> ]	관로 (요람배열)	602	727	20.76	평균 증가율 18.74[%]
	전력구 (3각배열)	622	726	16.72	

4.2 케이블차폐층의 유기전압

차폐층 유기전압 상승치는 ANSI에 의한 Sheath

계산절차에 따라서 결정할 수 있다[6]. 필요한 파라미터들은 CNCV 325[mm] [7], 동심중성선 108[mm], 차폐층 평균직경  $d = [55 - (3 \times 2)] = 49$ [mm], 케이블 중심간거리  $s = 55 \times \frac{1}{2} \times 2 = 55$ [mm], 계산조건 정격전류 595[A], 최대고장전류(단락, 지락): 10,000[A], 동심중성선 순환전류  $595 \times 42[\%] = 250$ [A] 실측결과 42[%] 등이다. 기준식은 다음 식 (9)와 같다.

$$E_a = j\omega \times I_B \times (2 \times 10^{-7}) \times \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \log_e \left(\frac{2s}{d}\right) \text{ [V/m]} \quad (9)$$

가. 정삼각형 배치 시 A, B, C상 차폐층 유기전압 (300[m] 기준)

◇ 최대부하운전시(595[A])

$$E_{aN} = j\omega I_B \times (2 \times 10^{-7}) \times \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \log_e \left(\frac{2s}{d}\right) \text{ [V/m]} \\ = 10.8 \text{ [V/300m]} \quad (10)$$

◇ 최대고장시(3상 단락 10,000[A] 가정)

$$E_{aF} = j377 \times (2 \times 10^{-7}) \times 10,000 \times \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \log_e \left(\frac{2 \times 55}{49}\right) \times 300 \\ = 181 \text{ [V/300m]} \quad (11)$$

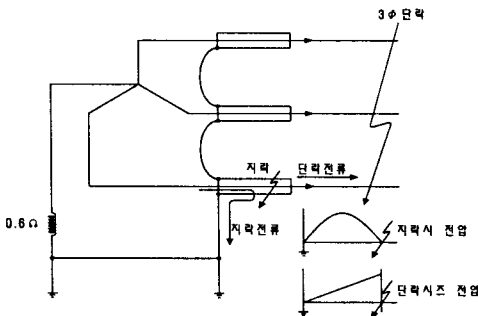


그림 4. 3상단락시 동심중성선 전류 흐름도  
Fig. 4. Current flow in coaxial-neutral lines when 3 phases grounded

그림 4와 같이 지락전류가 최대단락전류일 경우 개방단 지락시 중간지점의 전압은 100[V]를 넘지 않음을 보여 주고 있다. 시스의 상시 최대 유기전압 크기 100[V] 이하이므로 고장시에도 고려할 필요 없으므로 3각 결선시는 편단 접지 하여도 허용치 이내이므로 문제없다. 또한 시스의 이상시 내전압이 4[kV]이므로 시스 절연에도 문제없다[1].

나. 요람 배열시 차폐층 유기전압

시스선의 유기전압은  $|E_a| = |E_b|$ 이고  $E_b$  보다 크므로  $E_a$ 만 계산한다.(300m 기준)

◇ 최대부하운전시

$$E_a = j\omega I_B \times (2 \times 10^{-7}) \times \left[-\frac{1}{2} \log_e \frac{s}{d} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4s}{d}\right] \text{ [V/m]} \\ = 17.52 \text{ [V/300m]} \quad (12)$$

325[mm] 최대부하 595[A]에서도 동심 중성선에 유기전압이 100[V] 초과될 수 있는 케이블 길이는 약 1,712[m]이다. 300[m]에서도 17.52[V]이므로 1,712[m]에서는  $17.52 \times 1,712[m] / 300 = 100$ [V], 따라서 해저 구간에서와 같이 동심중성선의 구분 접지가 곤란한 경우에는 약 1.7[km]가 초과 되면 편단 접지하고 상대단(개방단)을 전압 억제 장치(적정저항부착)를 취부할 필요가 있다.

◇ 3상 단락 고장시(최대고장전류 10,000[A] 가정)

$$E_a' = j2\pi \times 60 \times 10,000 \times (2 \times 10^{-7}) \times \left[-\frac{1}{2} \log_e \frac{55}{49} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4 \times 55}{49}\right] \times 300 \\ = 294 \text{ [V/300m]} \quad (13)$$

이 경우에도 시스 상시 유기전압은 17.52 [V/300m]로 100[V]에 미치지 못하며, 이상시 유기전압도 294 [V/300m]로서 시스 내전압 4[kV]에 미치지 못하므로 한쪽을 개방하고 편단 접지하여도 문제없다.

