

선박의 접지 시스템에서 지락 고장에 따른 대지 전압 변동 특성

김종필¹, 류기탁², 이윤형^{3*}

¹한국해양수산연수원 선박운영팀, ²한국해양수산연수원 해양플랜트교육팀, ³한국해양수산연수원 교육운영팀

Characteristics of loci on Line-to-Earth Voltage according to Earth Fault in Earthing System for Ships

Jong-Phil Kim¹, Ki-Tak Ryu², Yun-Hyung Lee^{3*}

¹Ship Operation Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

²Offshore Training Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

³Education Management Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

요 약 선박에서 주로 사용하는 전압은 450[V], 6.6[kV], 11[kV]이며, 운항 중 전력계통의 안정성 확보를 위해 접지 시스템이 적용된다. 일반적으로 450[V]를 사용하는 저전압 선박은 비접지 시스템을 6.6[kV], 11[kV]를 사용하는 고전압 선박은 고저항 접지 시스템을 적용한다. 선박의 전력계통에서 지락 고장이 발생하면 건전상의 대지 전압이 선간전압 또는 그 이상으로 증가하고, 케이블의 절연에 과도한 충격을 주게 되므로 이를 분석하는 것은 매우 중요한 부분이다. 따라서 본 논문에서는 선박에서 주로 채택하고 있는 고저항 접지 및 비접지 시스템에 대해 지락 고장에 따른 선박 전력계통의 대지 전압의 변동 특성과 고장 상의 판단 방법을 대칭 좌표법을 이용하여 분석하고자 한다. 이를 위해 대칭 좌표법을 이용하여 대지 전압의 수학적 모델을 유도하고, 시뮬레이션을 위한 선박 전압은 6.6[kV]와 450[V]로 선정하였다. MATLAB을 이용한 시뮬레이션 결과 두 접지 시스템 모두 지락상 보다 위상이 120° 앞선 상의 대지 전압이 가장 높게 상승하였고, 이를 이용하여 고장 상을 정확하게 판단할 수 있음을 확인하였다.

Abstract The voltages mainly used in ships are 450 [V], 6.6 [kV], and 11 [kV], and an earthed system is applied to ensure the stability of the power distribution system. In general, low-voltage ships using 450 [V] apply an unearthed system, while high-voltage ships using 6.6 [kV] or 11 [kV] use a high-resistance earthed system. When an earth fault occurs in a ship's power distribution system, the voltage of the healthy phase increases to the line-to-line voltage or higher, which causes an excessive impact on the insulation of the cable. Thus, analyzing this behavior is very important. In this paper, we investigate the characteristics of the line-to-earth voltage variation according to earth faults and a recognition procedure of a faulty phase using the symmetrical coordinate method for a high-resistance earthed system and unearthed system. A mathematical model of the line-to-earth voltage was derived through the symmetric coordinate method, and the ship voltage for simulations was selected as 6.6 [kV] and 450 [V]. A MATLAB simulation proved that this method can determine the highest increase of the line-to-earth voltage, which leads by 120° on the faulty phase, and it accurately judges the faulty phase in both earthed systems.

Keywords : Academia-Industrial, Earth fault, Line-to-earth voltage, Resistance earthed system, Symmetrical coordinates method, Unearthed system

*Corresponding Author : Yun-Hyung Lee(KIMFT)

email: domse54@daum.net

Received November 6, 2020

Accepted February 5, 2021

Revised December 7, 2020

Published February 28, 2021

1. 서론

선박의 전력 시스템에서 주로 사용하는 전압은 450[V], 3.3[kV], 6.6[kV], 11[kV] 등이며 IEC 규격에 따라 1[kV]를 기준으로 저전압, 고전압으로 구분한다[1]. 또한, 선박은 선로에 이상전압이 발생하는 경우 전력계통의 안정성 확보를 위해 계통 접지(system earthing)를 적용하고 있다. 계통 접지는 전원(발전기)의 중성점과 대지(선체)를 연결하는 것으로 그 형태에 따라 비접지, 직접 접지, 저항접지, 리액터 접지로 구분된다.

구체적으로 살펴보면 전력수요가 크지 않아 450[V]를 사용하는 저전압 선박은 비접지 시스템을 채택한다. 비접지 시스템은 1선 완전 지락 고장(earth fault) 발생 시에도 전원의 연속성을 확보하기가 용이하여 선박 항해에 필수적인 전기 장비를 전력 중단없이 연속적으로 공급할 수 있는 특징을 가지고 있다. 그러나 지락 고장 시 경우에 따라 매우 큰 과도 과전압(transient overvoltage)이 발생할 수 있는 문제점도 가지고 있으므로 시스템 설계 시 케이블 절연에 관한 부분을 반드시 고려해야 한다. 한편, 최근 선박이 고도화 대형화됨에 따라 전력수요가 증가하여 6.6[kV]를 사용하는 고전압 선박에서는 고저항 접지 시스템을 주로 적용한다. 이는 비접지 시스템에서 발생하는 과도 과전압을 감소시켜 전력 시스템을 보호할 수 있기 때문이며, 전력 배전 시스템의 규모가 커져 대지 정전용량이 큰 선박이나 해양플랜트의 경우에는 저저항 접지 시스템을 적용하거나 지락 고장 발생 시 알람기능 보다는 트립기능을 가지는 고저항 접지 시스템을 적용하기도 한다[2-3].

