

# 선박의 저항접지 시스템에서 지락 고장에 따른 대지전압 중성점 전위 특성

이윤형<sup>1</sup>, 류기탁<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국해양수산연수원 교육운영팀, <sup>2</sup>한국해양수산연수원 해양플랜트교육팀

## Characteristics on the Neutral Point Potential of Line-to-Ground Voltage according to Line-to-Ground Fault in Resistance Ground System for Ships

Yun-Hyung Lee<sup>1</sup>, Ki-Tak Ryu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Education Management Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

<sup>2</sup>Offshore Training Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

**요약** 계통 접지(system grounding)는 어떤 이상전압 유입이나 지락 고장 등으로부터 전력 계통의 안정성을 확보할 목적으로 전원의 중성점에 적용하는 것이다. 선박에서 주로 적용되는 계통 접지는 비접지 시스템과 저항 접지 시스템이다. 440V 선박은 비접지 시스템을 적용하고, 3.3kV, 6.6kV, 11kV의 MV(medium voltage) 시스템을 사용하는 선박은 저항 접지 시스템 중에서 주로 고저항접지 방식을 적용한다. 지락 고장은 전기시스템에서 발생하는 모든 고장의 95%정도이고, 지락고장 발생 시 전력 계통의 대지전압이 과도하게 증가하여 선내 절연 시스템에 악영향을 주게 된다. 본 논문에서는 선박에서 적용하는 저항접지 시스템에 대해 지락 고장 발생시 지락 정도에 따라 전력 계통의 대지전압 중성점의 변동 특성을 확인하고자 한다. 이를 위해 우선 접지 시스템의 종류에 따른 특성을 알아보고, 선박의 저항 접지 시스템의 대지전압 중성점에 대한 모델링을 유도한다. 최종적으로 다양한 변수환경에 따라서 대지전압, 선간전압, 중성점 전위 등이 어떻게 변동되는지 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통해 지락고장 발생시 나타나는 선내 전압의 변화특성을 분석한다.

**Abstract** System grounding is applied to the neutral point of a power source to secure the from any abnormal voltage and/or grounding fault. System grounding, which is applied mainly in ships is an ungrounded and resistance grounded system. Vessels using the MV power system with 3.3kV, 6.6kV, and 11kV mainly adopt a high resistance grounding system among the resistance grounding systems. The ground fault accounts for 95% of all faults occurring in the electrical system and when a fault occurs, the line-to-ground voltage of the power system is increased excessively, which adversely affects the onboard insulation system. This study analyzed the variation characteristics of the line-to-ground voltage neutral point according to the degree of ground fault in a resistance ground system applied in vessels. For this purpose, the characteristics of the grounding system were first explained, and the modeling of the neutral point potential of the line-to-ground voltage of the resistance grounding system in the vessels was derived. Finally, this study examined how the line-to-ground voltage, line voltage, and neutral point change according to various variable environments through MATLAB simulations.

**Keywords** : Ground Fault, Line-to-Ground Voltage, Medium Voltage System, Neutral Point, Resistance Grounding System

\*Corresponding Author : Ki-Tak Ryu(KIMFT)

Tel: +82-51-620-5776 email: ryukitak@seaman.or.kr

Received February 12, 2018

Revised April 2, 2018

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

## 1. 서론

계통 접지(system grounding)는 선로에 이상전압이 유입되거나 지락고장 등으로부터 전력 계통의 안정성을 확보할 목적으로 전원 중성점에 적용하는 것이다. 계통 접지는 여러 방법이 있으나 선박과 해양플랜트에서 주로 적용되는 방법은 비접지 시스템과 저항 접지 시스템이다. 저항 접지 시스템은 저항의 크기에 따라 고저항과 저저항 시스템으로 구분된다. 기존의 선박은 주로 440V 전압을 사용하고, 이러한 선박은 비접지 시스템을 적용한다. 그러나 점차 선박이 대형화 및 고도화되고, 에너지 효율과 환경 문제 등으로 인해 전기 추진 선박이 도입됨에 따라 3.3kV, 6.6kV, 11kV의 MV(medium voltage) 시스템을 사용하여 필요전력을 감당한다. 이러한 MV 선박은 저항 접지 시스템 중에서 일반적으로 고저항접지 방식을 사용하지만 배전용량이 크고 지락고장시 전류가 크면 저저항 접지방식을 적용해야 한다. 또한, 해양 플랜트와 같이 대형화되고, 배전선로와 수요전력이 많은 전기 설비 시스템에서는 저저항 접지 방식이 적용된다.