4.3 유도장애 해석

정전유도는 전력선과 통신설비 등과의 정전용량과 전력선의 전압크기에 따라 그 정도가 결정되므로 기존의 일괄접지 방식이나 비일괄 다중접지방식에서 변화가 없이 동일한 조건이 된다.

전자유도는 전력선과 통신선의 자기적 결합 때문에 통신선 등에 전압이 유기되는 현상이므로 평형 3상 부하에서는 A,B,C상 전류의 합성전류가 영이 되므로 전자유도는 문제되지 않는다. 그러므로 지락고장시나 심한 단상 부하전류에 의한 각상 전류의 합이 영(Zero)이 되지 않을 경우에 문제가 된다. 전자유도 현상을 수식으로 검토해 본다.

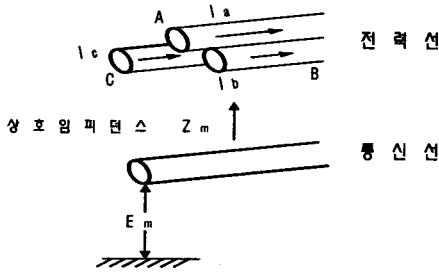


그림 5. 전자유도  
Fig. 5. Electromagnetic induction

그림 5와 같은 선로배열에서 통신선에 발생하는 전자유도전압  $E_m$ 은

$$E_m = -Z_{ma}I_a - Z_{mb}I_b - Z_{mc}I_c$$

$$\approx -Z_m(I_a + I_b + I_c) \approx -Z_m \times 3I_0 \quad (14)$$

로 표현된다. 여기서,  $Z_m$ : 전력선과 통신선 상호인피던스[Ω],  $I_0$ : 전력선의 영상전류,  $3I_0$ : 기유전류  $= I_a + I_b + I_c$ ,  $Z_m = j\omega ML$ [Ω] (L: 거리)

만일 대지를 완전 도체로 가정하면 다음 식 (15), (16)으로 정리된다.

$$Z_m = j(2\omega \ln \frac{D}{D}) \times 10^{-4} [\Omega/\text{km}] \quad (15)$$

단 r=전력선의 반경 [m], D=전력선과 통신선 거리[m]

$$E_m = -Z_m \times 3I_0$$

$$= j(2\omega \ln \frac{D}{D}) \times 10^{-4} \times 3I_0 [V] \quad (16)$$

전자유도전압은 전력선과 통신선로 등의 상호인피던스와 기유전류에 비례하며, 기유전류 ( $3I_0$ )는 불평형 부하와 지락고장의 경우에 의해 발생하게 된다.

가. 불평형 부하전류에 의한 유도장애

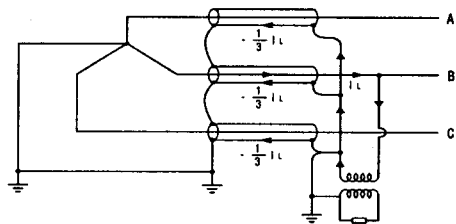


그림 6. 기존의 동심 중성선 일괄 다중접지 방식에서의 불평형전류 흐름  
Fig. 6. Flow of unbalanced currents in the conventional ground systems

그림 6에서와 같이 기유전류  $3I_0 = I_L - (\frac{1}{3}I_L + \frac{1}{3}I_L + \frac{1}{3}I_L) = 0$  이므로, a, b, c상의 도체전류와 동심 중성선의 전류 합성인 기유전류  $3I_0 = 0$  이 되어 전자유도는 작용하지 않는다.

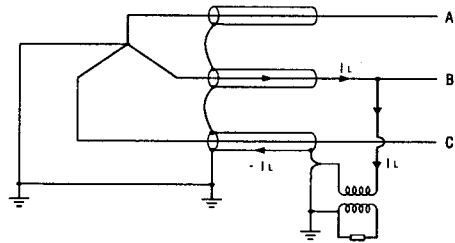


그림 7. 비일괄 다중접지방식의 불평형전류 흐름  
Fig. 7. Flow of unbalanced currents in the proposed ground systems

그림 7에서 보는 바와 같이 기유전류  $3I_0 = I_L - I_L = 0$ 이므로, c상의 동심 중성선에만 부하전류가 흐르게 되지만 합성전류인 기유전류  $3I_0 = 0$  이 되어 일괄 다중접지 방식과 동일하게 전자유도는 작용하지 않는다.