선박에서 발생할 수 있는 지락 고장의 형태는 완전 지락 고장(bolted earth fault)과 아킹 지락 고장(arcing earth fault)으로 구분된다. 이러한 고장으로 인한 전력 계통 내 교란, 인체 위해 그리고 잠재적 위험을 제어하기 위한 방법으로 사용되는 것이 중성점 접지이다[4-5]. 지락 고장 시 발생하는 대표적인 전력계통 교란은 대지 전압이 상승하는 것이다. 이는 케이블의 절연에 직접적인 악영향을 주게 되고, 이를 방지할 경우 선체를 통한 선간 단락이나 발전기 권선의 절연 파괴와 같은 위험한 상황을 초래할 수 있다. 따라서 케이블의 절연강도(레벨)를 설계할 때에는 접지 시스템의 형태, 지락 고장 발생 시 고장 제거 시간을 반드시 고려해야 한다[6-8].

이처럼 선박에서 매우 비중 있게 다루어지는 지락 사고는 지락 정도에 따라 대지 전압의 특성이 변동하므로 이를 해석하고, 분석하는 것은 매우 중요한 부분이다. 지

락 사고는 대표적인 3상 불평형 고장이며 이를 해석함에 있어 매우 유용하게 사용되는 수학적 기법이 바로 대칭 좌표법(symmetrical coordinates method)이다.

따라서 본 논문에서는 선박에서 주로 채택하고 있는 고저항 접지 및 비접지 시스템에 대해 지락 고장 시 지락 정도에 따른 선박 전력계통의 대지 전압의 변동 특성을 대칭 좌표법을 이용하여 분석하고자 한다. 이를 위해 우선 접지 시스템 종류에 따른 특성을 알아보고, 선박 전력 계통에서 적용하고 있는 접지 시스템에 대해 각 상의 대지 전압을 대칭 좌표법으로 모델링을 한다.

최종적으로 실제 선박의 전력 시스템 파라미터를 적용한 대지 전압 모델에 MATLAB(R2014a)으로 시뮬레이션을 실시하여 지락 사고 시 대지 전압 변동 특성을 분석하고자 한다.

2. 계통 접지의 방법과 특성

계통 접지의 일반적인 목적은 고·저압 혼축 사고 또는 번개 등으로 인해 유발되는 전압을 억제하고 정상 운전 하에서 전압을 안정적으로 유지하는 것이다[9]. 이러한 계통 접지는 전원의 중성점과 대지 간 임피던스 연결 형태에 따라 비접지, 직접 접지, 저항접지 등으로 구분된다. 계통 접지방식의 적용은 전원의 중성점에 연결되는 임피던스의 유무와 지락 고장 시 전원 공급 연속성의 필요성을 고려하여 선택하게 된다.

본 장에서는 선박에서 적용하고 있는 대표적인 접지방식인 비접지와 저항접지 시스템에 대해서 살펴보고자 한다.

2.1 비접지 시스템

비접지 시스템은 선박의 발전기 중성점과 선체 사이에 물리적인 연결을 하지 않지만 대지 정전용량으로 연결되어 있는 형태이다.

비접지 시스템은 1선 완전 지락 고장이 발생할 때 부하에 전원 공급의 연속성을 보장할 수 있고, 지락 전류가 매우 작은 장점 때문에 선박에서 이 방식을 채택하고 있다.

그러나 1선 완전 지락 고장 시 Fig. 1과 같이 건전상의 대지 전압이 고장 전보다 $\sqrt{3}$ 배 증가하고, 계속 고장 상태가 유지되면 상승한 대지 전압으로 인해 절연물의 상태를 악화시키게 된다. 또한, 재점호(restriking)나 간헐적인 지락 고장으로 인한 아킹 지락 고장이 발생하면 과도 과전압이 발생하고, 대지 전압이 5.5배 상승하여 전체 전기 시스템의 절연물 상태를 더욱 악화시키는 특성

을 가지고 있다[10].

