한국마린엔지니어링학회지 제35권 제8호, pp. 1117~1123, 2011. 11(ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2011.35.8.1117

선박 3상배전선로의 지락고장에 따른 대지전압 중성점의 이동경로 특성

최 순 만†

(원고접수일 : 2011년 9월 28일, 원고수정일 : 2011년 10월 29일, 심사완료일 : 2011년 11월 7일)

Characteristics of Neutral Point Loci on Line Voltages to Hull When Insulation Resistance Collapses by Earthing Faults at 3 Phase Power Distribution Systems Onboard Vessels

Soon-Man Choi†

요 약 : 비접지 배전방식이 채택되는 선박은 일선지락 상황에서도 정전사고로 이어지지 않으므로 상대적으로 안정적인 급전이 가능하다. 그러나 비접지 계통에서 발생하는 지락고장은 대지 전압을 왜곡시켜 선체에 대한 선로 전압을 상승시키므로 감전사고와 전기화재의 위험이 높아진다. 특히 선로와 선체 간에 작용하는 분포용량은 대지임피던스의 한 요소로서 지락고장 시 대지전압의 왜곡 특성에 큰 영향을 미친다. 이 같은 대지전압의 변화는 3상 대지전압 중성점의 이동에 의해 설명될 수 있다는 점에서 본 연구에서는 대지임피던스를 입력으로 할 때 대지전압을 출력으로 하는 연산모듈을 구성한 후 이를 이용하여 접지저항 변화에 대응하는 대지전압 중성점의 이동 경로 특성을 확인하였다. 또한 다양한 조건에서 나타나는 중성점 이동경로를 구하는 한편 실제 배전계통에서의 측정 결과와 비교함으로써 제시된 분석방법의 적정성을 나타내었다.

주제어 : 대지전압, 비접지 배전계통, 대지 임피던스, 분포정전용량

Abstract: Ungrounded power systems are adopted onboard vessels which enable more stabilized power supply even in case of electric leakage to hull. If earthing faults happen at these systems, they make grounding impedances of power lines unbalanced each other on the three phases, resulting in high voltages to hull which can bring more possibilities of electric shocks and electric fires. This study focuses on how to configure a calculation module for transferring a grounded condition by lowered insulation resistance into a vector diagram of the voltages to hull. By using the module, the loci of neutral points were acquired to analyze how voltages to hull are affected by earthing faults and the distributed capacitances between power lines and hull. The suggested module was simulated and compared to the measured values from a test power system in good results.

Key words: Voltage to ground, Ungrounded power system, Impedance to ground, distributed capacitance

1. 서 론

비접지 배전방식을 채택하고 있는 선박은 일선지락 고장에서도 안정된 급전이 가능할 뿐 아니라 누전 감시 또한 용이하다는 장점을 갖는다[1-4]. 그러나 지락고장의 상황에서는 선체와 배전선로 간 3상 대지 임피던스의 불균등으로 선로와 선체 사이에 작용하는 대지전압의 불평형이 초래되고 정도가 심하면 비접지 선로의 대지전압이 크게 증가하여 감전 위험과 스파크 발생으로 인한 화재위험이 커진다[5-6]. 특히 선로와 선체 사이에 존재하는 분포정전용량은 대지전압의 불평형 특성에 적지 않은 영향을 미치므로 대지전압

† 교신저자(한국해양수산연수원 교육연구처, E-mail: mindmind@chol.com, Tel: 051-620-5850)

특성의 해석에는 분포정전용량을 포함한 대지 임피던스 방정식의 해석이 필요하다.

한편, 대지전압의 왜곡형태는 대지전압 중성점의 위치로 나타낼 수 있으므로 대지임피던스 변화에 대한 중성점의 이동경로를 확인하는 것은 왜곡 특성의 윤곽을 알기 위한 효과적인 방법이 된다. 그러나 이러한 중성점 위치를 수동 계산으로 구하기는 매우 번잡하므로 컴퓨터를 이용한 연산모듈이 필수적이라는 점에서 본 연구에서는 분포용량과 함께 3상 선로에서의 접지저항 조건이 입력으로 주어지면 이로부터 벡터 방식의 중성점 위치가 프로그램에 의해 출력되는 연산모듈을 대지임피던스의 회로방정식을 이용하여 구성하였다. 이와 함께 구성된 연산모듈을 이용하여 접지저항 감소에 따른 중성점 이동의 궤적을 다양한 조건에서 얻은 후 선박배전계통에서 나타나는 중성점 궤적의 일반적인 이동경로 특성을 분석하였으며 그 결과를 실험용 배전선로로부터의 측정 결과와 비교함으로써 제시한 해석방법의 적정성을 나타내었다.