항해중인 선박은 지락 고장 발생시 안전 확보를 위해 연속적인 전원 공급이 매우 중요하다. 이를 위해 440V 전력 계통에서는 앞에서 언급한 바와 같이 비접지 시스템을 적용하는데 이 시스템은 지락 고장시 경우에 따라 매우 큰 과도과전압이 발생할 수 있다.

고저항접지 시스템은 충전 전류가 작은 MV 선박 탭에서 1선 지락시 과도 과전압(transient overvoltage) 보호를 위해 적용하는 방식이라 할 수 있다[1]. 또한, 전력 배전 시스템의 규모가 크면 대지 정전용량이 증가하게 되고, 이 경우에는 저저항 접지 시스템을 적용하거나 지락 고장 발생시 알람기능 보다는 트립기능을 가진 고저항 접지 시스템을 적용한다[2].

지락 고장(ground fault)은 전기시스템에서 발생하는 모든 고장의 95%정도이고, 완전 지락 고장(bolted ground fault)과 아킹 지락 고장(arcing ground fault)으로 구분할 수 있다. 중성점 접지는 이러한 고장으로 인한 전력계통내 교란, 인체 위해 그리고 잠재적 위험을 제어하기 위한 효과적인 방법이다[3-4]. 한편 지락고장시 전력 계통의 대지전압이 과도하게 증가하면 선내 절연 시스템에 악영향을 주게 되며 그 정도를 검토하여 절연물의 강도를 다르게 설계해야 한다. MV 케이블의 절연물은 100[%], 133[%], 173[%]의 3가지 레벨(level)로 구분되며, 직접 접지 시스템은 100% 절연 레벨을 사용한다.

지락고장 기간 동안 정상값 이상으로 시스템 전압이 상승할 경우 고장이 1시간 내로 제거될 경우 133[%] 절연 레벨로 하고, 고장이 시스템에서 정해지지 않은 시간동안 유지된다면 173[%] 절연 레벨을 사용한다[5-7].

따라서 본 논문에서는 최근 전력 수요 증가에 따라 MV 계통의 선박이 주요 추세를 감안하여 선박과 해양플랜트에서 적용하는 저항접지 시스템에서 지락 고장 시 지락 정도에 따른 MV 계통의 대지전압 중성점의 변동 특성을 확인하고자 한다. 이를 위해 우선 접지 시스템에 따른 특성을 알아보고, 선박의 MV 계통에서 적용하고 있는 저항 접지 시스템에서의 대지전압 중성점에 대해 모델링을 한다. 다양한 변수환경에 따라 대지전압, 선간전압, 중성점 전위 등이 어떻게 변동되는지 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통해 지락 고장 발생시 나타나는 선내 전압의 변화특성을 분석하도록 한다.

## 2. 계통접지의 방법과 특성

전기 시스템에서 계통 접지의 일반적인 목적은 고저압 혼축 사고나 번개 등으로 인해 유발되는 전압을 억제하고, 정상 운전하에서 전압을 안정적으로 유지하는 것이다[8]. 이러한 계통 접지는 전원 중성점의 임피던스 연결여부에 따라 비접지, 저항접지, 직접접지 등으로 구분된다. 전원 시스템에 어떤 방식으로 접지를 적용할 것인가는 전원의 중성점에 연결되는 부하의 유무와 지락 고장시 전원 공급 연속성의 필요성에 따라 선택한다.

전원 시스템에 접지 방식을 적용할 때 접지 구역을 구분할 필요가 있다. 3상 전원 시스템에서  $\Delta$ -Y 또는  $\Delta$ - $\Delta$  변환, 인버터와 컨버터 시스템을 이용하면 접지 시스템을 분리시킬 수 있다. 이렇게 구분되어 대지전압, 선간전압, 중성점 전위 등과 같은 특성들이 서로 영향을 주지 않는 독립된 구역을 접지 구역(grounding zone)이라 한다[9].

선박에서 발전된 전압을  $\Delta$ - $\Delta$  결선으로 변압하는 경우 변압기의 1차측과 2차측은 서로 분리된 전원시스템이 된다. 즉, 1차측과 2차측은 서로 독립된 접지 구역이 되어 개별로 발생하는 지락 고장은 서로에게 영향을 미치지 않는다.

본 장에서는 선박에서 적용하고 있는 대표적인 접지 방식인 비접지와 저항접지 뿐 아니라 직접접지 시스템에 대해서도 살펴보고자 한다.

### 2.1 비접지 시스템

비접지 시스템은 전원의 중성점과 대지간에 임피던스의 물리적인 연결을 하지 않은 전원 시스템을 말하며 의도적으로 연결하지 않거나 전원 중성점이 없어 연결하지 못하는 경우가 있다. 이러한 시스템은 전선과 대지 간에 의도적인 연결은 없지만 선로의 정전용량으로 서로 연결되어 있다.