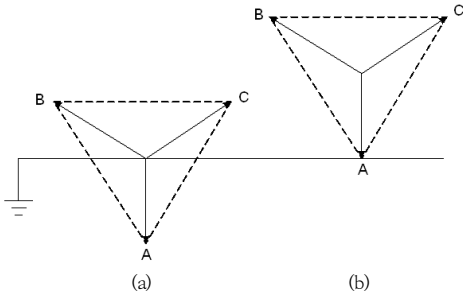


Fig. 1. Voltage displacement during earth fault on unearthened system
(a) Normal condition (b) Single-to-ground fault condition

2.2 저항접지 시스템

저항접지 시스템은 발전기의 중성점과 선체 사이에 임의의 저항으로 연결하여 지락 전류를 제한하는 방식이다. 지락 고장이 발생할 경우, 대지 전압은 비접지 시스템과 유사하지만, 과도 과전압 크기가 비접지 시스템보다 많이 제한되는 특징이 있다. 이 시스템은 지락 고장 시 허용되는 지락 전류의 크기에 따라 고저항 접지(high resistance earthed system)와 저저항 접지(low resistance earthed system)로 구분되며 Fig. 2는 고저항 접지 시스템으로 사용되는 실제 선박의 NER(Neutral Earth Resistor)의 내부 모습을 나타낸 것이다.



Fig. 2. NER for ships

규격(standard)에서는 특별히 규정하는 바는 없지만, 일반적으로 고저항 접지는 지락 전류의 크기가 10[A] 이하이고, 저저항 접지는 최소 100[A]이나 보통 200~1,000[A] 범위를 갖는다[2].

저항접지 시스템은 1선 완전 지락 고장 시 건전상의 대지 전압을 고장 전의 $\sqrt{3}$ 배로 상승시키고, 야킹 지락 고장 시에는 건전상의 대지 전압을 고장 전의 250%에 해당하는 과도 과전압을 부과하는 특성을 가지고 있다.

이처럼 고장에 따라 증가되는 대지 전압은 건전상의 절연시스템에 압력(stress)을 가하므로 절연에 악영향을 미치게 된다[2][11].

2.2.1 고저항 접지 시스템

고저항 접지 시스템은 일반적으로 6.6[kV]를 사용하는 고전압 선박에서 주로 적용되며 지락점의 지락 전류가 10[A] 이하인 경우를 말한다. 이 전류는 중성점 저항으로 흐르는 전류와 대지 정전용량을 통해 흐르는 충전전류의 벡터 합이며, 중성점 저항 크기는 중성점 저항전류가 충전전류와 같거나 크도록 설계한다[4][9].

한편, 지락 사고 발생 시 지락 전류가 작아 지락 고장 감지가 어려우므로 전력계통의 상시 절연감시장치가 필요하다. 만약, 지락 사고를 장시간 방치하면 계통 내 증가된 대지 전압으로 케이블의 절연에 과도한 압력이 가해지고 심한 경우 단락 사고로 확대될 수 있으므로 지락 고장 발생 즉시 해결해야 한다.

2.2.2 저저항 접지 시스템

저저항 접지 시스템은 전력 배전 규모가 커서 대지 정전용량이 큰 선박이나 해양플랜트에 적용되며 지락 고장 시 계통의 충전전류보다 중성점 저항으로 흐르는 전류를 더 크게 설계하므로 고저항 접지 시스템과 달리 지락 충전전류를 고려할 필요가 없다.

이 시스템은 수 사이클 정도의 시간이 지나면 보호 계전기가 동작하여 지락 고장 회로를 제거하므로 절연시스템에 증가된 압력이 가해지는 시간이 매우 짧은 특징이 있다. 그러나 지락점에서 손상이 크지 않도록 중성점 저항 크기를 유의해서 선정해야 한다.

3. 1선 지락 사고의 대지 전압 모델링

정상상태의 3상 회로는 모든 전압과 전류 및 선로의 모든 정수들이 평형상태를 유지하므로 회로의 특성을 해석하는 것이 어렵지 않다. 그러나 지락 고장이 발생하거나 부하가 불평형이 되면 전압과 전류가 불규칙한 위상차를 가지기 때문에 회로해석이 매우 곤란하게 된다. 이를 해결하는 데 유용하게 사용되는 대칭 좌표법은 불평형 전압과 전류를 대칭적인 3개 성분인 정상분, 역상분, 영상분으로 나누어 각각을 독립적으로 존재하는 경우의 계산을 하고, 다시 그 결과를 중첩해서 불평형 값을 해석하는 방법이다[12].

따라서 본 장에서는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 선박의 접지 시스템을 대칭 좌표법으로 모델링하여 1선 지락 사고 시 각 상의 대지 전압의 특성을 해석하고자 한다.

