

# 154 kV 변전소 주변압기의 용량 및 운전조건이 22.9 kV 배전계통의 고장전류에 미치는 영향

論 文  
57P-3-17

## An Investigation on the Fault Currents in 22.9 kV Distribution System Due to the Increased Capacity and Operating Conditions of Power Transformers in 154 kV Substation

趙成洙<sup>†</sup>·韓相玉<sup>\*</sup>  
(Seong-Soo Cho · Sang-Ok Han)

**Abstract** - In order to evaluate the nominal rating of breakers in distribution system due to the increased capacity and operating conditions of power transformers in 154 kV substation, the fault currents in distribution system were calculated by the conventional method and simulations of PSCAD/EMTDC program. Consequently, under the condition of the parallel operation of transformers, the fault currents exceed the nominal current of the breakers in some areas. Without NGR at the secondary neutral of the transformer, the current of single line-to-ground fault was bigger than that of 3-phase fault. Therefore, the results clearly show that the measures to limit the fault currents in distribution system are needed when the increased capacity of power transformers is introduced into 154 kV substation.

**Key Words** : Power Transformer, NGR, Nominal Interruption Current, Fault Currents

### 1. 서 론

대도시를 중심으로 한 부하밀도의 증가와 분산전원 보급의 확대에 따라 배전설비를 이용하는 고객의 설비용량이 지속적으로 증가하고 있다. 또한 경제적인 이유와 관리의 용이함 때문에 대용량 고객들은 송전전압인 154 kV이상의 전압보다는 배전전압인 22.9 kV로 공급받길 희망한다. 따라서 한전은 이러한 사회적 요구를 반영하여 최근 배전전압으로 40 MW까지 배전설비를 이용할 수 있도록 규정을 개정하였다. 대용량 배전고객의 증가는 필연적으로 변전소의 공급능력 증대를 요구하게 되며 특히 도심지에 새로운 변전소의 건설이 어려움에 직면하고 있는 현 상황에서 변전소 주변압기의 용량증설이 가장 효과적인 대안으로 제시되었다.

주변압기의 용량증가는 공간적으로 제한된 변전소의 공급능력을 강화함으로써 경제적인 이점을 피할 수 있으나 주변압기 고장시 정전고객의 수가 증가하고 변전소 주변의 인출배전선로가 늘어나며 주변압기 %임피던스에 따라 배전계통의 고장전류가 차단기의 정격전류 용량을 초과할 가능성이 있다. 더욱이 주변압기의 고장에 대처하거나 정비를 위해 2대의 주변압기를 병렬운전하는 조건에서는 고장전류의 크기는 더 커지게 되므로 이에 대한 검토가 필요하다. 현재 154 kV 변전소에서 주로 사용하고 있는 주변압기의 용량은 60

MVA의 3권선 변압기로서 1-2차간 %임피던스는 60 MVA 기준으로 20%이다[1][2]. 신설되는 주변압기와 병렬운전이 가능하려면 용량이 증가된 주변압기의 %임피던스를 기존 60 MVA 주변압기와 동일하게 선정해야 하며 고장전류의 증가를 피할 수 없게 된다.

본 논문에서는 향후 도입될 주변압기 용량을 80, 100 MVA로 가정하여 단독운전과 병렬운전 조건에서 배전계통의 고장전류를 검토하였다. 또한 배전계통의 지락고장전류를 제한할 목적으로 설치된 NGR(Neutral Grounding Reactor; 중성점 접지리액터)[11]의 설치유무에 따른 1선 지락고장전류의 크기를 검토하였다. 고장전류는 가공배전선로와 지중배전선로로 구분하여 3상 단락고장 및 1선 지락고장 전류를 계산하였으며 계산된 고장전류를 기준으로 배전계통의 각종 차단기의 정격차단전류 초과유무를 검토하였다. 한편 주변압기 1차측 중성점을 직접접지하여 운전하는 경우와 비접지로 운전하는 경우에 1선 지락고장 전류의 차이점을 알아보기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 정상상태 대칭전류의 실효값을 기준으로 비교하여 보았다. 고장전류 계산을 위한 각종 파라미터는 실무에서 사용되는 값을 조사하여 사용하였으며 전원측 임피던스는 부하밀도가 높은 서울지역의 변전소를 기준으로 한 데이터를 사용하였다.

### 2. 고장전류 파라미터

배전계통의 고장전류를 계산하기 위해서는 해석하고자 하는 계통의 전원측 임피던스, 주변압기 임피던스, 배전선로 임피던스에 대한 기초 자료의 확보가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 배전계통 해석에 관심있는 연구자 및 산업계 실

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員  
E-mail: onlycho@kepri.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 忠南大學校 電氣工學科 教授 · 工博  
接受日字 : 2008年 7月 21日  
最終完了 : 2008年 8月 14日

무자를 위해 조사된 기본적인 임피던스 자료부터 상세하게 제시하였다.

먼저 송전계통과 배전계통을 연결하는 154 kV 변전소를 이해하는 것이 필요하므로 간략히 설명하고자 한다. 그림 1은 일반적인 154 kV 변전소의 단선도를 보여주고 있다. 154 kV 변전소의 주변압기는 Y-Y 결선의 단점을 보완하기 위해 Y-Y-D 결선의 3권선 변압기를 사용하고 있다. 3차권선은 제3고조파를 제거할 목적으로 델타로 결선되어 있으며 부하를 연결하지 않는 경우 안정권선이라고도 불린다. 주변압기 1차측은 Y결선을 사용하며 송전계통의 고장전류를 줄일 목적으로 대부분 비접지로 운전하고 있다. 주변압기 2차측은 배전계통의 지락고장전류를 제한할 목적으로 NGR을 사용하고 있다.

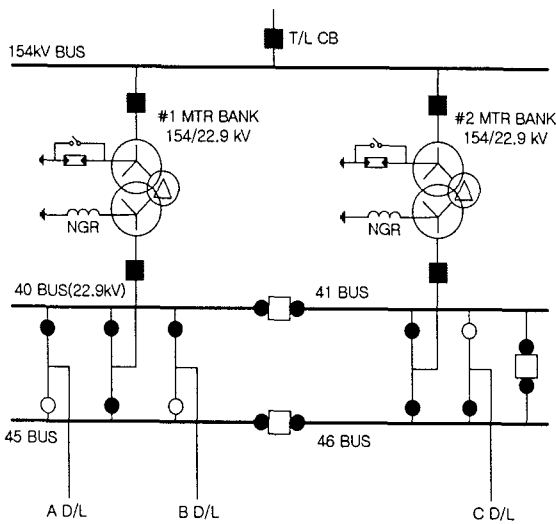


그림 1 154 kV 변전소 단선도[4]  
Fig. 1 Schematic diagram of 154 kV substation

2.1 전원측 임피던스

서울지역 변전소의 전원측 임피던스를 조사한 결과 그림 2와 그림 3과 같은 분포를 보여주고 있었다. 표 1은 100 MVA으로 환산한 %임피던스를 정상분과 영상분으로 나누어 각각 최대, 최소, 평균값으로 정리하였다. 전원측 임피던스가 고장전류에 큰 영향을 주는 것은 아니지만 변전소별로 그 값이 크게 달라질 수 있으므로 세밀한 계산을 위해서는 해당 변전소의 전원측 임피던스를 정확히 조사할 필요가 있음을 알 수 있다.