비접지 시스템은 1선 완전 지락고장이 발생할 때 부하에 전원 공급의 연속성을 보장할 수 있고, 지락전류가 매우 작은 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 440V를 사용하는 선박은 이 방식을 채택하고 있다.

그러나 건전상의 대지전압이 고장전 보다  $\sqrt{3}$  배 증가하고, 고장이 유지되면 Fig. 1과 같이 대지전압이 상승하여 절연물의 상태를 악화시키는 단점이 있다.

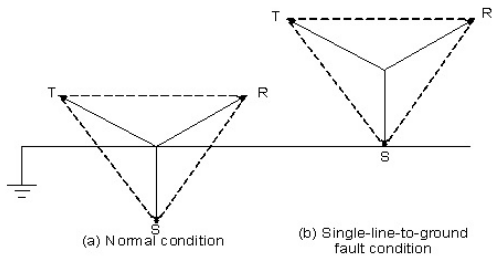


Fig. 1. Voltage displacement during ground fault in ungrounded system

또한, 재점호(restriking)나 간헐적인 지락 고장으로 인한 아킹 지락 고장이 발생하면 과도 과전압이 발생하고, 대지전압이 5.5배 상승하여 전체 전기 시스템의 절연물 상태를 더욱 악화시킨다[9].

### 2.2 저항접지 시스템

저항접지 시스템은 전원의 중성점과 대지 사이에 임의의 저항으로 연결하며 이는 지락 고장 전류를 제한하는 역할을 한다. 지락 고장이 발생할 경우, 과도 과전압을 제외하면 대지전압은 비접지 시스템과 거의 동일하다. 이 시스템은 지락 고장시 허용되는 지락 전류의 크기에 따라 고저항 접지(high resistance grounding)와 저저항 접지(low resistance grounding)로 구분된다. 이를 구분하는 지락 전류 크기에 대해 규격(standard)에서 규정하는 바는 없지만, 일반적으로 고저항 접지는 10[A] 이하이고, 저저항 접지는 최소 100[A]이나 보통 200~

1,000[A] 범위이다[1].

이 두 시스템은 1선 완전 지락 고장이 건전상의 대지전압을 고장전의 173[%]로 상승시키고, 아킹 지락 고장은 고장전의 250[%]에 해당하는 과도 과전압을 부과한다. 이처럼 각 고장에 따라 증가되는 대지전압은 건전상의 절연시스템에 압력(stress)을 가하므로 절연에 악영향을 미치게 된다[1],[10].

#### 2.2.1 고저항 접지 시스템

고저항 접지 시스템에서 10[A]는 1선 완전 지락 고장시 지락 고장점에서 흐르는 최대 전류  $I_{fg}$ 를 말하며, 이 전류는 중성점 저항(neutral ground resistor)을 통해 흐르는 전류  $I_n$ 과 접지 구역내 전체 시스템 총전류  $3I_C$ 의 벡터합이다. 중성점 저항 크기는  $I_n$ 은  $3I_C$ 보다 약간 크거나 같도록 선정해야 한다[3][8]. 즉,  $I_n = 3I_C$ ,  $I_{fg} = 10[A]$ 로 가정하면  $I_n = 3I_C = 7.07[A]$ 로 고저항 접지 시스템에서는  $3I_C$ 가 7.07[A]를 넘지 않는 경우에 적용할 수 있다.

또한, 고저항 접지 시스템은 지락전류가 작아 고장 회로의 즉각적인 제거(trip)가 되지 않으므로 오랜 기간 동안 절연시스템에 증가된 전압이 가해진다. 따라서 고저항 접지시스템은 지락 고장을 장시간 방치시 단락 사고로 이어져 지락점에서 상당한 손상이 수반된 대규모 정전이 발생할 수 있다. 이 시스템은 지락고장을 항상 감시하는 장치가 구비되어 있어야 하고, 고장시 즉시 해결해야 한다.

#### 2.2.2 저저항 접지 시스템

저저항 접지 시스템에서는 지락고장 전류가 크기 때문에 고저항 접지 시스템과 달리  $3I_C$ 가 중요하지 않으며 이를 고려할 필요가 없다. 다만, 이 시스템은 지락고장회로를 t 사이클 정도의 시간 후 보호 계전기가 동작하여 제거 되므로 절연 시스템에 증가된 압력이 가해지는 시간이 매우 짧다. 그러나 지락점에서 손상이 크지 않도록 중성점 저항 크기를 유의해서 선정해야 한다.