2. 대지회로의 해석

2.1 배전선로의 대지임피던스

Figure 1은 배전선로와 선체의 임피던스 결합을 전원 측과 함께 나타낸 것이다. n은 선로 임피던스 결합의 중성점이고 $\dot{V}_R$, $\dot{V}_S$, $\dot{V}_T$는 평형 3상 전원의 상전압이며 선로에 의한 분포용량은 각 상에서 동일 용량 C로 나타내었다. 정상 선로에서 각 상의 접지저항 R_R, R_S, R_T가 동일할 때 대지전압의 중성점 위치는 Figure 2에서 N 지점에 해당한다. 이때의 상전압 $\dot{V}_{RN}$, $\dot{V}_{SN}$, $\dot{V}_{TN}$ 크기는 서로 같고 각 선로의 대지 누설전류 $\dot{I}_R$, $\dot{I}_S$, $\dot{I}_T$는 이들에 대해 진상 위상을 갖는다. 여기에서 접지로 인해 대지 임피던스가 불균일해지면 중성점은 Figure 2의 N점에서 n으로 이동하여 정상 때와 비교할 때 중성점은 $\dot{V}_{nN}$ 만큼 편위된다.

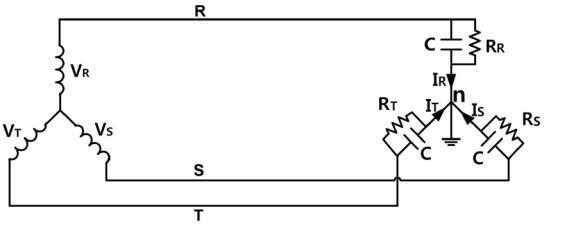

Figure 1: Power line circuit to ground

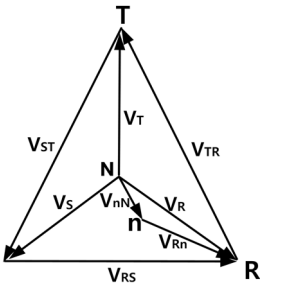

Figure 2: Voltages to Ground

2.2 대지임피던스, 누설전류 및 대지전압

대지전압 중성점의 편위 전압 $\dot{V}_{nN}$에 대한 크기와 위상 함수가 f_1 및 f_2이면 정상 시 평형 3상 대지전압 크기는 서로 같고 $\dot{V}_S = \dot{V}_R e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $\dot{V}_T = \dot{V}_R e^{j\frac{4\pi}{3}}$ 의 관계이므로 $\dot{V}_{nN}$은 식 (1)과 같이 5개의 변수로 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_{nN} = f_1(V_R, C, R_R, R_S, R_T) \angle f_2(C, R_R, R_S, R_T) \tag{1}$$

각 상의 분포용량이 서로 동일하다면 Fig. 1에서 접지저항에 의한 대지 임피던스 $\dot{Z}_R$, $\dot{Z}_S$, $\dot{Z}_T$는 식 (2), (3), (4)가 된다.

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

$$\dot{Z}_S = \frac{R_S(1 - j\omega R_S C)}{1 + \omega^2 R_S^2 C^2} \tag{3}$$

$$\dot{Z}_T = \frac{R_T(1 - j\omega R_T C)}{1 + \omega^2 R_T^2 C^2} \tag{4}$$

어느 임의 상태에서 중성점으로 작용하는 선체 전위 n에 대해 각 선로의 대지전압을 $\dot{V}_{Rn}$, $\dot{V}_{Sn}$, $\dot{V}_{Tn}$이라 하면 상전압과 중성점 편위전압 $\dot{V}_{nN}$은 식 (5)의 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_R &= \dot{V}_{Rn} + \dot{V}_{nN} \\ \dot{V}_S &= \dot{V}_{Sn} + \dot{V}_{nN} \\ \dot{V}_T &= \dot{V}_{Tn} + \dot{V}_{nN} \end{aligned} \tag{5}$$

또한, 대지전압은 대지임피던스와 누설전류의 곱이므로 식 (6)이 되고

$$\begin{aligned} \dot{V}_{Rn} &= \dot{I}_R \dot{Z}_R \\ \dot{V}_{Sn} &= \dot{I}_S \dot{Z}_S \\ \dot{V}_{Tn} &= \dot{I}_T \dot{Z}_T \end{aligned} \tag{6}$$

여기에서 각 선로로부터
선체로의 누설전류 $\dot{I}_R$, $\dot{I}_S$, $\dot{I}_T$ 는 식 (7)과 같이 합은 0이

$$\dot{I}_R + \dot{I}_S + \dot{I}_T = 0 \tag{7}$$

되어야 한다.