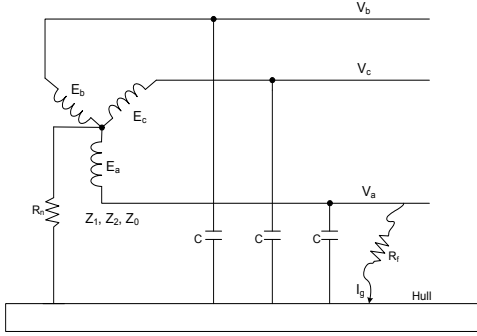


Fig. 3. Single line-to-earth fault of resistance earthed system for ships

그림에서 $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ 는 120° 위상차를 갖는 발전기의 유기 기전력, $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_0$ 는 발전기의 정상, 역상, 영상 임피던스, $\dot{V}_a, \dot{V}_b, \dot{V}_c$ 는 각 상의 대지 전압, C 는 대지 정전용량, R_n 은 발전기의 중성점 접지저항, R_f 는 지락 고장 점에서의 저항을 의미한다.

Fig. 3에서와 같이 a상에서 지락 고장이 발생하면 발전기 중성점 접지 저항과 대지 정전용량으로 지락 전류 I_y 가 흐르게 되며 건전상의 대지 전압은 불균형이 발생한다. 이러한 대지 전압의 불평형 특성을 대칭 좌표법을 이용하여 확인한다.

대칭 좌표법을 이용하여 지락점의 저항과 발전기 중성점 저항이 있는 경우의 1선 지락 사고에 대한 대칭분 등가회로를 표현하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

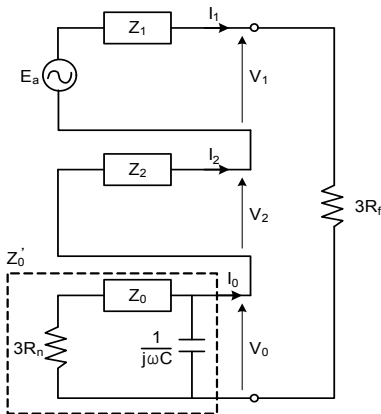


Fig. 4. Symmetrical equivalent circuit of single line-to-earth fault for "a phase"

그림에서 \dot{E}_a 는 a상의 유기 기전력, $\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dot{V}_0$ 는 정상, 역상, 영상 전압, $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ 는 정상, 역상, 영상 전류이다. \dot{Z}_0 는 중성점 접지저항과 대지 정전용량을 합성한 영상 임피던스로 다음과 같다.

$$\dot{Z}'_0 = \frac{1}{\frac{1}{3R_n + \dot{Z}_0} + j\omega C} \quad (1)$$

1선 지락 사고 대칭분 등가회로에서 영상 전류를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}'_0 + 3R_f} \quad (2)$$

그림에서 확인할 수 있듯이 1선 지락 사고는 정상, 역상, 영상 전류가 동일하므로 대칭분 발전기 기본 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_a - \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = \dot{E}_a - \dot{I}_0 \dot{Z}_1 \quad (3)$$

$$\dot{V}_2 = -\dot{I}_2 \dot{Z}_2 = -\dot{I}_0 \dot{Z}_2$$

$$\dot{V}_0 = -\dot{I}_0 \dot{Z}'_0$$

Eq. (2)와 Eq. (3)을 이용하여 각 상의 대지 전압 $\dot{V}_a, \dot{V}_b, \dot{V}_c$ 를 대칭 좌표법으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \\ &= \frac{3R_f}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}'_0 + 3R_f} \dot{E}_a \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_0 + a^2 \dot{V}_1 + a \dot{V}_2 \\ &= \frac{\dot{Z}'_0(a^2 - 1) + \dot{Z}_2(a^2 - a) + 3a^2 R_f}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}'_0 + 3R_f} \dot{E}_a \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= \dot{V}_0 + a \dot{V}_1 + a^2 \dot{V}_2 \\ &= \frac{\dot{Z}'_0(a - 1) + \dot{Z}_2(a - a^2) + 3a R_f}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}'_0 + 3R_f} \dot{E}_a \end{aligned}$$

여기서, a 는 벡터 연산자로 $e^{-j\frac{2}{3}\pi}$ 를 의미한다.

4. 지락 고장 시 대지 전압 변동 특성

본 장에서는 선박에서 일반적으로 적용하는 고저항 접지 시스템과 비접지 시스템에 대해 3장의 모델링과 MATLAB을 사용하여 지락 고장 시 각 상의 대지 전압 변화 특성을 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다.

시뮬레이션을 위한 선박의 데이터는 대상 선박의 실제 도면을 참고하였고, 일부의 데이터는 접지 시스템의 특성을 고려하여 선정하였다.

4.1 6.6[kV] 고전압 선박의 고저항 접지 시스템

Table 1은 시뮬레이션에 사용된 데이터를 나타낸 것이다.