표 1 전원측 %임피던스 (100 MVA기준)[4]  
Table 1 Source %Impedance (100 MVA base)

구분	정상분			영상분		
	%Rs1	%Xs1	%Zs1	%Rs0	%Xs0	%Zs0
최대	0.83	5.744	5.804	2.793	15.018	15.276
최소	0.005	0.673	0.673	0.052	0.566	0.568
평균	0.151	1.561	1.568	0.585	2.860	2.919

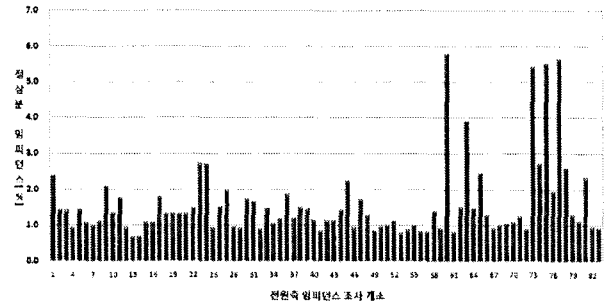


그림 2 전원측 정상분 임피던스 분포(100 MVA기준)[4]  
Fig. 2 A distribution chart of the positive-sequence impedance for sources (100 MVA base)

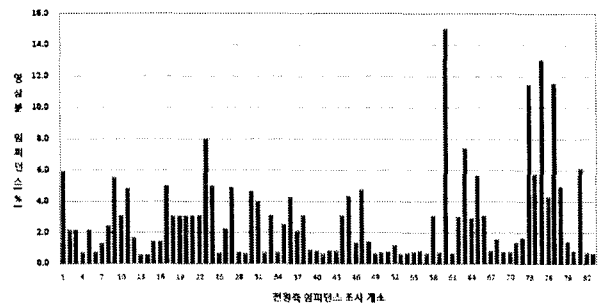


그림 3 전원측 영상분 임피던스 분포(100 MVA기준)[4]  
Fig. 3 A distribution chart of the zero-sequence impedance for sources (100 MVA base)

2.2 주변압기 임피던스

154 kV 변전소에서 사용되고 있는 주변압기는 주로 3권선 변압기로서 규격은 표 2와 같다[1]. 3상 변압기 또는 단상 변압기 3대로 1 Bank를 구성하고 있으며 한 변전소는 일반적으로 4 Bank로 구성되어 있다. 3차권선에는 부하를 연결하지 않고 안정권선만을 둔다. 안정권선의 용량은 일반적으로 주권선 용량의 1/3이하로 한다. 1차 및 2차 결선이 Y-Y 결선일 경우 철심의 비선형 특성 때문에 기수고조파를 포함한 왜형의 전압, 전류가 흐르게 되고 이 고조파 성분은 인접 통신선의 유도장해, 2차측 중성점을 접지한 경우 직렬 공진에 의한 이상전압 및 제3고조파 영상전압에 의한 중성점의 전위이동과 같은 현상을 유발시킨다. 이러한 현상을 제거하기 위해 D결선의 3차권선을 설치하여 고조파 중 가장 큰 제 3고조파의 전압, 전류를 억제하고 있다[2][3].

표 2 주변압기 표준규격[1]  
Table 2 Specification of power transformer

정격전압[kV]			정격용량[MVA]				%Imp (%Z <sub>HM</sub> )	결선		
1차	2차	3차	유입자냉식	유입풍냉식	송유풍냉식	송유수냉식		1차	2차	3차
154	23	6.6	45	60	60	60	20	Y	Y	D
154/√3	23/√3	6.6	15×3	20×3	20×3	20×3	20	Y	Y	D

표 2의 임피던스는 1차와 2차간의 %임피던스(%Z<sub>HM</sub>)를 말하며 %Z<sub>ML</sub>, %Z<sub>HL</sub>은 제작사에 일임하여 변압기 제작사 경제적인 설계가 가능하도록 하는 것이 일반적이다. 대표적인 권선간 %임피던스는 표 3에 제시하였으며 기본적으로 제작사에서 변압기를 납품할 때 각각의 특성값을 제공하게 되어 있다. 이 데이터는 변압기 특성시험을 통해 얻어지며 정상분 및 영상분 임피던스를 계산하는데 기초자료가 된다. 대표값을 사용하는 이유는 이 값들은 권선과 코어의 기하학적 구조에 관련되어 있어 동일한 변압기라도 미소한 값의 차이를 보여주고 있으며 그 차이는 계산결과에 거의 영향을 주지 않기 때문이다. 표 3에는 본 논문에서 검토예정인 80 MVA와 100 MVA 변압기의 자료도 함께 제시했으며 1-2차간 %임피던스는 기존 변압기와의 병렬운전을 고려하여 20%로 선정했다. 동일한 방식으로 2-3차 간 %임피던스, 3-1차 간 %임피던스도 동일한 비율의 %임피던스를 적용하였다. 변압기 교체, 고장, 경제성의 이유 등으로 2대 이상의 변압기를 병렬로 운전하며 이때 각 변압기의 %임피던스가 같지 않으면 부하분담이 용량에 비례하여 분담되지 않기 때문에 %임피던스가 낮은 쪽이 과부하가 되어 소손될 우려가 있다[2]. 그러므로 부하분담(이용률)을 동일하게 하려면 병렬 운전하는 변압기의 %임피던스가 동일해야 한다.