이로부터 식 (5),(6)을 식 (7)에 대입하면 식 (8)이 얻어진다.

$$\frac{\dot{V}_R - \dot{V}_{nN}}{\dot{Z}_R} + \frac{\dot{V}_S - \dot{V}_{nN}}{\dot{Z}_S} + \frac{\dot{V}_T - \dot{V}_{nN}}{\dot{Z}_T} = 0 \tag{8}$$

또한 식 (8)로부터 $\dot{V}_{nN}$을 최종 정리한 결과는 식 (9)이다.

$$\dot{V}_{nN} = \frac{\dot{Z}_R \dot{Z}_S \dot{V}_T + \dot{Z}_S \dot{Z}_T \dot{V}_R + \dot{Z}_T \dot{Z}_R \dot{V}_S}{\dot{Z}_R \dot{Z}_S + \dot{Z}_S \dot{Z}_T + \dot{Z}_T \dot{Z}_R} \tag{9}$$

2.3 $\dot{V}_{nN}$의 복소 계수

식 (2), (3), (4)의 임피던스 식을 식(9)에 대입하여 식 (1)을 복소함수로 나타내면 식 (9)의 분모 측 복소계수 α_1, β_1과 분자 측 복소계수 α_2, β_2로 구분되고 또한 식 (10)과 같이 최종 복소함수의 실수부와 허수부 결과는 V_X, V_Y가 된다.

$$\dot{V}_{nN} = \frac{\alpha_2 + j\beta_2}{\alpha_1 + j\beta_1} = V_X + j\,V_Y \tag{10}$$

한편, 식 (9)에서 최종 복소함수 V_X, V_Y를 직접 나타내기는 연산과정이 복잡해지므로 대신 α_1, β_1과 α_2, β_2 의 함수만을 정하고 이후 어느 주어진 입력에 대해 α_1, β_1과 α_2, β_2의 수치적 값이 구해지면 이로부터 V_X, V_Y의 값을 나타낼 수 있다. 식 (2), (3), (4)와 식 (9)로부터 복소계수 α_1, β_1, α_2, β_2 함수는 식 (11), (12), (13), (14)와 같이 정리된다.

$$\alpha_1 = R_{RS}k_{RS}k_T + R_{ST}k_{ST}k_R + R_{TR}k_{TR}k_S \tag{11}$$

$$\beta_1 = -k_1\{R_{RS}R_{R+S}k_T + R_{ST}R_{S+T}k_R + R_{RS}R_{R+S}k_T\} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 = {} & 2R_{RS}k_Rk_T - R_{TR}\{k_{RS} + \sqrt{3}\,k_1R_{T+R}\}k_S \\ & - R_{RS}\{k_{RS} - \sqrt{3}\,k_1R_{R+S}\}k_T \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \beta_2 = k_1\{ & -2R_{ST}R_{S+T}k_R + R_{TR}(R_{T+R} - \frac{\sqrt{3}}{k_1}k_{TR})k_R \\ & + R_{RS}(R_{R+S} + \frac{\sqrt{3}}{k_1}k_{RS} - \sqrt{3}\,k_1R_{R+S})k_T\ \} \end{aligned} \tag{14}$$

단, 여기에서

$k_1 = \omega C$, $k_2 = \omega^2 C^2$,

$R_{RS} = R_R R_S$, $R_{ST} = R_S R_T$, $R_{TR} = R_T R_R$,

$k_R = 1 + k_2 {R_R}^2$, $k_S = 1 + k_2 {R_S}^2$, $k_T = 1 + k_2 {R_T}^2$

$k_{RS} = 1 - k_2 R_{RS}$, $k_{ST} = 1 - k_2 R_{ST}$, $k_{TR} = 1 - k_2 R_{TR}$

이다.

또한, V_X 와 V_Y는 복소함수의 관계로부터

식 (15), (16)와 같고 식 (17)은 중성점의 편각을 나타낸다.

$$V_X = \frac{|V_P|}{2}\frac{(\alpha_1\alpha_2 + \beta_1\beta_2)}{\alpha_1^2 + \beta_1^2} \tag{15}$$

$$V_Y = \frac{|V_P|}{2}\frac{(\alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1)}{\alpha_1^2 + \beta_1^2} \tag{16}$$

$$\phi_{nN} = \tan^{-1}\frac{\alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1}{\alpha_1\alpha_2 + \beta_1\beta_2} \tag{17}$$

