

## 지락고장시 중성선 전위상승에 따른 저압기기 스트레스 전압

최선규, 박창호, 이병성, 김경훈  
한국전력공사

### Transferred Voltages on LV sides in Multigrounded Neutral during Line to Ground Fault

Sun-Kyu Choi, Chang-Ho Park, Byung-Sung Lee, Kyoung-Hun Kim  
Korea Electric Power Corporation

**Abstract** - IEC 61936의 저압기기 허용 상용주파 과전압에 대하여 선로의 지락고장시 고장전류의 분류 효과 및 등가회로를 이용하여 수학적 계산식을 도출하고 EMTP를 이용하여 모의를 수행하였다. 또한 시험선로를 이용하여 실증시험을 수행하여 실제 고장현상을 검토하였다. 현재 배전계통의 접지수준은 기준을 충분히 만족하고 있으므로 다양한 사례 연구를 통하여 접지기준의 개정을 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

#### 1. 서 론

국내 배전계통은 1960년대 전력수요 증가에 따른 공급용량 증대 방인으로 3상 4선식 중성선 다중접지 계통을 도입하였다. 당시에는 전력공급이 최우선 과제였기 때문에 비접지계통의 접지기준을 준용하여 다중접지계통을 운영하였다. 이로 인해 22.9 kV-y 배전계통은 중성선 다중접지 방식이지만 수용가 구내 전기설비는 개별접지 방식으로 운용되고 있다. 이와 관련하여 특고압 선로에서 지락고장이 발생할 경우의 중성선 전위상승에 따른 수용가 설비의 영향을 검토하였으나, 중성선 전위상승 제한치를 특별히 정하지 않은 상태에서 일본의 11.4 kV 계통 검토시 중성선 전위상승 제한치를 750 V로 검토한 사례와 저압기기의 내전압 시험기준인 1000 V를 참고하여 중성선 접지시설기준을 연구한 사례가 있었다 [1]. 2010. 1월 고시된 전기설비 기술기준의 제18조 6항에 의거 IEC 60364의 접지기준을 근거로 중성선 전위상승 제한치가 반영되었다. 이 조항을 국내 배전계통에 적용하기 위하여 연구과제가 수행되었으며, 연구과제의 결과로 다음과 같은 사항을 제시하였다[2].

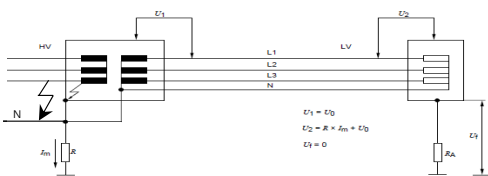
- 22.9 kV-Y 중성선, 변압기 외함, 저압중성선 접지를 공통으로 접속하는 경우 등전위본딩 필수
- 변압기외함과 저압측 기기 사이의 섬락에 대한 대책으로 변압기를 공통접지방식으로 해야하는 타당성의 하나
- IEC 규격의 계산식은 최악조건을 제시한 식이거나, 또는 변압기의 극성을 고려하지 않은 식으로 판단

상기 참고문헌은 다중접지 계통에서 접지측 분류율을 5%로 가정하고, 고장전류 또한 5 kA 정도의 평균값을 적용하여 검토하였다. 실증시험에 있어서도 가공지선 생략하고 250 A의 고장전류를 중성선에 발생시켜 저압기에 전도되는 전위를 반영하였다. 본 연구에서는 실선로의 중성선 합성저항을 계산, 측정하고 선로 거리에 따른 고장전류를 반영한 EMTP 모의를 수행하였다. 또한, 고장 KEPCO PT(Power Test) Center 내의 배전 실증시험선로 및 AFG(Artificial Fault Generator)를 이용하여 중성선 전위상승 측정을 위한 실증시험을 수행하였다. 이를 통해 중성선 다중접지 계통의 접지수준에 따른 가공선로, 가공과 지중 혼계선로에서 고저압 혼촉시 지락고장전류에 의해 발생하는 중성선의 전위상승을 검토하였으며, IEC 61936-1에서 제시한 저압기기 스트레스 전압 제한치 1,200 V 이내의 조건을 만족하는 접지기준을 제시하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 저압기기 스트레스 전압

IEC 61936의 저압설비 허용 상용주파 과전압은 고압계통에서 지락고장 발생될 있는 고장전류에 의해 중성점 전위상승이 저압설비 상도체와 외함간의 전위차를 야기하여 절연이 파괴될 있는 상전압을 의미한다.