표 3 검토대상 주변압기의 %임피던스 데이터  
Table 3 %Impedance of the selected power transformer

정격 용량 (MVA)	권선 관계	%Imp 표기	기준 용량 %Imp		100 MVA 환산		비고
			MVA	%Z <sub>TR</sub>	MTR	NGR <sup>1)</sup>	
					%Z <sub>TR</sub>	%Z <sub>NGR</sub>	
60	1차-2차	%Z <sub>HM</sub>	60	20.0	33.3	11.441	실제 대표 값
	2차-3차	%Z <sub>ML</sub>	20	3.0	15.0		
	3차-1차	%Z <sub>HL</sub>	20	10.0	50.0		
80	1차-2차	%Z <sub>HM</sub>	80	20.0	25.0	11.441	추정 치
	2차-3차	%Z <sub>ML</sub>	27	3.0	11.1		
	3차-1차	%Z <sub>HL</sub>	27	10.0	37.0		
100	1차-2차	%Z <sub>HM</sub>	100	20.0	20.0	11.441	추정 치
	2차-3차	%Z <sub>ML</sub>	33	3.0	9.1		
	3차-1차	%Z <sub>HL</sub>	33	10.0	30.3		

주<sup>1)</sup>: 2차측 중성점에 사용되는 NGR은 0.6 Ω으로 100 MVA 기준 %임피던스로 환산하면 11.441%가 됨.

$$\begin{aligned} \%Z_{NGR} &= \frac{Z}{Z_{BASE}} \times 100 \\ &= \frac{ZI_N}{V_N} \times 100 = \frac{ZI_N V_N}{V_N V_N} \times 100 = \frac{ZP_N}{V_N^2} \times 100 \\ &= \frac{0.6\Omega \times 100 \text{ MVA}}{(22.9 \text{ kV})^2} \times 100 = 11.441\% \end{aligned}$$

주변압기 2차측 정상분(positive sequence) 모선임피던스는 정상분 전원측 임피던스와 변압기의 1-2차간 임피던스로 구할 수 있다. 그림 4의 주변압기 정상분 등가회로를 참고하여 다음 수식과 같이 계산할 수 있으며, 표 1과 표 3의 데이터를 이용하여 표 4와 같이 100 MVA를 기준으로 한 정상분 모선임피던스를 정리하였다.

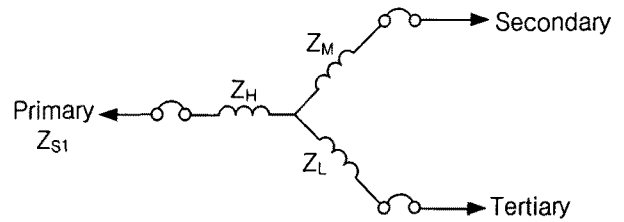


그림 4 3권선 Y-Y-D 결선의 주변압기 정상분 등가회로도  
Fig. 4 Positive-sequence equivalent circuit for three winding and Y-Y-D wiring power transformer

$$\begin{aligned} Z_{B1} &= Z_{S1} + Z_{TR1} \\ Z_{TR1} &= Z_H + Z_M = Z_{HM} \\ Z_{HM}: & \text{1차 - 2차 권선간 \%임피던스} \\ Z_{B1}: & \text{정상분 모선임피던스} \\ Z_{TR1}: & \text{정상분 변압기임피던스} \end{aligned} \quad (1)$$

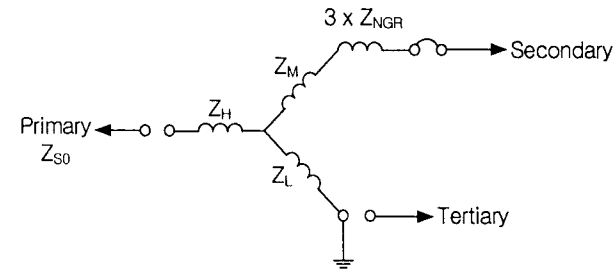
표 4 정상분 모선 임피던스 (100 MVA기준)  
Table 4 Positive sequence Impedance for bus bars in 154 kV substation (100 MVA base)

구분	전원측 임피던스			주변압기 임피던스		모선임피던스		
	%R	%X	%Z <sub>S1</sub>	MVA	%Z <sub>HM</sub>	%R	%X	%Z <sub>B1</sub>
최소	0.005	0.673	0.673	60	33.333	0.005	34.006	34.006
				80	25.000	0.005	25.673	25.673
				100	20.000	0.005	20.673	20.673
최대	0.83	5.744	5.804	60	33.333	0.83	39.077	39.086
				80	25.000	0.83	30.744	30.755
				100	20.000	0.83	25.744	25.757

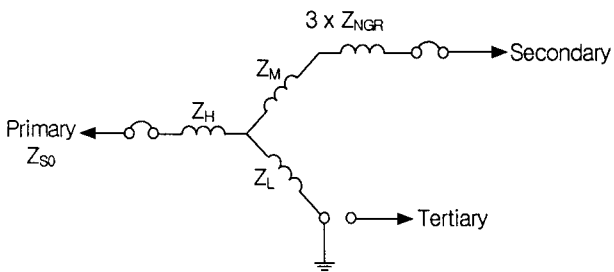
주변압기 1차측을 접지운전하는 경우와 비접지로 운전하는 경우 영상분(zero sequence) 등가회로가 그림 5와 같이 다르게 표현된다. 현재 대부분의 주변압기 1차측을 비접지로 운전하므로 본 논문에서는 이 경우를 기준으로 해서 고장전류를 계산했다. 하지만 개별적으로 1차측이 접지된 주변압기의 고장전류를 검토하는 경우도 있으므로 임피던스 계산방법을 간단히 소개하였다. 영상분 임피던스를 계산할 때, 특히 주의해야 할 점은 NGR 임피던스를 고려해야 한다는 것이다.

Y-Yg-D 결선방식의 영상분 임피던스는 다음과 같은 수식으로 계산할 수 있다. 그림 5 (a)에서 볼 수 있듯이 주변압기 1차측이 비접지가 되어 전원측 임피던스는 영상분 임피던스회로에 기여하지 않음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{B0} &= Z_{TR0} + 3 \times Z_{NGR} \\ Z_{TR0} &= Z_M + Z_L = Z_{ML} \\ Z_{ML}: & \text{2차 - 3차 권선간 \%임피던스} \\ Z_{B0}: & \text{영상분 모선 \%임피던스} \\ Z_{TR0}: & \text{영상분 변압기 \%임피던스} \end{aligned} \quad (2)$$



(a) Y-Yg-D 결선



(b) Yg-Yg-D 결선

그림 5 3권선 Y-Y-D 결선의 주변압기 영상분 등가회로도  
Fig. 5 Zero-sequence equivalent circuit for three winding and Y-Y-D wiring power transformer

- (a) Y-Yg-D wiring
- (b) Yg-Yg-D wiring

표 5 영상분 모선 임피던스 (100 MVA기준, Y-Yg-D 결선)  
Table 5 Zero sequence Impedance for bus bars in 154 kV substation (100 MVA base, Y-Yg-D wiring)

주변압기 임피던스		NGR 임피던스	모선 임피던스
MVA	%Z <sub>ML</sub>	%Z <sub>NGR</sub> × 3	%Z <sub>B0</sub>
60	15.000	34.323	49.323
80	11.111	34.323	45.434
100	9.091	34.323	43.414

Yg-Yg-D 결선방식은 그림 5 (b)에서 볼 수 있듯이 주변압기 1차측이 접지가 되므로 전원측 영상임피던스가 1차 권선 임피던스와 직렬, 3차권선 임피던스와 병렬관계에 놓이게 된다. 이 방식의 영상분 임피던스는 다음 수식에 의해 계산할 수 있다[5][6].