나. 1선지락 고장에 의한 유도장애(3상 일괄 다중 접지)

기존의 동심 중성선 3상 일괄 다중접지 방식에서 만일 b상 지락이 발생한 경우의 지락전류 흐름은 그림 8과 같이 표현할 수 있다.

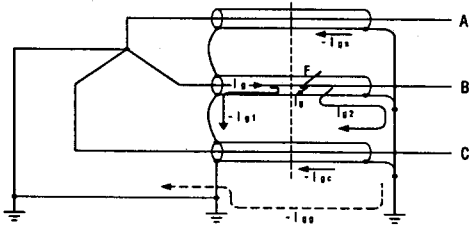


그림 8. 3상 일괄 다중접지시 지락전류 흐름  
Fig. 8. Flow of ground fault current in the conventional ground systems

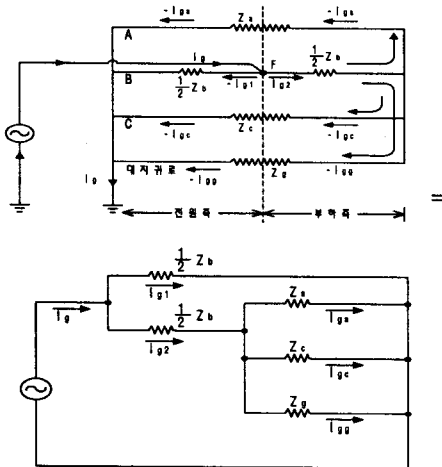


그림 9. 3상 일괄 다중접지에서 지락발생시의 등가회로  
Fig. 9. Equivalent circuits for the conventional ground systems

1선 지락 고장점 F(중간) 기준으로 하여 기유전류  $3I_0$ 를 구해본다. 대지 귀로 임피던스로 1선의 동심 중성선 임피던스와 동일한 것으로 가정할 경우 등가회로는 그림 9와 같이 표현할 수 있다.

여기서 각상의 임피던스와 대지귀로 임피던스를 동일 한 것으로 가정한다.

$Z = Z_a = Z_b = Z_c = Z_g$  이므로 각 지로에 흐르는 전류는

$$I_{g1} = I_g \times \frac{\frac{1}{2}Z + \frac{1}{3}Z}{\frac{1}{2}Z + (\frac{1}{2}Z + \frac{1}{3}Z)} = 0.625I_g \quad (17)$$

$$I_{g2} = I_g \times \frac{\frac{1}{2}Z}{\frac{1}{2}Z + (\frac{1}{2}Z + \frac{1}{3}Z)} = 0.375I_g \quad (18)$$

$$I_{ga} = I_{gc} = I_{gg} = I_{g2} \times \frac{1}{3} = 0.125I_g \quad (19)$$

이며, 이상의 결과를 이용하여 고장점을 기준으로 전원측과 부하측의 기유전류를 계산할 수 있으며, 각각 식 (20), (21)로 정리된다.

$$3I_{01} = I_g - (I_{ga} + I_{g1} + I_{gc}) = 0.125I_g \quad (20)$$

$$3I_{02} = I_{g2} - (I_{ga} + I_{gc}) = 0.125I_g \quad (21)$$

즉 전원측이나 부하측이나 고장전류  $I_g$ 의 12.5 [%]가 주변설비에 전자유도장애를 유발하나 최대 OCGR이 0.5초 이내에 차단되므로 실제 선로에서 문제되지 않는다.

다. 1선지락 고장에 의한 유도장애(3상 비일괄 다중접지)

본 논문에서 그림 3과 같이 새로이 제시한 3상 비일괄 다중접지방식에서 1선지락이 발생했을 때를 해석하기 위해서는, a상 또는 b상 선로지락이 발생한 경우와 c상 선로지락이 발생한 경우 2가지로 나누어서 해석해야 한다. 우선 a상 또는 b상 지락이 발생한 경우를 살펴 본다. 그림 10은 b상 지락이 발생한 경우를 보여 주고 있고, 이의 등가회로는 그림 11에 표현되어 있다. a상 지락이 발생한 경우는 b상 지락이 발생한 경우와 동일하게 해석할 수 있음은 분명하다.