Table 1. Parameters of HV system for simulation

Ship drawing data			
V_a, V_b, V_c	3.810[V]	Z_0	j0.01[pu]
Z_1	j0.127[pu]	P_a	5.067[kVA]
Z_2	j0.11[pu]	R_f	1[GΩ]
Selected data			
R_n	538[Ω]	C	1.64[μF]

R_n 과 C 는 1선 완전 지락 시 지락 전류가 10[A], 이 때 충성점 저장전류 7.07[A], 충전전류 7.07[A]가 되도록 선정하였다[2].

먼저 1선 지락 고장이 발생했을 때 지락점의 절연저항의 변화에 따라 각 상의 대지 전압의 변화 특성을 확인해 본다.

Fig. 5는 a상 지락 고장을 가정하고, 지락점 절연저항이 감소함에 따른 대지 전압 변동 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 지락점 절연저항이 감소함에 따라 a상의 대지 전압이 감소하며 1[kΩ] 보다 작아지면서 급격히 감소하고, b상과 c상은 반대로 급격히 상승한다. 지락점 절연저항이 1[kΩ] 일 때 각상의 대지 전압은 $V_a=2,936[V]$, $V_b=3,914[V]$, $V_c=4,834[V]$ 이고, 지락점 저항이 0[Ω]일 때 a상은 완전 지락이므로 $V_a=0[V]$ 이고, $V_b=6,603[V]$, $V_c=6,609[V]$ 로 상승한다.

지락 고장 상을 판별할 때는 그림에서 확인할 수 있듯이 지락점 절연저항이 감소함에 따라 고장 상의 대지 전압이 가장 작기 때문에 대지 전압이 가장 작은 상을 고장 상으로 판단할 수 있다.

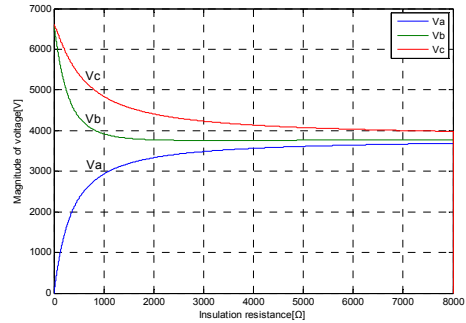


Fig. 5. The characteristic of line-to-earth voltage ($R_n=538 [Ω]$, $C=1.64[μF]$) for high resistance earthed system

실제적인 관점에서 고저항 접지 시스템 적용을 위한 1상당 대지 정전용량은 1.64[μF]이 최대이지만[2], 이보다 배전계통이 커져 대지 정전용량이 증가된 경우도 검토해 보기로 한다.

Fig. 6은 대지 정전용량이 10배 커진 $C=16.4[μF]$ 인 경우 a상의 절연 불량에 따른 대지 전압의 변동 특성을 나타낸 것이다.

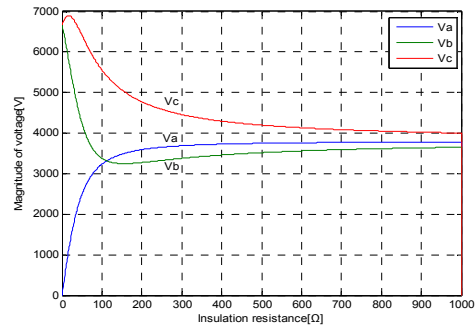


Fig. 6. The characteristic of line-to-earth voltage ($R_n=538[Ω]$, $C=16.4[μF]$) for high resistance earthed system

그림에서 지락점 절연저항이 400[Ω] 부근에서 각 상의 대지 전압은 $V_a=3,728[V]$, $V_b=3,462[V]$, $V_c=4,291[V]$ 이며 이후 급격히 변동하는 것을 확인할 수 있다.

b상의 대지 전압은 절연저항이 155[Ω]에서 3,252[V]까지 감소하다가 그 이후에 급격히 증가하며, 이후 112[Ω]에서 3,316[V]로 a상과 같아진 후 계속 상승하여 지락점 절연저항이 0[Ω]일 때 6,606[V]까지 상승한다. c상의 대지 전압은 지락 사고 시 3상 중 항상 가장 크고, 지

락점 절연저항이 16[Ω]일 때 c상의 전압은 6,839[V]까지 상승하는 것을 볼 수 있다.

한국선급 및 강선규칙 제6편 제15절 '고전압 전기설비'에 따르면 지락 사고 시 고 임피던스 접지계통 설비의 절연은 상간 전압을 기준으로 설계해야[13] 하지만 이 경우에 설비의 대지 전압이 상간 전압을 초과하게 되므로 설비 절연에 심각한 악영향을 줄 수 있는 것을 알 수 있다.

고장 상인 a상의 대지 전압은 지락점 절연저항이 112[Ω]까지는 위상이 120° 뒤진 b상보다 대지 전압이 높게 나타나며 각 상의 대지 전압의 크기 순서는 c상 > a상(고장 상) > b상이다. 그러나 지락점 절연저항이 112 [Ω]보다 작아지면 대지 전압의 크기 순서는 c상 > b상 > a상(고장 상)으로 a상과 b상의 크기가 바뀌는 것을 알 수 있다.