### 2.3 직접접지 시스템

직접접지 시스템은 전원의 중성점을 대지에 임피던스 없이 직접 연결한 시스템이다. 지락 고장 발생시 과전압을 제어하는데 가장 효과적이지만 지락 고장시 매우 큰

고장 전류가 흐른다. 따라서 어떤 지락 고장으로 부터 심한 플래시(flash), 아크(arc), 폭발(blast) 등을 동반하기 때문에 안전상 위험이 존재하는 단점을 가지고 있다. Fig. 2는 직접접지 시스템에서 지속된 1선 지락 고장시 전압의 벡터도를 나타낸 것이다.

이러한 특성 때문에 직접접지 시스템을 적절하게 적용하기 위해서는 지락전류가 3상 단락전류의 최소 60[%]되도록 설계해야 한다[1].

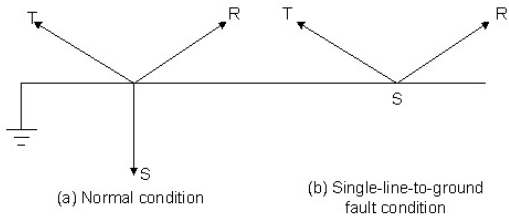


Fig. 2. Voltage displacement during ground fault on solidly grounded system

### 3. 저항접지의 대지전압 중성점 모델링

저항접지 시스템에서 지락 고장시 대지전압 중성점 전위의 특성을 해석하기 위해 전원, 선로 임피던스, 중성점 저항을 Fig. 3과 같이 표현하였다. 그림에서 대지 정전용량과 선간 정전용량이 각각 Y결선과 Δ결선으로 되어 있으나 Δ결선된 선간 정전용량은 시스템의 지락 특성에 미치는 영향이 작으므로 무시하도록 한다[2].

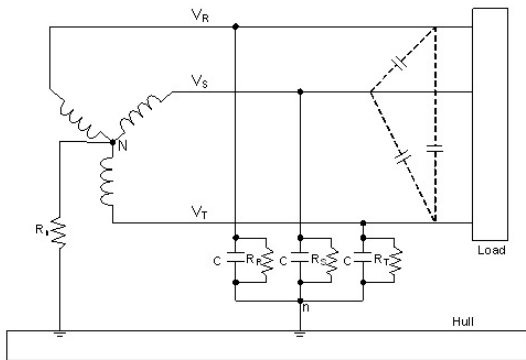


Fig. 3. Simplified resistance grounding system

그림에서  $n$ 은 결합된 선로임피던스 중성점(선로 대

지전압 중성점),  $N$ 은 전원 중성점,  $\dot{V}_R, \dot{V}_S, \dot{V}_T$ 는 각  $120^\circ$  위상차로 크기가 같은 상전압,  $R_R, R_S, R_T$ 는 접지저항,  $C$ 는 대지정전용량,  $R_n$ 은 전원의 중성점 접지저항이다.

어떤 상에서 지락고장이 발생하면  $R_n$  쪽으로 전류  $\dot{I}_n$  이 흐른다. 또한 선로 대지전압 중성점  $n$ 이 이동함에 따라 대지전압의 불균형이 발생하게 된다.  $n$ 의 전위를  $N$ 에 대해  $\dot{V}_{nN}$ 이라 하고, 이 이동경로를 보면 대지전압 중성점의 변화 특성과 전원 중성점 전위의 상대적인 이동 특성을 확인할 수 있다.

각 상의 대지 정전용량은  $C$ 로 동일하다고 가정하면 각 상의 대지 임피던스  $\dot{Z}_R, \dot{Z}_S, \dot{Z}_T$ 는 다음과 같다.

$$\dot{Z}_R = \frac{R_R(1 - j\omega C R_R)}{1 + (\omega C R_R)^2} \quad (1)$$

$$\dot{Z}_S = \frac{R_S(1 - j\omega C R_S)}{1 + (\omega C R_S)^2} \quad (2)$$

$$\dot{Z}_T = \frac{R_T(1 - j\omega C R_T)}{1 + (\omega C R_T)^2} \quad (3)$$

선로 절연에 대해 어떤 임의의 상태에서 각 상의 대지 전압이  $\dot{V}_{Rn}, \dot{V}_{Sn}, \dot{V}_{Tn}$ 일 때  $\dot{V}_{nN}$ 을 나타내면 식 (4)가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{nN} &= \dot{V}_R - \dot{V}_{Rn} \\ \dot{V}_{nN} &= \dot{V}_S - \dot{V}_{Sn} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dot{V}_{nN} = \dot{V}_T - \dot{V}_{Tn}$$

$$\dot{V}_{nN} = \dot{I}_n R_n$$

여기서 각 상의 대지전압  $\dot{V}_{Rn}, \dot{V}_{Sn}, \dot{V}_{Tn}$ 은 식 (5)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{Rn} &= \dot{I}_R \dot{Z}_R \\ \dot{V}_{Sn} &= \dot{I}_S \dot{Z}_S \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{V}_{Tn} = \dot{I}_T \dot{Z}_T$$

n점에서 키르히호프 전류법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$\dot{I}_R + \dot{I}_S + \dot{I}_T - \dot{I}_n = 0 \quad (6)$$