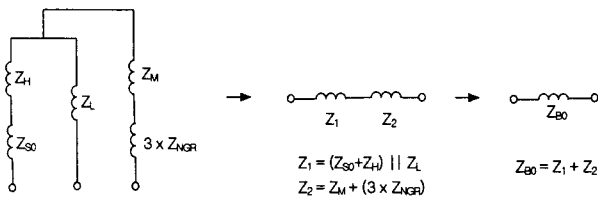


그림 6 Yg-Yg-D 영상분 등가회로 간략화

Fig. 6 Simplified diagram for the Yg-Yg-D wired zero-sequence equivalent circuit

$$Z_H = -\frac{1}{2}(Z_{HM} + Z_{HL} - Z_{ML})$$

$$Z_M = -\frac{1}{2}(Z_{ML} + Z_{HM} - Z_{HL})$$

$$Z_L = -\frac{1}{2}(Z_{HL} + Z_{ML} - Z_{HM})$$

$$Z_{B0} = [(Z_{s0} + Z_H) || Z_L] + [Z_M + (3 \times Z_{NGR})]$$

$Z_H$ : 1차권선 %임피던스  
 $Z_M$ : 2차권선 %임피던스  
 $Z_L$ : 3차권선 %임피던스

$Z_{HM}$ : 1-2차간 권선 %임피던스  
 $Z_{ML}$ : 2-3차간 권선 %임피던스  
 $Z_{HL}$ : 1-3차간 권선 %임피던스

$Z_{B0}$ : 영상분 모선 %임피던스  
 $Z_{s0}$ : 영상분 전원측 %임피던스  
 $Z_{NGR}$ : NGR %임피던스

표 6 영상분 모선 임피던스 (100 MVA기준, Yg-Yg-D 결선)  
Table 6 Zero sequence Impedance for bus bars in 154 kV substation (100 MVA base, Yg-Yg-D wiring)

구분	전원측 %Z <sub>s0</sub>	주변압기 임피던스			NGR %Z <sub>NGR</sub> × 3	(%Z <sub>s0</sub> + %Z <sub>H</sub> )    %Z <sub>L</sub>	%Z <sub>M</sub> × 3	모선 임피던스 %Z <sub>B0</sub>
		MVA	%Z <sub>H</sub>	%Z <sub>L</sub>				
최소	0.568	60	34.167	15.834	-0.834	34.323		10.876
		80	25.463	11.574	-0.463			8.012
		100	20.606	9.697	-0.606			6.651
최대	15.276	60	34.167	15.834	-0.834	34.323		11.993
		80	25.463	11.574	-0.463			9.013
		100	20.606	9.697	-0.606			7.634

### 2.3 배전선로 임피던스

가공배전선의 전력선은 주로 알루미늄 피복 강심알루미늄 절연전선(ACSR/AWOC)을 사용하고 중성선은 알루미늄 나선을 사용하며 가공지선은 아연도 강연선을 사용한다. 가공배전선로의 임피던스는 2005년 전력연구원에서 EMTP의 Line constants 루틴을 이용하여 산정된 임피던스 데이터를 사용하였으며 대표규격의 선종에 해당하는 정상분 및 영상분 임피던스를 표 7에 나타내었다. 계산조건은 16 m 전주에 보통장주(그림 7 참조) 가설조건이며 대지고유저항은 200 Ωm를 적용하였다. km당 임피던스 데이터이므로 선로길이에 맞게 사용하면 된다.

표 7 가공배전선로 임피던스 (100 MVA기준)  
Table 7 Overhead line impedance (100 MVA base)

전력선	중성선	가공지선	정상분(%Z/km)			영상분(%Z/km)		
			%R	%X	%Z <sub>L1</sub>	%R	%X	%Z <sub>L0</sub>
ACSR/AWOC 160mm <sup>2</sup>	AL 95mm <sup>2</sup>	FS 22mm <sup>2</sup>	3.4999	7.7498	8.5035	9.1004	22.8411	24.5873

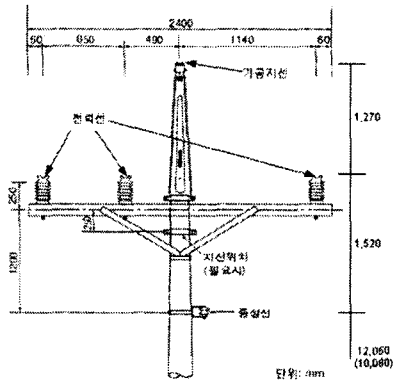


그림 7 가공배전선로의 보통장주 형태 및 규격  
Fig. 7 Type and size of selected overhead line facility

지중배전선로는 동심중성선 전력케이블을 주로 사용하고 있으며 배전설계기준에 제시된 임피던스 데이터를 사용하였다. 특히 영상분 임피던스가 가공배전선로에 비해 작음을 알 수 있으며 이로 인해 동일한 선로길이에서는 지중배전선로의 1선지락 고장전류가 상대적으로 가공배전선로보다 크울 쉽게 예상할 수 있다.

표 8 지중배전선로 임피던스 (100 MVA기준)  
Table 8 Underground line impedance (100 MVA base)

전력케이블	정상분(%Z/km)			영상분(%Z/km)		
	%R	%X	%Z <sub>L1</sub>	%R	%X	%Z <sub>L0</sub>
CNCV 325mm <sup>2</sup>	1.7906	2.8451	3.362	5.3222	1.7353	5.598

2.4 배전선로 개폐장치 정격

국내 22.9 kV 배전선로에 주로 사용되는 개폐장치의 규격을 표 9에 정리하였다. 차단기와 개폐기에 공통적으로 적용할 수 있는 고장전류의 크기가 12.5 kA이므로 선로길이별 고장전류를 계산하여 정격차단전류를 초과하는 개소를 조사하였다. 한편 실제 차단하는 전류가 과도상태의 비대칭 전류임을 감안하면 적절한 X/R비율을 제시하고 이에 해당하는 비대칭 전류의 규격이 추가되어야 할 것으로 판단된다.