즉, 이와 같이 대지 정전용량이 큰 전력 시스템의 경우에는 지락 고장 상 판별을 Fig. 5의 방법과 동일하게 가장 작은 대지 전압을 나타내는 상으로 선택하면 안 된다는 것을 의미한다. 즉, 고장 상은 대지 전압이 가장 높은 상을 확인한 후 그보다 위상이 120° 뒤진 상으로 판별해야 한다. 이 방법은 Fig. 5에도 동일하게 적용할 수 있으므로 이와 같은 방법이 가장 확실한 고장 상 판별방법이라 할 수 있다.

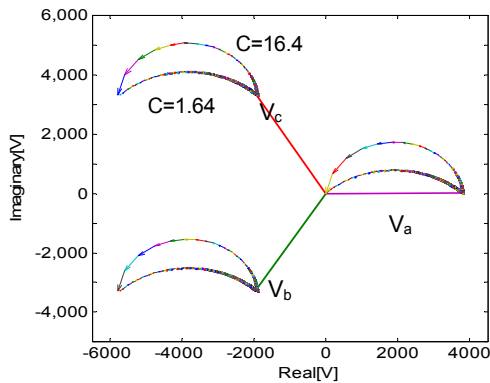


Fig. 7. Locus of the line-to-earth voltage according to capacitance of earth ($C=1.64[\mu\text{F}]$ and $C=16.4[\mu\text{F}]$) for high resistance earthed system

Fig. 7은 앞에서 살펴본 대지 정전용량이 1.64[μF], 16.4[μF]인 두 경우에 대해 a상의 지락점 절연저항 감소에 따른 3상의 대지 전압의 변동 특성을 벡터도 형태로 나타낸 것이다. 고장 전에는 각 상의 대지 전압은 120°의 위상차로 그 크기가 동일하였으나 1선 지락이 진행됨에 따라 반시계방향으로 각 상의 대지 전압 벡터가 이동

하는 것을 확인할 수 있다. 완전 1선 지락 시에는 건전한 2개 상의 위상차가 60°이고, 크기가 증가된 것을 볼 수 있다. 또한, 대지 정전용량이 큰 경우 이동 반경이 더 큰 것을 알 수 있고, 이는 대지 정전용량이 클수록 건전상의 대지 전압이 더 크게 증가하는 것을 의미한다.

4.2 450[V] 저전압 선박의 비접지 시스템

Table 2는 시뮬레이션을 위해 사용한 해당 선박의 데이터를 정리한 것이다. 비접지 시스템이므로 R_n 은 개방되어 있고, 실제 선박의 발전기 용량을 고려하여 C 를 0.82[μF]으로 선정하였다.

Table 2. Parameters of LV system for simulation

Ship drawing data			
V_a, V_b, V_c	260[V]	Z_0	j0.01[pu]
Z_1	j0.135[pu]	P_a	2.875[kVA]
Z_2	j0.12[pu]	R_f	1[GΩ]
Selected data			
R_n	open	C	0.82[μF]

먼저, 1선 지락 고장이 발생했을 때 지락점의 절연저항 감소에 따른 각 상의 대지 전압 변동추이를 확인해 본다.

Fig. 8은 a상 지락 고장 발생 시 각 상의 대지 전압 변동 특성을 나타낸 것이다.

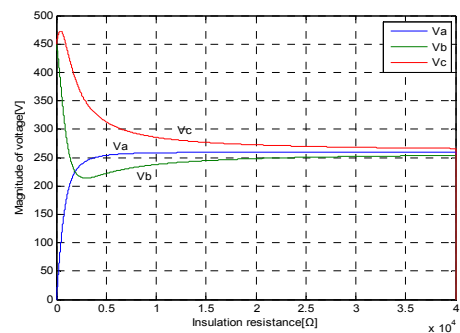


Fig. 8. The characteristic of line-to-earth voltage (R_n =open, $C=0.82[\mu\text{F}]$) for unearthed system

지락점의 절연저항이 10[kΩ]까지는 대지 전압의 큰 변화가 없어 건전상의 케이블 절연에는 큰 영향이 없다고 할 수 있으나 6.498[kΩ]에서 c상의 대지 전압이 급격히 증가하며 크기는 $V_c = 300[V]$ 이다. Fig. 6의 경우와

같이 b상의 대지 전압은 절연저항이 2.892[k Ω]에서 213.7[V]까지 감소하다가 그 이후에 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 이후 1.867[k Ω]에서 a상과 225[V]로 같아진 후 최종적으로 선간전압인 450[V]까지 상승한다. c상의 대지 전압은 지락점 저항이 400[Ω]일 때 473[V]까지 최대로 상승하고 지락점 저항이 0[Ω]이 되면 450[V]로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

고장 상인 a상의 대지 전압은 지락점 절연저항이 1.867[k Ω]까지는 위상이 120° 뒤진 b상보다 대지 전압이 높게 나므로 대지 전압의 크기가 c상 > a상(고장 상) > b상 순이며, 지락점 저항이 1.867[k Ω]보다 작아지면 대지 전압의 크기가 c상 > b상 > a상(고장 상)인 것을 알 수 있다. 여기서도 지락 고장을 판별할 때는 대지 전압이 가장 높은 상을 확인한 후 그보다 위상이 120° 뒤진 상을 고장 상으로 결정해야 함을 확인할 수 있다.