식 (6)에 식 (4), (5)를 대입하고 정리하면 식 (7)이 된다.

$$\frac{\dot{V}_R - \dot{V}_{nN}}{\dot{Z}_R} + \frac{\dot{V}_S - \dot{V}_{nN}}{\dot{Z}_S} + \frac{\dot{V}_T - \dot{V}_{nN}}{\dot{Z}_T} - \frac{\dot{V}_{nN}}{R_n} = 0 \quad (7)$$

$\dot{V}_{nN}$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_{nN} = \frac{\dot{Z}_R \dot{Z}_S R_n \dot{V}_T + \dot{Z}_S \dot{Z}_T R_n \dot{V}_R + \dot{Z}_T \dot{Z}_R R_n \dot{V}_S}{\dot{Z}_R \dot{Z}_S R_n + \dot{Z}_S \dot{Z}_T R_n + \dot{Z}_T \dot{Z}_R R_n + \dot{Z}_R \dot{Z}_S \dot{Z}_T} \quad (8)$$

#### 4. 지락고장시 중성점 전위 변화 분석

본장에서는 3장의 모델링과 MATLAB을 활용하여 지락 고장시의 대지전압 중성점 전위 변화 특성을 분석한다. 시뮬레이션을 위해 MV 선박에서 사용하는 6.6kV를 선간전압으로 한다. 또한 선박의 배전규모에 영향을 받는 선로 충전 전류 크기에 따라 구분되는 고저항 접지 시스템과 저저항 접지 시스템에 대해 시뮬레이션을 실시하며, 2.2절에 따라 고저항 및 저저항 접지 시스템의  $R_n$ 과  $C$ 를 계산한다. 시뮬레이션에 사용된 기준 파라미터와 계산값은 Table 1과 같다.

Table 1. Parameters of MV system for simulation

	High resistance grounding system	Low resistance grounding system
$V_R, V_S, V_T$	3,810[V]	
$R_R, R_S, R_T$	1[GΩ]	
$f$	60[Hz]	
$I_{fg}$	10[A]	412.3[A]
$I_n$	7.07[A]	400[A]
$3I_C$	7.07[A]	100[A]
$R_n$	538[Ω]	9.5[Ω]
$C$	1.64[μF]	23.2[μF]

#### 4.1 고저항 접지 시스템의 대지정전용량 변화

저항접지 시스템을 적용하기 위해서는 시스템의 충전 전류 크기가 중요하며 이는 대지 정전용량의 크기로 결정된다. 고저항 접지시스템은 시스템 충전전류가 7.07[A]를 넘으면 적용이 불가하고, 이 전류 설계가 매우 중요하므로 대지 정전용량  $C$  변화에 따른 특성을 확인할 필요가 있다.

고저항 접지 시스템에서 대지정전용량 변화에 따른 대지전압 중성점 이동 경로 특성을 확인하기 위해  $R_n$ 을 고저항값인 538[Ω]로 고정한다. 다음으로 R상의 대지 정전용량을 0.8[μF], 1.64[μF], 23.2[μF], 50[μF], 100[μF]으로 변화시키면서 각각의 경우에 접지 저항  $R_R$ 을 점차 감소시켜 대지전압 중성점 전위의 이동 특성을 분석한다.

Fig. 4에 이를 나타내었으며 각각의 대지정전용량에 대한 이동경로는 A~E로 표시되었다. 대지정전용량이 증가함에 따라 대지전압 중성점 전위 이동 반경이 커지는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 배전규모가 증가하면 시스템의 대지정전용량이 커지므로 고저항 접지시스템을 적용할 때 배전 규모에 따라 지락 고장시 Fig. 4와 같은 특성을 고려해야 한다. 또한, 실질적으로 충전전류의 제한으로 고저항 접지시스템에 적용될 수는 없지만 C, D, E와 같이 대지 정전용량이 많이 커질수록 이동 반경은 서로 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 LV(low voltage) 비접지 시스템에서의 특성과 동일한 결과이다[11].