〈그림 1〉 1차측 지락고장시 저압기기 과전압(U2)

그림 1과 같이 1차측(고압측)의 지락고장은 상도체와 중성선, 변압기 내부의 고장으로 발생될 수 있다. 변압기 내부고장은 권선 자체의 임피던스가 존재함으로 상대적으로 고장전류가 적다.

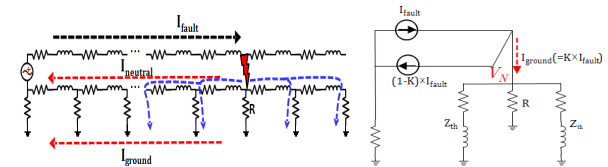
본 논문에서는 특고압 선로에서 고장전류가 최대인 조건으로 고장점 저항을 0 Ω으로 가정하고 상도체와 접지측간의 지락고장을 검토하였다. 표 1에 IEC 61936의 고장지속 시간에 따른 저압기기 상용주파 과전압의 제한치를 제시하였다. 고장지속 시간이 5초를 초과하는 경우는 중성점 비접지나 소호리액터 접지계통과 같은 긴 차단시간을 갖는 계통이고, 5초 이내는 저저항 접지된 고압계통과 같이 짧은 차단시간을 갖는 계통으로 본 연구에서는 5초 이내의 조건인 1,200 V를 검토하였다. 과전압 제한값은 모두 순시 상용주파 과전압에 대한 저압기기의 절연설계 기준과 관련이 있다.

〈표 1〉 고장지속 시간에 따른 저압설비 허용 과전압(U2)

고압계통에서 지락고장시간(초)	저압설비의 허용 상용주파 과전압(V)
> 5	$U_o + 250$
≤ 5	$U_o + 1,200$
중성선 도체가 없는 계통에서 $U_o$ 는 선간전압을 말한다.	

##### 2.2 지락고장시 중성선 전위상승 (Vn)

본 절에서는 국내 배전계통의 일반화된 선로를 구성하고, 지락고장시의 등가회로를 이용하여 다중접지된 중성선의 합성임피던스를 계산하였다. 그림 2에서와 같이 지락고장시 중성선 전위상승은 고장전류와 고장점에서 본 테브난 임피던스로 표현되며, 상도체와 가공지선 및 중성선의 상호임피던스에 의한 차폐계수를 반영하여 계산할 수 있다[3].



〈그림 2〉 고저압 혼촉시 개념도 및 테브난 등가회로

고장점에서 테브난 임피던스( $Z_{th}$ )는 식 (1)과 같이 정리되며,

$$Z_{th} = Z_n + (R_{ave} // Z_m) \Rightarrow \frac{Z_n + \sqrt{Z_n^2 + 4Z_n R_{ave}}}{2} \quad (1)$$

여기서,  $Z_n$ 는 가공중성선 1경간(50 m) 당 자체임피던스이고,  $R_{ave}$ 는 전주 개별접지저항값의 평균값이다. 중성선 전체의 합성임피던스  $Z_N$  ()는 식 (2)로 표현된다.  $R$ 은 고장점의 전주접지저항이다.

$$Z_N = R // \frac{Z_m}{2} \quad (2)$$

고장전류에 의한 중성선의 전위상승( $V_n$ )을 계산하기 위해서는 고장전류의 분류 특성을 분석하여야 한다. 테브난 등가회로에서 고장전류는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$I_{고장} = I_{중성선} + I_{접지선} = (1 - K) \times I_{고장} + K \times I_{고장} \quad (3)$$

여기서,  $K$ 는 중성선 및 가공지선에 의한 상호임피던스( $Z_m$ )와 자체임

피턴스( $Z_m$ )에 의한 차폐계수( $K=1-\frac{Z_m}{Z_n}$ )이다.