용량이 작은 발전기를 사용하는 선박은 배전용량이 감소한 것이고, 이는 대지 정전용량의 감소를 의미한다. Fig. 9는 이에 대한 대지 전압 변동 특성을 나타낸 것으로 대지 정전용량이 Fig. 8에 비해 1/2로 감소한 것으로 가정하여 $C=0.41[\mu\text{F}]$ 로 선정하였다.

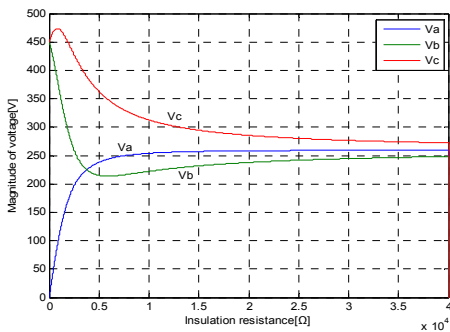


Fig. 9. The characteristic of line-to-earth voltage (R_n =open, $C=0.41[\mu\text{F}]$) for unearthed system

전체적인 경향은 Fig. 8과 유사한 것을 확인할 수 있다. 지락점의 절연저항이 20[k Ω]까지는 대지 전압의 큰 변화는 없어 건전상의 케이블 절연에는 큰 영향이 없다고 판단할 수 있고, 12.99[k Ω]부터 c상의 대지 전압이 급격히 증가하며 크기가 $V_c = 300[V]$ 에 이르고 있다. Fig. 8과 유사한 경향으로 b상의 대지 전압은 절연저항이 5.8[k Ω]에서 213.8[V]까지 감소하다 그 이후에 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 이후 3.735[k Ω] 부근에서 a상과 225[V]로 같아지고, 계속 전압이 상승하여 지락점 저항이 0[Ω]일 때 450[V]가 된다. 지락점 절연저

항이 800[Ω]일 때 c상의 전압은 최대 473[V]까지 상승하며 $C=0.82[\mu\text{F}]$ 인 경우와 같은 값을 나타내었다. 이 경우도 지락 고장 판별방법은 Fig. 8에서 설명한 방법과 동일하다.

Fig. 10은 위에서 고려한 두 가지의 대지 정전용량 즉, 0.82[μF], 0.41[μF]에 대해 a상의 고장점 절연저항이 감소할 때 3상의 대지 전압 벡터도를 동시에 나타낸 것이다.

지락 고장 전에는 각 상의 대지 전압은 동일한 크기로 120°의 위상차만 나타나고 있으나 1선 지락이 점점 진행됨에 따라 반시계방향으로 대지 전압 벡터가 이동하는 것을 볼 수 있다. 완전 1선 지락 시에는 건전한 2개 상의 위상차가 60°로 되고, 크기가 증가된 것을 볼 수 있다.

고저항 접지 시스템에서는 대지 정전용량이 커진 경우 대지 전압의 이동 반경이 더 큰 것을 확인할 수 있었으나 비접지 시스템에서는 정전용량이 증가한 경우에도 대지 전압의 이동 반경 특성에는 거의 영향을 주지 못하고 있음을 알 수 있다.

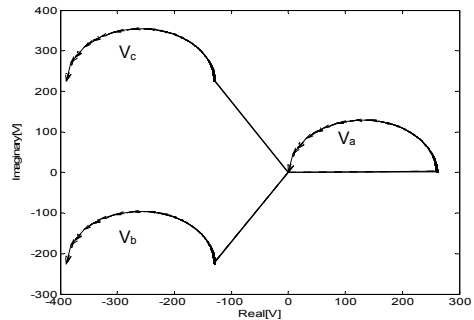


Fig. 10. Locus of the line-to-earth voltage according to capacitance of earth ($C=0.82[\mu\text{F}]$ and $C=0.41[\mu\text{F}]$) for unearthed system

5. 결론

선박의 전력수요가 증가함에 따라 고전압 시스템을 사용하고, 전원 공급의 연속성을 확보하기 위해 선박은 주로 고저항 접지 시스템과 비접지 시스템을 적용하고 있다. 본 논문에서는 현재 선박에서 적용하고 있는 이 두 가지 접지 시스템에 대해 선박의 설계 데이터를 기반으로 지락 사고 발생 상황을 대칭 좌표법으로 각 상의 대지 전압을 모델링하고, MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통해 각 상의 대지 전압 변동 특성을 분석하였다. 또한, 배

전용량을 고려하여 대지 정전용량이 다른 경우에 대해서도 함께 검토하였다.