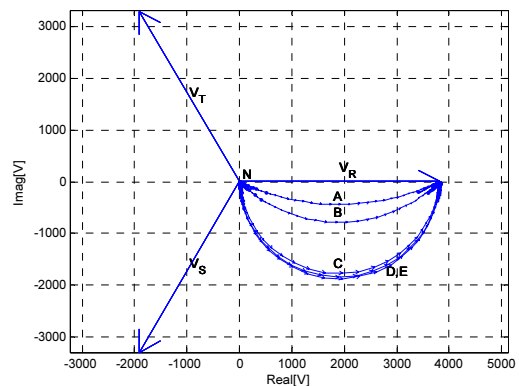


Fig. 4. Locus of the neutral point of line-to-ground voltage according to line-to-ground capacitance.

한편,  $R_R$ 이 감소되어 어떤 임의점일 때 대지전압의 크기를 알아보기 위해  $C$ 와  $R_n$ 을 1.64[μF]과 538[Ω]로

선정하고,  $R_R$ 이 463[Ω]되는 지점에서 각 상의 대지전압에 대해 분석하였다. Fig. 5는 이를 나타낸 벡터도이고, 이 때 각 대지전압 크기는  $V_{Rn} = 2,260[V]$ ,  $V_{Sn} = 4,389[V]$ ,  $V_{Tn} = 5,435[V]$ 이며 전원의 중성점 전압은 1,859[V]이다. 따라서 이 상태에서는 건전상의 대지전압이 상승함에 따라 절연물에 악영향을 끼치며 특히, 대지전압이 가장 큰 T상이 더욱 악화될 가능성이 있다. 만약, 완전 지락이 된다면 건전상 S, T상이 동일한 크기의 대지전압이 되어 동일한 크기로 절연물에 악영향을 주게 된다.

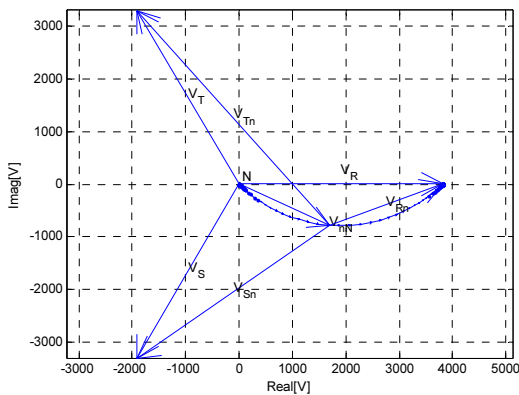


Fig. 5. The characteristic of line-to-ground voltage( $R_R = 463[\Omega]$ ,  $C = 1.64[\mu F]$ ,  $R_n = 538[\Omega]$ )

#### 4.2 저저항 접지 시스템의 중성점 저항 변화

저저항 접지 시스템은  $R_n$ 의 크기가 대체로 작고, 선정하는 크기에 따라 과도 과전압의 크기가 제어된다[2]. 또한, 저저항 접지 시스템에서 과도 과전압을 250[%]로 제한하기 위해서는  $X_c/3R_n > 1$ 을 충족해야 한다[2]. 시뮬레이션으로 중성점 저항  $R_n$  변화에 따른 특성을 확인하기 위해 대지정전용량은 23.2[μF] ( $X_c = 114.3[\Omega]$ )으로 고정하고,  $3R_n$ 을 15[Ω], 30[Ω], 60[Ω], 90[Ω]로 고정하여 각 경우에 대해 R상의 접지 저항이 악화될 경우 대지전압 중성점 전위의 이동 특성을 확인한다.

Fig. 6에서 각각의 중성점 저항에 대한 대지전압 중성점 전위 이동경로는 중성점 저항 크기에 따라 A~D로 표시되었다. 그림에서 중성점 저항이 감소함에 따라 대지전압 중성점 전위 이동시 편각이 작아지며 지락시 고장 전류를 크게 설계할수록 중성점 전위 편각이 작아진다. 중성점 저항이 증가하여 시스템 대지 임피던스의 크

기에 근접 할수록 편각이 커지므로 저저항 접지 시스템에서 중성점 저항 선정시 이를 고려해야 한다.

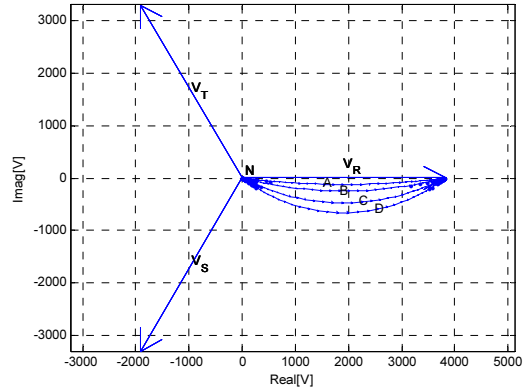


Fig. 6. Locus of the neutral point of line-to-ground voltage according to neutral point resistor.