표 9 배전계통 주요 개폐장치 규격  
Table 9 Specification of breakers in distribution system

기기명	정격 전압	정격 전류 (A)	정격차단전류		정격단시간전류	
			대칭	비대칭	대칭	비대칭
폴리머 리클로저	25.8 kV	630	12.5kA	-	-	-
다회로 차단기		600	12.5kA	-	12.5kA, 1초	19.2kA, 10cycle
부하개폐기 (가공)		630	-	-	12.5kA, 1초	-
부하개폐기 (지중)		600	-	-	12.5kA, 1초	-

3. 배전계통 고장전류 해석

주변압기의 용량증설과 %임피던스 설정에 따라 배전계통에 미치는 영향을 평가하기 위해 표 10과 같이 8가지 사례로 분류하여 가공배전선로 및 지중배전선로에서 고장전류를 계산하였다. 배전계통의 최대 고장전류만을 고려하기 위해 조사된 모선 임피던스 데이터 중 최소값을 적용하여 고장전류를 계산하였다. 고장전류의 크기는 변전소 부근에서 가장 크므로 배전선로의 길이는 약 5 km로 제한하여 적용하였으며 서로 다른 용량의 주변압기를 병렬운전하는 사례는 기존의 60 MVA 변압기와 조합되는 경우만을 고려하였다. Case VIII의 %임피던스가 Case V와 동일하므로 고장전류 계산결과도 동일하게 된다. 따라서 Case VIII의 계산결과는 생략하였다.

표 10 고장전류 해석조건

Table 10 Analysis conditions for the fault currents in distribution system

검토 사례	주변압기 용량 (MVA)	%임피던스 [%]	100MVA기준 %임피던스 [%]	NGR [Ω]	비고
Case I	60	20	33.333	0.6	단독운전
Case II	80	20	25.000	0.6	
Case III	100	20	20.000	0.6	
Case IV	60+60	20  20	16.667	0.6	병렬운전 (동일용량)
Case V	80+80	20  20	12.500	0.6	
Case VI	100+100	20  20	10.000	0.6	
Case VII	60+80	20  20	14.286	0.6	병렬운전 (다른용량)
Case VIII	60+100	20  20	12.500	0.6	

3.1 3상 단락고장

가공배전선로에서 3상 단락고장에 의한 고장전류 계산결과를 그림 8에 나타내었다.

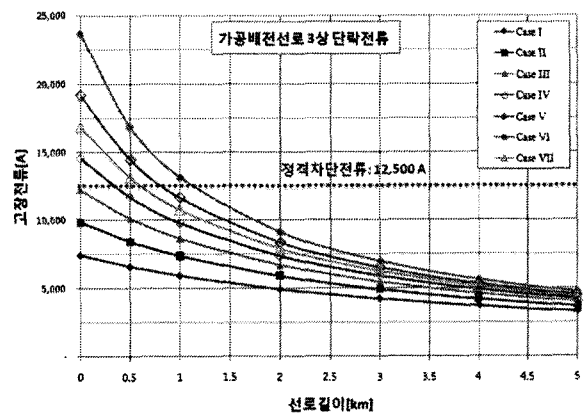


그림 8 가공배전선로에서의 3상 단락 고장전류 분포  
Fig. 8 Profile of 3-phase fault currents in overhead distribution line

주변압기를 단독운전 하는 경우에는 주변압기 용량이 100 MVA가 되어도 고장전류가 차단기의 정격차단전류인 12.5 kA를 초과하지 않았다. 하지만 현재 사용 중인 60 MVA 주변압기 2대를 병렬운전하는 Case IV의 경우에는 변전소 인출부분에서 고장전류가 차단기의 정격차단전류를 초과하였다. 특히 100 MVA 주변압기 2대를 병렬운전하는 Case VI의 경우에는 가공배전선로 길이 약 1 km까지 고장전류가 정격차단전류를 초과하였으며 가장 큰 고장전류 값을 보여 주고 있다.

지중배전선로에서의 3상 단락고장전류를 그림 9에 나타내었다. 지중배전선로의 선로입피턴스가 가공배전선로의 선로입피턴스보다 작기 때문에 전체적으로 고장전류의 크기가 커짐을 알 수 있다. 가공배전선로의 경우와 마찬가지로 각 주변압기의 단독운전 조건에서는 고장전류가 정격차단 전류를 초과하지 않았다. 하지만 병렬운전 조건에서는 가공배전선로보다 더 넓은 영역에서 차단기의 정격차단전류를 초과하는 개소가 발생하고 있다. 특히 100 MVA 2대 병렬운전 조건(Case VI)에서는 지중배전선로 길이 약 3 km까지 고장전류가 정격차단전류를 초과하였다.

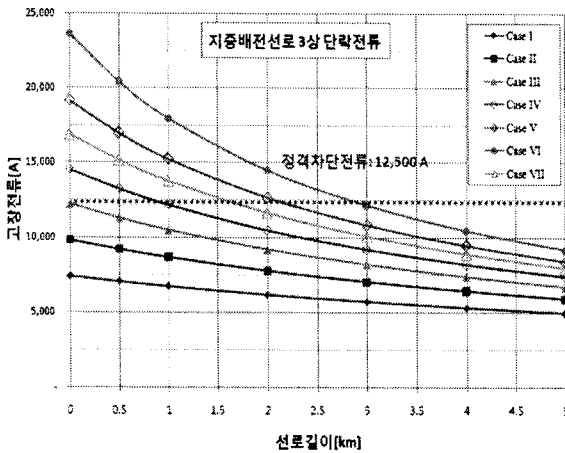


그림 9 지중배전선로에서의 3상 단락 고장전류 분포  
Fig. 9 Profile of 3-phase fault currents in underground distribution line

3.2 1선 지락고장

가공배전선로에서 고장저항을 0 Ω으로 가정하고 계산한 1선 지락전류를 그림 10에 나타내었다. 지락고장전류의 크기를 제한하기 위해 NGR을 사용한 점과 가공배전선로의 영상분 입피턴스가 큰 이유로 선로길이 0.5 km 이상인 영역에서 모든 조건의 고장전류가 정격차단전류보다 작았다. 따라서 병렬운전조건인 경우에도 변전소 인출부분을 제외하고는 정격차단전류 초과 문제는 발생하지 않는다.