따라서, 지락고장시 중성선 전위는 식 (4)로 정리된다.

$$V_N = R \times I_{\text{접지선}} = Z_N \times K \times I_{\text{고장}} \quad [V] \quad (3)$$

### 2.3 중성선 다중접지 가공선로 모델

앞 절의 계산식의 유효성을 검토하기 위하여 EMTP를 통한 가공배전선로를 모델링하였다. 표 2에 모의를 위한 선로정수 및 표준장주에 의한 가공지선, 가공선, 중성선의 기하학적 위치와 변전소 접지저항값 및 전주접지저항값, 평균 접지저항값을 제시하였다. 평균 접지저항값은 선로양단의 변전소 접지저항을 반영하여 계산하였다.

<표 2> EMTP Modeling Parameters

구분	EMTP Value	비고
상도체(ACSR 160 mm <sup>2</sup> )	0.0121+j0.0444 [Ω]	표준경간 : 50 M
중성선(ACSR 95 mm <sup>2</sup> )	0.0186+j0.0432 [Ω]	
상도체 높이	13.3 [m]	상도체 상호간격 : 1.14 m, 0.56 m 적용
중성선 높이	12.1 [m]	
가공지선 높이	14.8 [m]	
전원단 임피턴스	0.055+j2.145 [Ω]	
변전소 접지저항	1 [Ω]	
전주접지저항	일반 : 100, 기기 : 25 [Ω]	
평균접지저항	32.3 [Ω/km]	도심지 기준

선로모델은 가공선로, 가공과 지중선로 혼재, 지중인출과 가공선로 혼재의 조건을 반영할 수 있도록 하였으며, 지중선로는 CNCV 325 mm<sup>2</sup>를 가정하여 구성하였다.

### 2.4 전위상승 비교

표 3은 가공선로 10 km에 대하여 2.2절의 계산식에 의한 전위상승과 2.3절의 EMTP 모델의 모의결과를 비교하였다. 고장전류는 EMTP 모의에 의해 도출되었으며 차폐계수(K) 및 합성임피턴스( $Z_N$ )는 표 2의 정수를 이용하여 계산한 결과이다.

<표 3> 계산식과 EMTP에 의한 중성선 전위상승 결과

고장 위치 [km]	고장 전류 [A]	K	$Z_N$ [Ω]	계산 결과	모의 결과	오차 [V]
				$V_N$ [V]	$V_N$ [V]	
1	4,531	0.53	0.6	1483	994	489
2	3,652			1196	1,180	16
3	3,075			1007	1,124	-117
4	2,656			869	1,006	-137
5	2,335			764	888	-124
6	2,081			681	786	-105
7	1,875			614	698	-84
8	1,706			558	614	-56
9	1,567			513	518	-5
10	1,455			476	466	10

앞서 언급한바와 같이 고장점 저항을 0로 가정하여 고장전류가 최대인 경우를 검토하였다. 계산식에 의한 중성선 합성임피턴스는 선로공장 3 km 이상에서 수렴하는 특성을 갖는다. 그 이유는 중성선 1경간당 임피턴스의 크기가 전주의 개별 접지저항값의 합성치의 크기와 관련이 있는 것으로 예상된다. 따라서, 계산식에 의한 검토는 최소 60경간 이상에서 고장을 검토할 때 간략하게 활용될 수 있다. 계산결과와 EMTP 모의결과와의 차이가 평균 80 V로써 전원단 임피턴스 및 변전소 접지저항값을 근사화하고, 계산식에서 평균 접지저항값을 대입한 오차를 반영한 다면 간략화된 계산식으로 중성선 전위상승의 예측이 가능할 것으로 판단된다. 참고로, 고장점 저항을 10 Ω으로 가정하여 EMTP를 모의하면 선로공장 2 km 지점에서 고장전류는 1,152 A일 때 중성점 전위는 372 V로 고장점 저항을 0 Ω으로 가정했을 때 보다 약 75% 감소되는 것으로 평가되었다. 배전선로의 상도체는 절연전선이기 때문에 실제 단선 또는 고지압 혼촉 고장일 경우 도체가 용융되면서 피복 내부로 위치하게 되어 반드시 고장점 저항이 존재하게 된다. 따라서, 실제 배전선로의 중성점 전위상승은 매우 낮을 것으로 예상할 수 있다.