#### 4.3 접지저항의 변화

본 절에서는 고저항 접지 시스템과 저저항 접지 시스템의 R상 접지저항  $R_R$ 이 점점 작아지는 경우의 대지전압 중성점 전위 변화 특성을 확인한다.

정상상태인 경우 Fig. 7에서 N점은 전원의 중성점이고, 대지전압 중성점 n점도 같은 위치이다.  $\dot{V}_R$ ,  $\dot{V}_S$ ,  $\dot{V}_T$ 는 크기가 3,810[V]인 상전압이고 120° 위상차를 가지며, 이 때 상전압은 대지전압과 같다.

만약, R상 지락고장에 따라 접지저항  $R_R$ 이 점점 악화될 경우 대지전압 중성점 n이 N점에서 반시계 방향으로 이동한다. 이에 따라 전원의 중성점 전압과 건전상의 대지전압이 점점 상승하게 되고, 완전 지락이 될 경우  $\dot{V}_R$ 의 끝점으로 이동한다. 이동경로는 고저항 접지 시스템이 저저항 접지 시스템보다 더 큰 편각을 가지는 것을 확인할 수 있다.

고저항 접지 시스템은 지락 고장점의 최대 전류가 10[A]이므로 이 방식을 적용하는 전력시스템은  $R_n$ 과 C가 Table 1의 값 보다 커질 수 없다. 따라서 Fig. 7의 HRNG가 고저항 접지 시스템에서의 최대 편각을 가진 궤적이다.

저저항 접지 시스템의  $R_n$ 은 Table 1과 같이 작은 값을 가진다. 따라서 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 지락고장에 따른 LRNG의 대지전압 중성점 이동 궤적의 편각이 작은 것을 알 수 있다.

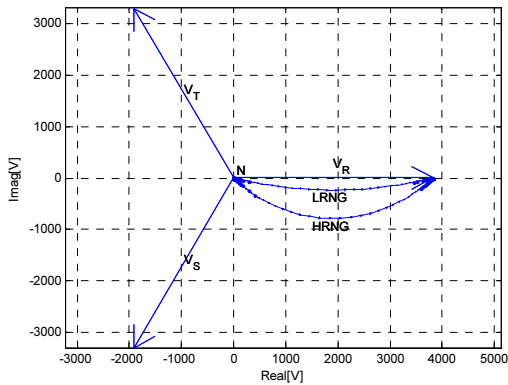


Fig. 7. Locus of the neutral point of line-to-ground voltage in high resistance and low resistance neutral grounding system with being line-to-ground fault of R phase.

#### 4.4 두 상의 지락고장시 대지전압 변화

Fig. 8은 R상과 S상이 동시에 같은 정도로 절연이 약화되어 지락고장이 발생할 경우 대지전압 중성점은 N점에서 A점으로 이동하며 임의점( $R_R = R_S = 667[\Omega]$ )에서의 각 상에 대한 대지전압의 벡터도를 나타낸 것이다.

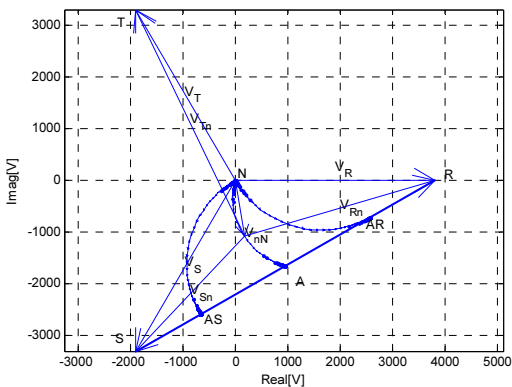


Fig. 8. Locus of line-to-ground voltage about double faults(R and T phase)

그림을 통해 확인할 수 있듯이  $V_{Rn} = 3,795[V]$ ,  $V_{Sn} = 3,037[V]$ ,  $V_{Tn} = 4,853[V]$ 이고, 전원의 중성점 전압의 크기는  $1,099[V]$ 이 되어 건전상의 대지전압이 상승한다. 이에 따라 절연물에 악영향을 끼치게 된다.

위와는 다르게 두 상이 어떤 시간차를 가지면서 절연이 불량해져 지락고장이 발생할 경우도 분석하였다. 우선 R상이 먼저 지락이 진행되어 건전상의 절연을 악화

시키고, 이로 인해 S상의 지락이 유발된 경우를 검토하였다. 대지전압 중성점 전위는 Fig. 8에서 보는 것과 같이 N점에서 AR점으로 이동한다.