$Z = Z_a = Z_b = Z_c = Z_g$ 로 하고 각 지로에 흐르는 전류를 구하면  $I_{gc} = I_g \times \frac{0}{Z_c + Z_g} = 0$ 이므로, 따라서  $I_g = I_{g1}$ ,  $I_{gc} = I_{gg} = 0$ 이 된다. 고장점을 기준으로 하여 전원측과 부하측의 기유전류는 각각 다음 식 (22), (23)으로 계산된다.

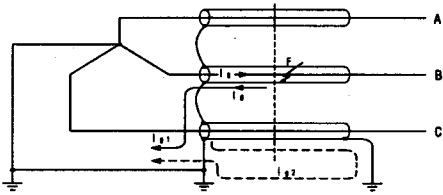


그림 10. 3상 비일괄 다중접지시 지락전류 흐름(b상 지락시)

Fig. 10. Flow of ground fault current in the proposed ground systems

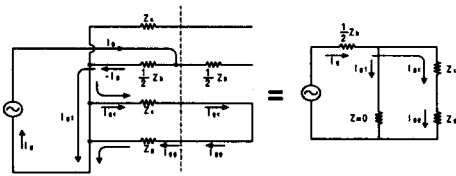


그림 11. 3상 비일괄 다중접지에서 지락발생시의 등가회로(b상 지락시)

Fig. 11. Equivalent circuits for the proposed ground systems

$$3I_{01} = I_g - I_{g1} + I_{g2} = 0 \quad (22)$$

$$3I_{02} = I_{g2} = 0 \quad (23)$$

위의 결과에서  $3I_{01} = 3I_{02} = 0$ 이 되므로 다중접지로 사용(c상)되지 않는 a상, b상에 지락 고장시는 전원측, 부하측 모두 전자유도장해를 유발하지 않는다.

다음 다중접지로 사용하는 c상에서 지락사고가 발생한 경우를 해석하기 위하여 그림 12는 지락사고시의 전류흐름을 보여 주고 있으며, 이의 해석 등가회로는 그림 13과 같이 표현할 수 있다.

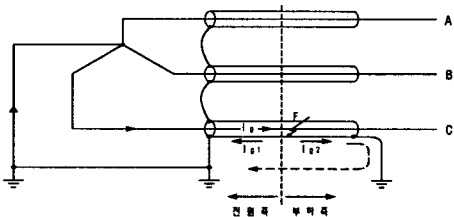


그림 12. 3상 비일괄 다중접지시 지락전류 흐름(c상 지락시)

Fig. 12. Flow of ground fault current in the proposed ground systems

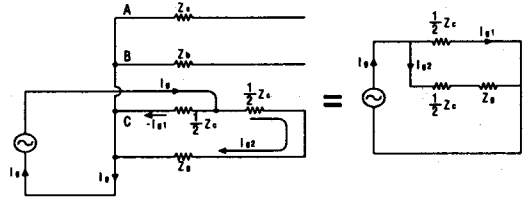


그림 13. 3상 비일괄 다중접지에서 지락발생시의 등가회로(c상 지락시)

Fig. 13. Equivalent circuits for the proposed ground systems

등가회로에서  $Z = Z_a = Z_b = Z_c = Z_g$ 로 하므로 각 지로에 흐르는 전류는

$$I_{g1} = \left( \frac{\frac{1}{2}Z + Z}{\frac{1}{2}Z + \frac{1}{2}Z + Z} \right) I_g = 0.75I_g \quad (24)$$

$$I_{g2} = \left( \frac{\frac{1}{2}Z}{\frac{1}{2}Z + \frac{1}{2}Z + Z} \right) I_g = 0.25I_g \quad (25)$$

이고, 고장점을 기준으로 하여 전원측과 부하측의 기류전류를 살펴보면 각각 식 (26), (27)과 같이 계산된다.

$$3I_{01} = I_g - I_{g1} = 0.25I_g \quad (26)$$

$$3I_{02} = I_{g2} = 0.25I_g \quad (27)$$

즉 전원측이나 부하측 모두 고장전류의 25%가 기류전류로 작용할 수 있다. 따라서 다중접지 중성선으로 사용하지 않는 나머지 2선의 지락시는 비일괄 다중접지가 유리하나, 다중접지 중성선으로 사용되는 선의 지락 고장시는 기존의 방법에 비해 전자유도장해가 다소 클 수 있으나 OCGR이 0.5초 이내에 차단되므로 실용상 문제가 되지는 않는다.