6.6[kV] 고전압 선박에 적용하는 고저항 접지 시스템에서 1선 지락 사고 시 고장점 절연저항에 따라 고장 상의 대지 전압은 건전상의 대지 전압보다 크거나 낮게 나타날 수 있었으나, 고장 상보다 120° 빠른 건전상의 대지 전압이 항상 가장 높은 것을 알 수 있었다. 또한, 이상의 대지 전압의 최솟값은 대지 정전용량에 따라 발전기 선간전압보다 높아질 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

450[V] 저전압 선박에 적용되는 비접지 시스템에서 1선 지락 사고 시 고장점 절연저항의 변화에 대한 대지 전압 변동 특성은 고저항 접지 시스템과 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 대지 정전용량에 따른 대지 전압의 이동 경로는 대지 정전용량의 크기에는 크게 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 시뮬레이션을 통해 지락점의 절연저항이 어느 특정점에 이르면 대지 전압이 선간전압보다 높아지게 되고 이는 전력계통의 케이블 절연에 심각한 악영향을 줄 수 있다는 것을 파악할 수 있었다. 또한, 선박에서 1선 지락 사고 시 지락 고장 상을 판별할 때는 대지 전압이 가장 높은 상을 확인하고, 이보다 120° 뒤진 상을 고장 상으로 판별하는 것이 정확한 방법임을 확인하였다. 또한, 선박의 1선 지락 사고 시 지락점 절연저항의 크기에 따라 각 상의 대지 전압 벡터의 이동 특성도 확인할 수 있었다.

이와 같은 본 연구의 결과가 선박 기관사에게 지락 고장 상 특성과 고장 상의 판별에 유용한 방법으로 적용되기를 기대한다.

References

- [1] IEC 60092-509, "Electrical installation in ships - part 509: Operation of electrical installations", 2011.
- [2] IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, IEEE std. 142-2007.
- [3] D. Paul and S. I. Venugopalan, "Low-resistance grounding method for Medium-Voltage power systems", in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, pp. 1571-157, 1991.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.1991.178070>
- [4] L. J. Kingrey, R. D. Painter, and A. S. Locker, "Applying high resistance neutral grounding in medium voltage systems," IEEE Transactions on Industry Application, vol. 47, no. 3, pp. 1220-1231,

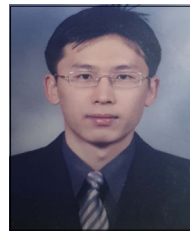
2011.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2126553>

- [5] J. R. Dunki-Jacobs, F. J. Shields, and C. St. Pierre, Industrial Power System Grounding Design Handbook. Dexter, MI: Thomson-Shore, 2007.
- [6] 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>
- [7] NEMA WC5-1992/ICEA S-61-402, Thermal Plastic Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy.
- [8] System Grounding for Low-voltage Power Systems, Catalog GET-3548(11-1975), Industrial Power System Engineering Operations, General Electric Company, Schenectady, NY 12345.
- [9] 2008 National Electrical Code Handbook, 11th ed., Nat. Fire Protection Assoc., Quincy, MA, 2008.
- [10] D. D. Shipp, and F. J. Angelini, "Characteristics of different power systems grounding techniques: fact & fiction," IEEE Trans. Ind. Appl. Ann. Mtg. Conf. Rec., 1988.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.1988.25261>
- [11] B. Bridger, "What to know about high resistance grounding," EC&M, pp. 37-46, Jul. 1994.
- [12] S.H. Yoo and 8 others, Practical application technology of protective relay system, Gidali, 2006.
- [13] KR, Part 6 Electrical Equipment and Control Systems, KR-Rules & Guidance, 2020.

김 종 필(Jong-Phil Kim)

[정회원]



- 2013년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 (공학석사)
- 2000년 3월 ~ 2006년 2월 : 현대상선 엔지니어
- 2006년 3월 ~ 2012년 6월 : 한국해양대학교 실습선 엔지니어
- 2012년 7월 ~ 현재 : 한국해양수산연수원 교수

<관심분야>

비선형제어, 최적제어, 선박전기 및 전력시스템

류 기 탁(Ki-Tak Ryu)

[정회원]



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

<관심분야>

비선형제어, 최적제어, 선박전기 및 전력시스템, AC드라이브

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>

유전알고리즘 이론 및 응용, 퍼지제어, 비선형제어, 시스템 식별, 선박전기 및 제어시스템