다음으로 S상이 먼저 지락이 진행되고 다음으로 R상이 지락되는 경우를 검토하였다. 이 경우는 N점에서 AS점으로 이동한다. A점, AR점, AS점은 모두 R점과 S점을 잇는 직선상에 있는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

최근 선박에서 사용하는 전압이 높아짐에 따라 비접지 시스템보다 저항접지 시스템을 적용하고 있다. 본 논문에서는 각 접지 방식에 따른 특성을 알아보고, 그 중 지락 고장시 저항 접지 시스템의 대지전압 중성점 전위 변화 특성을 확인하였다. 이를 위해 저항 접지 시스템의 대지전압에 대해 모델링하고, MV 계통에서 지락 고장 상황을 고려하여 대지전압 중성점 전위의 이동 경로 특성과 대지전압 크기 변화를 다양한 환경하에서 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

우선 저저항 접지 시스템과 고저항 접지 시스템에서 각각 지락고장 정도를 고려하여 대지전압 중성점 이동 경로를 확인하였다. 이동 경로는 원점에서 반시계 방향이었으며 저저항 접지 시스템이 대지전압 중성점 이동시 편각이 더 작은 것을 확인하였다. 배전 규모가 클수록 시스템 대지 정전용량이 증가하므로 정전용량 크기에 따른 이동 경로도 확인하였으며 정전용량 크기가 클수록 이동시 편각이 커지는 것을 확인하였다. 또한 R상에서 지락 고장이 진행될 경우 T상의 대지전압이 S상의 대지전압보다 상대적으로 큰 것을 확인하였고, 완전 지락이 되었을 때에는 건전 상의 대지전압 모두 선간전압 크기로 증가하는 것을 확인하였다. 두 개의 상이 동시에 지락고장이 진행될 경우에는 관련 두 개의 상전압 벡터 끝점을 잇는 직선 상에 대지전압 중성점 이동경로의 끝점이 존재하는 것을 확인하였다. 이를 통해 선박에 저항 접지 시스템을 적용할 때 배전 규모의 크기, 중성점 저항 선정에 따른 특성을 사전에 고려할 수 있다. 또한, 지락 고장시 발생하는 건전상의 대지전압 상승과 이에 따른 절연물의 설계 특성에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- [1] IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, IEEE std. 142-2007.
- [2] D. Paul and S. I. Venugopalan, "Low-Resistance Grounding Method for Medium-Voltage Power Systems", in Conf. Rec. *IEEE IAS Annu. Meeting*, pp. 1571-1579, 1991.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.1991.178070>
- [3] L. J. Kingrey, R. D. Painter, and A. S. Locker, "Applying High Resistance Neutral Grounding in Mmedium Voltage Systems," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 47, no. 3, pp. 1220-1231, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2126553>
- [4] J. R. Dunki-Jacobs, F. J. Shields, and C. St. Pierre, *Industrial Power System Grounding Design Handbook*. Dexter, MI: Thomson-Shore, 2007.
- [5] B. Bridger, "High Resistance Grounding," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-19, no. 1, pp. 15-21, Jan./Feb. 1983.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1983.4504149>
- [6] NEMA WC5-1992/ICEA S-61-402, Thermal Plastic Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy.
- [7] System Grounding for Low-voltage Power Systems, Catalog GET-3548(11-1975), Industrial Power System Engineering Operations, General Electric Company, Schenectady, NY 12345.
- [8] 2008 National Electrical Code Handbook, 11th ed., Nat. Fire Protection Assoc., Quincy, MA, 2008.
- [9] D. D. Shipp, and F. J. Angelini, "Characteristics of Different Power Systems Grounding Techniques: Fact & Fiction," *IEEE Trans. Ind. Appl. Ann. Mtg. Conf. Rec.*, vol. 2, pp.1535-1544, 1988.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.1988.25261>
- [10] B. Bridger, "What To Nnow about High Resistance Grounding," *EC&M*, pp. 37-46, Jul. 1994.
- [11] S. M. Choi, "Characteristics of Neutral Point Loci on Line Voltage to Hull When Insulation Resistance Collapses by Earthing Faults at 3 Phase Power Distribution Systems Onboard Vessels," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 8, pp. 1117-1123, 2011(in Korean).  
DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2011.35.8.1117>

### 이 윤 형(Yun-Hyung Lee)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 (공학석사)
- 2007년 8월 : 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 2008년 2월 ~ 2014년 6월 : 한국항만연수원 교수
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국해양수산연수원 교수

<관심분야>

선박 전기 및 제어시스템, 유전알고리즘, 퍼지제어, 비선형제어, 시스템식별

### 류 기 탁(Ki-Tak Ryu)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 (공학박사 수료)
- 2001년 3월 ~ 2005년 7월 : 현대상선 엔지니어
- 2007년 5월 ~ 현재 : 한국해양수산연수원 교수

<관심분야>

선박 전기 및 전력시스템, AC드라이브, 비선형제어, 최적제어