이상의 해석결과를 종합적으로 정리하면 표 3과 같이 요약할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 3상 비일괄 공동중성선 다중접지방식의 이론적 해석을 전개하고 그 특성을 분석하였다.



## 표 3. 종합 검토 요약표

Table 3. Practical considerations on the proposed method

구 분		기 준 참 고 값	검 토 내 용	결 과	
안전 측면 (동심 중성선 전위 상승)		상시최대유기전압 100[kV] (한전 설계 기준 1650)	공장 300[m] 최대부하 595[A] (325[mm] 정격전류)에서 정3각배열: 10.80[V/300m] 요람배열: 17.52[V/300m]	문제없음	
지락 사고	건전상의 전위상승	-	주변압기 중성점 접지 저항값의 변화가 없으므로 비일괄 공 동 접지방식 에도 변화 없음.	현재와 동일	
	보호계전기 동작	OCGR 동작시간	한시정정 0.5sec 이내(보호계전기 정정 기준서)	현재와 동일	
	지락전류 검출	154/22.9[kV] 45/60[MVA] 사용기준	최대지락전류 7~10[kA]	현재와 동일	
차폐 측면	정 전 유 도	각상의 불평형 전압값에 좌우됨	비일괄 다중접지 방식과 각상 전압의 크기 변화와는 무관함	현재와 동일	
	전 자 유 도	상 시	기유전류 $3I_0$	3상 전력선 전류+동심중성선 전류의 합성전류( $3I_0$ )는 비일 괄 다중접지에서도 0이 됨.	문제 없음
		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 충격 내전압 40[kV] 파괴기 정격전압 18[kV] (ES-126-650-664)	전력선에 서지 침입시 15~25[%]가동심 중성선에 침입 (4.5[kV])	문제 없음	

일괄다중접지방식과 비일괄다중접지방식에 따라서 지중배전케이블의 허용전류를 계산하는 과정을 제시하였다. 3상 비일괄 다중접지방식을 채용하면 도체의 허용전류가 평균 19[%]정도 증가하는 것을 확인하였다. 유도장에 해석을 위한 3상 비일괄 다중접지방식의 회로모형과 해석모형을 제시하였으며, 불평형 전류 및 지락고장전류에 대한 이론적 해석을 정리하였다. 본 논문에서 제안하는 방식으로 접지방식을 개선하더라도 다중접지 계통의 접지시스템과 보호방식에는 아무런 변화가 없으며, 평상시 불평형 부하전류 및 고장시 고장전류에 의한 중성선 용량과 보호협조 유도장에도 현재와 동일하게 문제가 없음을 확인하였다.

## References

- [1] '지중설계기준 1650', 한국전력공사, 2004.
- [2] '배전규정', 대한전기협회 배전규정전문위원회, 1997.
- [3] '배전지중설계기준 5900부록', 한국전력공사, 2003.
- [4] 한전표준구매시방서, '22.9(kV) 동심중성선 전력케이블', ES-126-650-664, 한국전력공사, 2001.
- [5] 김복현, '22.9(kV) CV/CN케이블의 중성선 전류가 허용전

류에 미치는 영향', 연세대학교 석사논문, 1987.

- [6] 'IEEE guide for the application of sheath-bonding methods for single-conductor cables and the calculation of induced voltages and currents in cable sheaths', ANSI/IEEE Standard 575, 1988.
- [7] 일진전기, 케이블 카다록(IJ-010409).

## ◇ 저자소개 ◇

## 전명수 (全明洙)

1945년 2월 26일생. 1978년 경기공전 졸업. 2007년 서울산업대 철도전문대학원 졸업(석사). 1991년 발송배전 기술사. 1965~1982년 한전과장. 1984~1992년 현대정유 차장. 1992~1997년 선도전기 이사. 1997~1999년 한신콘설턴트 전무. 1999년~현재 일렉컨설팅 대표. 2004년~현재 서울산업대 겸임교수.

## 송중호 (宋重鎬)

1957년 1월 30일생. 1980년 서울공대 전기공학과 졸업. 1982년 서울공대 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 1995~1996년 미국 위스콘신대 초빙연구원. 1982~1985년 이화전기 기술개발부. 1985~2002년 한국과학기술원 지능제어연구센터 책임연구원. 2002년~현재 서울산업대학교 전기공학과 부교수.

Email : joongho@snut.ac.kr