### 2.5 1선 지락고장시 중성선 전위상승 실증시험

실증시험을 위해서 고장 KEPCO PT Center의 배전시험선로를

EMTP를 이용하여 모델링하고 모의시험을 실시하였다. 모의선로는 총 공장 17 km (지중 2 km, 가공 14.5 km, 지중 0.74 km)로 선종은 가공 ACSR/AW-OC 160 mm<sup>2</sup> 및 AL 95 mm<sup>2</sup>이고, 지중은 CNCV 325 mm<sup>2</sup>로 구성하였다. 공장 14 km 지점에서 지락고장이 발생할 경우 고장전류의 크기는 약 160 ~ 180 A로 계산되어 EMTP 모의시 고장전류는 200 A로 하였으며, 접지저항은 표 2의 값을 활용하였다.

<표 4> 시험선로 중성선 전위상승 예측

고장 위치 [km]	고장 전류 [A]	K	$Z_N$ [Ω]	계산 결과	모의 결과	오차 [V]
				$V_N$ [V]	$V_N$ [V]	
1	200	0.53	0.6	65	84	19

표 4는 실증시험전 계산식과 EMTP 모의를 통해 예상되는 고장전류와 중성점 전위상승을 검토한 결과이다. 그림 3과 같이 사전에 검토된 시험선로에서 실증시험을 수행하였다. 인공고장발생장치를 이용하여 상도체 1상과 중성선을 케이블로 연결하고 시험선로의 전원을 인가한 후 고장을 발생시키고, 고장점 인근 전주에서 전압 및 전류를 측정하였다.



(a) 인공고장발생 시험 (b) 중성선 전위측정

<그림 3> 인공고장 시험 및 측정

시험선로의 구성 및 인공고장발생장치의 이동 등에 제약이 있어 다양한 경우의 시험은 실시하지 못하였다. 대신에 고장점 인근 전주를 수용가 인입 전주로 가정하고 접지저항( $R_g$ )을 변화시켜 중성선 전위상승의 영향을 분석하였다.

<표 5> EMTP와 실증시험 결과

고장 위치 [km]	고장 전류 [A]	$R_g$ [Ω]	EMTP	실증시험	오차 [V]
			$V_N$ [V]	$V_N$ [V]	
14	200	15	84.1	74	10.1
		94	87.4	75	12.4
		187	87.7	75	12.3

표 5에 EMTP에 의한 모의결과 및 실증시험 결과를 제시하였다. 지락고장 발생지점의 개별 접지저항이 증가하여도 중성선 전위는 크게 변화되지 않았으며 모의시험 및 실증시험 결과가 일치하였다. 중성선 전위상승 측정결과를 토대로 실증시험선로의 합성저항을 계산해 보면 중성선 전체의 합성임피턴스가 0.7 Ω 수준으로 일반적인 선로의 합성값과 유사하였으며 합성값이 매우 작아서 고장점 인근에 설치된 개별 접지저항값의 영향은 없는 것으로 분석되었다.

## 3. 결 론

1선 지락고장시 중성선에 발생될 수 있는 전위상승의 효과를 계산식, EMTP 모의 및 실증시험을 통하여 검증하였다. 수용가 인근의 배전선로의 중성선 전위상승은 저압기에 전도되어 기기의 절연을 파괴시킬 수 있기 때문에 국제기준 및 국내 기준에 만족하는 배전계통 접지의 수준을 검토하였다. 검토결과 현행 기준으로 운영하여도 충분히 전위상승 제한값 이내를 만족하므로 오히려 현 접지수준을 상향하여 운영하여도 가능할 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 대한전기협회, “전기설비기술기준 근거조사”, 2007
- [2] 김한수와 2인, “22.9 kV-Y 계통에서 지락고장이 인체 및 저압설비의 안전에 미치는 영향”, 조명전기설비논문지, Vol.22, No.1, pp.141~148, 2008
- [3] 최선규의 4인, “다중접지 배전계통에서 인체안전을 고려한 위험전압 검토”, 전기학회학술대회논문집, 2010