지중배전선로에서의 1선 지락전류를 그림 11에 제시하였다. 지중배전선로의 경우에는 영상분 입피턴스가 가공배전선로에 비해 약 4배정도 작기 때문에 가공배전선로보다 더 넓은 영역에서 고장전류가 정격차단전류를 초과하였다. 특히 100 MVA 2대 병렬운전조건(Case VI)에서는 지중배전선로 길이 약 1.5 km까지 고장전류가 정격차단전류를 초과하였다.

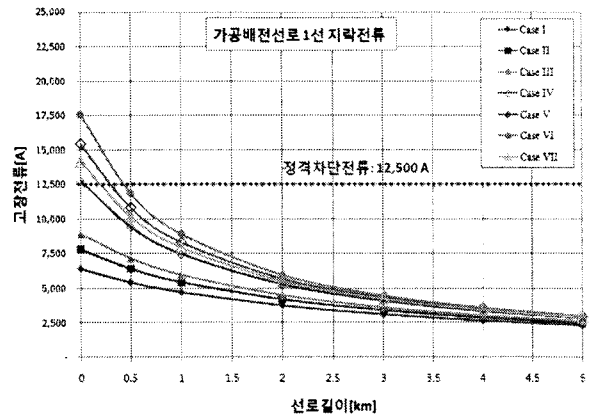


그림 10 가공배전선로에서의 1선 지락 고장전류 분포  
Fig. 10 Profile of single line-to-ground fault currents in overhead distribution line

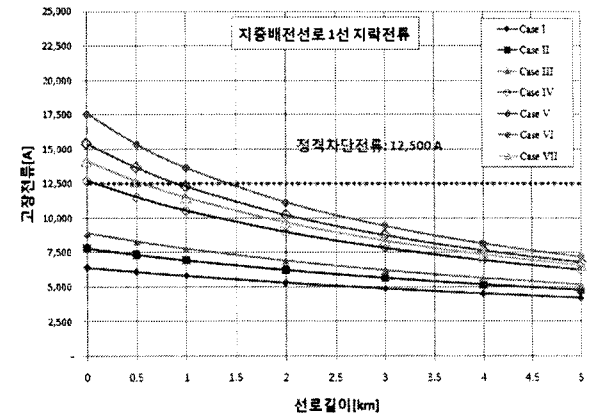


그림 11 지중배전선로에서의 1선 지락 고장전류 분포  
Fig. 11 Profile of single line-to-ground fault currents in underground distribution line

3.3 NGR이 없는 경우의 1선 지락고장

지락고장전류를 제한하기 위해 사용하는 NGR이 없는 경우를 가정하여 가공배전선로에서의 1선 지락고장전류를 그림 12에 나타내었다. 가공배전선로의 영상입피턴스가 크기 때문에 선로길이 1 km를 벗어나면 모든 조건에서 고장전류가 정격차단전류를 초과하는 개소는 없었다. 그러나 변전소 인출부분에서는 단독운전 조건(Case III)에서도 고장전류가 정격차단 전류를 초과하는 경우가 발생하였다. 최대 고장전류의 크기도 3상 단락전류(약 23,622 A) 보다 큰 29,213 A가 Case VI에서 발견되었다. 즉 NGR을 설치하지 않거나 사용할 수 없는 경우 3상 단락전류보다 1선 지락전류가 변압기에 더 큰 충격을 줄 수 있음을 알 수 있다.

지중배전선로에서 NGR이 없는 경우의 1선 지락전류를 그림 13에 제시하였다. 지중배전선로에서는 100 MVA 단독운전 조건인 Case III에서도 선로길이 약 0.7 km까지 고장전류가 정격차단전류를 초과하였으며 최대 고장전류 발생 조건인 Case VI에서는 선로길이 약 3 km까지 고장전류가 정격차단전류를 초과하였다. 3상 단락전류의 경우와 유사한

경향을 보여주고 있으나 변전소 인출부분의 고장전류는 전체적으로 3상 단락전류보다 크게 나타났다.

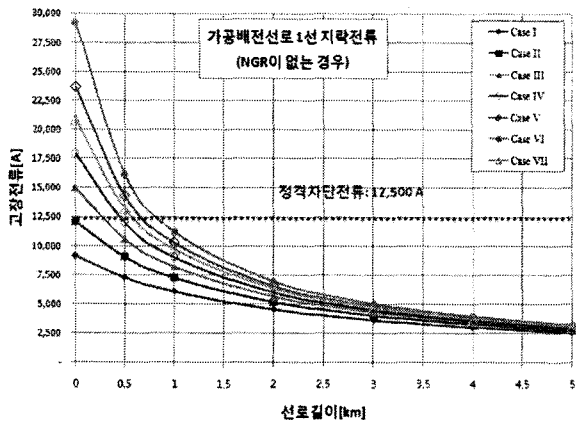


그림 12 가공배전선로에서의 1선 지락 고장전류 분포  
Fig. 12 Profile of single line-to-ground fault currents without NGR of power transformer in overhead distribution line

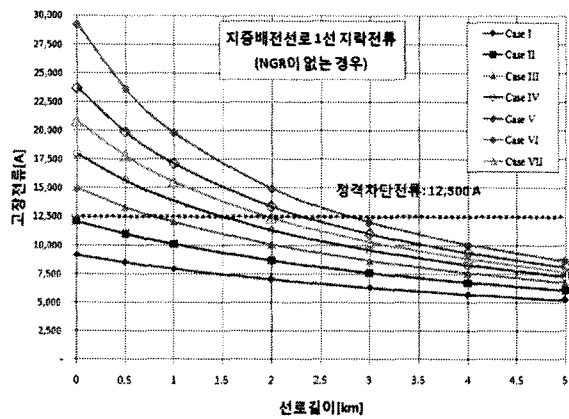


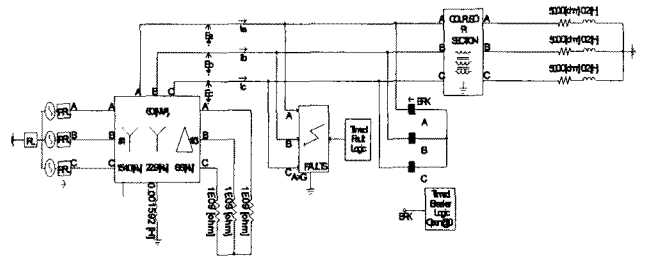
그림 13 지중배전선로에서의 1선 지락 고장전류 분포  
Fig. 13 Profile of single line-to-ground fault currents without NGR of power transformer in underground distribution line

### 3.4 주변압기 1차측 중성점 접지 유무에 따른 고장전류 해석

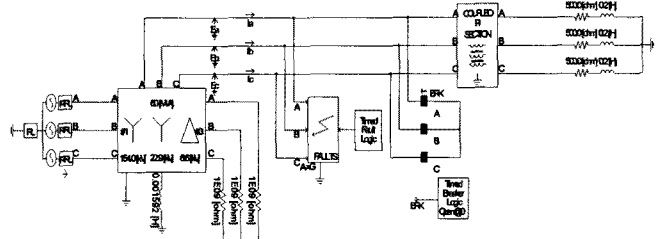
주변압기 1차측 고장전류를 제한하기 위해 대부분의 주변압기 1차측 중성점은 비접지로 운전되고 있다. 하지만 일부 주변압기의 1차측 중성점은 직접접지 운전을 하고 있기 때문에 1차측 중성점 접지유무에 따라 고장전류의 크기가 달라질 수 있다. 1차측 중성점 접지유무에 따라 영상 등가회로가 다르게 구성되므로(그림 5 참조) 그 차이점을 알아보기 위해 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 고장전류를 해석하였으며 앞서 검토한 고장전류의 크기를 정상상태 대칭전류의 실효값과 비교하여 보았다. 그림 14는 주변압기 결선방식에 따른 모델 계통도를 보여주고 있다.

3상 단락고장 전류는 주변압기 1차측 중성점 접지유무와

상관없이 동일하므로 시뮬레이션 결과를 접지유무와 구분하여 비교하지는 않았다. 고장은 0.5초에 발생하도록 세팅 했다. 정상상태 대칭전류 값을 알아보기 위해 고장 지속시간을 0.3초간(약 20cycle) 유지되도록 하였으며 고장발생을 위한 개폐기의 저항은 0.001 Ω으로 정하였다.



(a) 주변압기 Y-Yg-D 결선시 모의계통도



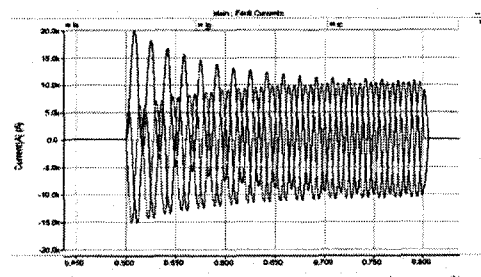
(b) 주변압기 Yg-Yg-D 결선시 모의계통도

그림 14 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 계통도

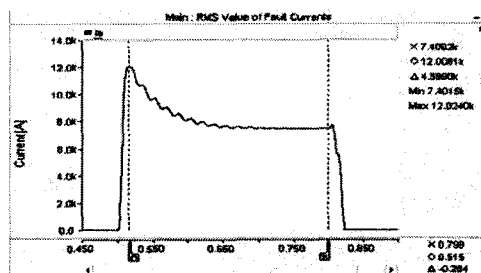
Fig. 14 Model system configuration for the simulation of PSCAD/EMTDC

(a) Y-Yg-D wiring of power transformer

(b) Yg-Yg-D wiring of power transformer



(a) 고장파형



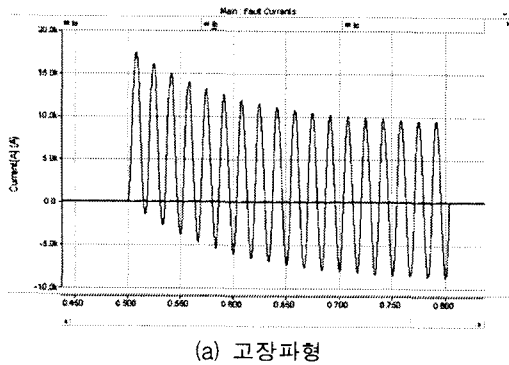
(b) 실효값

그림 15 3상 단락 고장전류 파형 및 크기

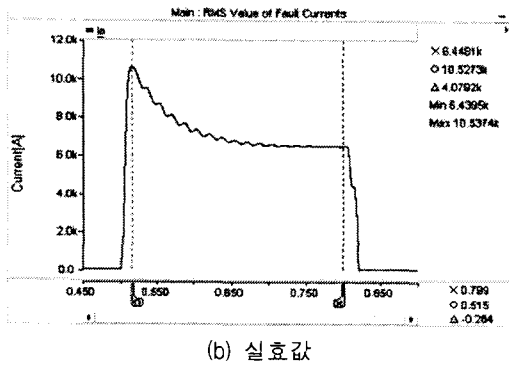
Fig. 15 Waveform(a) and RMS magnitude(b) of 3-phase fault current

시뮬레이션 결과, 거의 정상상태에 다다른 0.799초(그림 15의 RMS 그래프 X 표시 값)에서의 3상 고장전류 실효치는 7,409 A로서 수계산 결과인 7,414 A와 거의 일치하였다. 한편 과도상태 실효치 최대값은 12,008 A로서 정상상태 대칭전류 실효치보다 약 1.62배 큼을 알 수 있다.

주변압기 1차측 중성점이 비접지인 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 16에 나타내었다. 고장발생개소는 최대 고장전류가 발생하는 변전소 인출단(주변압기 2차측 단자)을 선정하였다. 3상 단락고장과 동일한 시간대인 0.799초에서의 1선지락 고장전류 실효치는 6,448 A로 수계산 검토결과인 6,446 A와 일치하였다. 과도상태 최대전류 실효치는 10,527 A로서 정상상태 실효치보다 약 1.63배 큼을 알 수 있다.



(a) 고장파형

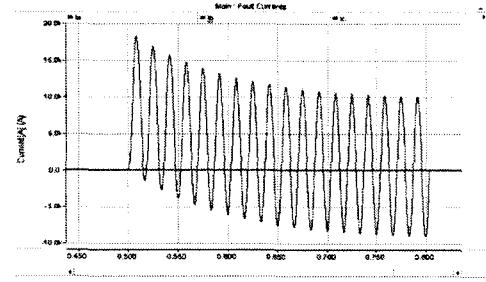


(b) 실효값

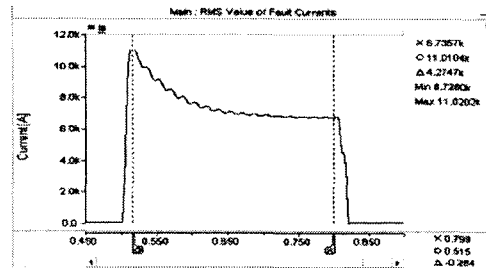
그림 16 주변압기 Y-Yg-D 결선상태에서의 1선지락 고장 전류의 파형 및 크기

Fig. 16 Waveform(a) and RMS magnitude(b) of single line-to-ground fault current when the power transformer in substation is connected by the Y-Yg-D wiring

주변압기 1차측 중성점이 접지인 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 17에 나타내었다. 0.799초에서의 고장전류 실효치는 6,735 A로서 1차측 중성점이 비접지인 경우보다 약 287 A가 크게 나타났다. 이것은 주변압기 1차측 중성점이 접지인 경우 전원측 임피던스와 변압기 1차권선 누설리액턴스의 직렬 합성임피던스가 변압기 3차권선 누설리액턴스와 병렬로 작용함으로써 전체적인 합성 임피던스가 작아지기 때문이다(그림 5 참조). 이것은 전원측 임피던스가 클수록 고장전류가 크게 나타남을 의미하게 된다. 한편, 과도상태 최대전류 실효치는 11,010 A로서 정상상태 실효치보다 약 1.63배 큼을 알 수 있다.



(a) 고장파형



(b) 실효값

그림 17 주변압기 Yg-Yg-D 결선상태에서의 1선지락 고장 전류의 파형 및 크기

Fig. 17 Waveform(a) and RMS magnitude(b) of single line-to-ground fault current when the power transformer in substation is connected by the Yg-Yg-D wiring

#### 4. 결 론

기존 154 kV 변전소의 공급능력 증대를 위한 주변압기의 용량증가, 주변압기 2차측 중성점에 사용되는 NGR 설치유무 및 주변압기 1차측 중성점 접지유무, 주변압기의 병렬운전 유무에 따라 배전계통의 고장전류를 계산하고 차단정격전류의 초과유무를 조사하였다.

3상 단락고장의 경우, 주변압기의 용량을 현재의 60 MVA에서 80 또는 100 MVA로 상향조정해도 단독운전에서는 배전기기의 정격차단전류를 초과하는 개소는 없었지만 주변압기 2대 병렬운전조건(Case IV ~ Case VIII)에서는 정격차단전류 12.5 kA를 초과하는 개소가 모두 발생 하였다. 특히 지중배전선로는 가공배전선로에 비해 선로임피던스가 작기 때문에 그 영역이 더 넓게 나타났으며 Case VI(100 MVA 2대 병렬운전조건)에서는 선로길이 3 km까지 정격차단전류를 초과하였다.

1선 지락고장의 경우, 주변압기 2차측 중성점에 NGR을 사용하기 때문에 전체적으로 고장전류가 3상 단락고장보다 작게 나타났다. 그러나 NGR이 없는 경우 변전소 인출단에서의 1선 지락전류는 모든 조건에서 3상 단락전류보다 크게 나타났으며 Case VI에서 최대 5,500 A 정도 차이가 났다. 또한 주변압기 1차측 중성점이 접지된 경우는 비접지된 경우보다 1선 지락전류가 약 287 A정도 컸으며 이것은 전원측 임피던스가 클수록 지락전류에 미치는 영향이 크게 된다.

따라서, 주변압기의 용량이 증가하면서 기존 60 MVA 주변압기와 병렬운전이 가능하도록 %임피던스를 동일하게 선



정하게 되면 병렬운전조건에서 배전계통 개폐기류의 차단정격전류를 초과함을 알 수 있다. 이에 대한 대책으로 기존 변압기와의 병렬운전을 포기하고 용량이 증가하는 변압기의 %임피던스를 높이는 방법, 계통에 직렬 한류리액터를 사용하는 방법 또는 초전도 한류기를 사용하는 방법 등을 들 수 있다.

한편, PSCAD/EMTDC를 사용하여 시뮬레이션 해 본 결과, 본 논문에서 계산한 고장전류 값은 정상상태 대칭전류의 실효치 값과 일치함을 알 수 있었으며 과도상태 최대 실효치는 정상상태 대칭전류 실효치보다 약 1.63배 정도 큼을 알 수 있었다. 실제 배전계통에서 고장차단은 고장발생 직후 약 3 cycle 정도에서 이뤄짐을 감안하면 직류분이 포함된 과도상태의 비대칭 전류를 차단하게 되므로 배전용 개폐기류의 차단정격전류 규격에 비대칭 전류규격을 포함해야 될 것으로 생각된다.

**참 고 문 헌**

- [1] 한국전력공사, 한전표준규격 ES 140-435~622 154 kV 전력용 변압기, pp.2-5, 2006.
- [2] 한국전력공사, 한전설계기준-2501 전력용변압기 선정기준, pp.1-8, 2005.
- [3] IEC 60076-1, Power Transformer-Part: General Edition 2.1, 1993.
- [4] 한국전력공사, 서울전력관리처 23 kV 모선임피던스 자료, 2005.
- [5] Westinghouse Co., Electrical Transmission and Distribution Reference Book, pp.136-137, 1950.
- [6] A.C. Franklin and D.P. Franklin, The J&P Transformer Book, 11th Edition, pp.737, 1983.
- [7] 이경호, "IEC 규격에 의한 고장전류 해석 및 차단기 용량 선정", 한국조명전기설비학회 2007춘계학술대회 논문집, pp.433-436, 2007.
- [8] 남재경, "고장사고시 전류의 흐름과 보호 계전기의 회로 점검 방법", 조명전기설비학회지, 제16권, 제3호, pp.46-53, 2002.

- [9] 조남훈, "지중배전선로의 다회로 차단기 운영방안 연구", 대한전기학회 논문지, 49, 4A, pp.143-151, 2000.
- [10] 오용택, 김진성, "배전계통에서 발생하는 돌입전류와 고장전류의 특성 비교연구", 한국조명전기설비학회 학술대회 논문집, pp.51-57, 2001.
- [11] 정상진 외, "전력용 변압기 사고감소에 관한 연구 (최종 보고서)", 한전 전력연구원, pp.157-204, 1992.

**저 자 소 개**

**조 성 수 (趙 成 洙)**



1968년 4월 7일생. 1994년 건국대학교 전기공학과 졸업. 2000년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 배전연구소 선임연구원  
 Tel : 042-865-5948  
 Fax : 042-865-5904  
 E-mail : onlycho@kepri.re.kr

**한 상 옥 (韓 相 玉)**



1946년 5월 12일생. 1974년 충남대학교 공업교육과(전기) 졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수  
 Tel : 042-821-5655  
 E-mail : sohan@cnu.ac.kr