3. 연산모듈의 구성

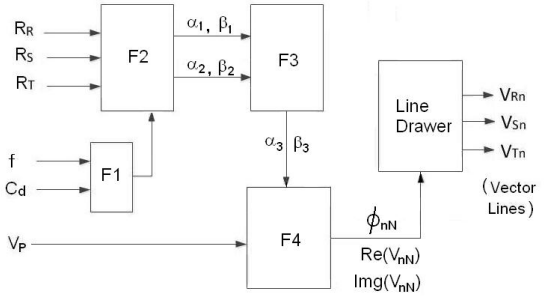

Figure 3: Block Diagram of Module Configuration

Figure 3은 앞서 정리된 수식을 토대로 구성한 연산모듈의 블록선도이며 R_R, R_S, R_T의 절연저항과 f, C_d의 전원 주파수 및 분포용량이 입력값으로 주어진다. 또한 V_P는 평형상태의 3상전원이 갖는 상전압 크기이고 복소계수 α_1, α_2, β_1, β_2 수치 값이 블록 F_2에서 출력된다. 이로부터 블록 F_3는 복소계수 V_X와 V_Y를 계산하고 F_4는 상전압 크기를 입력 받아 $Re(\dot{V}_{nN})$, $Img(\dot{V}_{nN})$ 및 편각 ϕ_{nN}을 출력한다. 이와 같이 중성점 위치가 정해지면 이 결과는 블록 Line Drawer에 읽혀져서 벡터 전압을 그래픽 형태로 출력한다.

4. 분석결과

Figure 4는 R상 선로가 접지되는 과정에서 나타나는 중성점의 이동경로를 연산모듈이 보인 것으로 반원 모양의 궤적이다. 경로에서의 화살표는 접지저항 저하 시 시계반대 방향의 이동을 표시하고 있으며 N 점은 정상상태에서의 중성점 위치이다. V_{RN}, V_{SN}, V_{TN}은 정상 상태에서의 각 상 대지전압을 나타내고 3상 220[V] 계통을 대상으로 함에 따라 전원 측 상전압 크기 V_P는 127[V]로 주어졌다. 분포정전용량 C_d는 0.1[μF]으로 설정하였으며 절연저항은 각 상에서 모두 1.0[$M\Omega$]의 주어진 후 절연저항 R_R만을 지속적으로 감소시킨 때의 $\dot{V}_{nN}$ 궤적이다. 여기에서 가로축과 세로축의 눈금은 상전압 크기의 배율을 나타낸다. 궤적에서의 n 표시는 경로 상에 놓인 중성점의 한 지점을 나타낸 것이고 이 경우 3상 대지전압 크기는 $|\dot{V}_{Rn}| < |\dot{V}_{Sn}| < |\dot{V}_{Tn}|$의 관계가 된다.

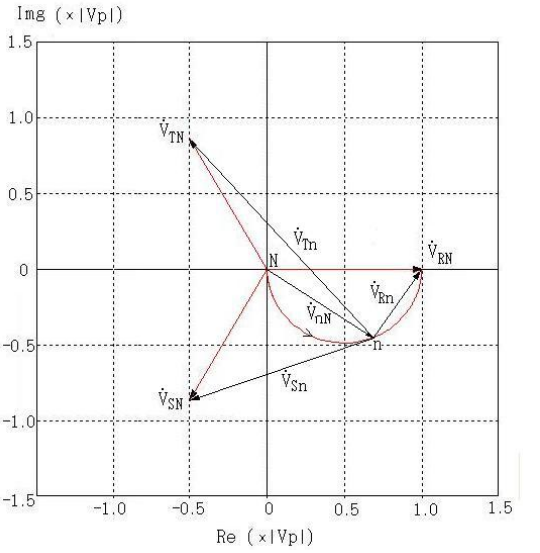

Figure 4: Loci of neutral point with R line being grounded (Cd=0.1[μF], RR:1[MΩ] -> 0)

Figure 4에서와 동일한 조건이나 S상에서의 접지저항을 감소시켜 나간 결과는 Figure 5와 같이 나타난다. 결국, 모든 상에서 동일한 결과를 나타낸다는 점에서 어느 선로가 접지되는 경우 중성점 위치는 상전압 벡터에 대해 지상특성의 반원궤적 형태를 갖는다는 것을 알 수 있다.

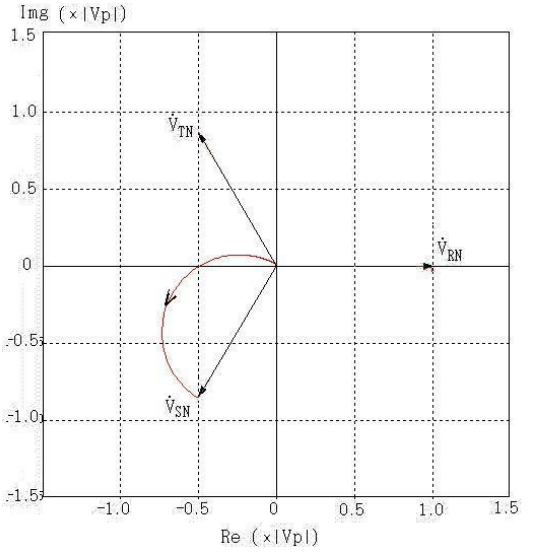

Figure 5: Loci of neutral point with S line being grounded (Cd=0.1[μF], RR:1[MΩ] -> 0)

한편, Figure 6은 분포정전용량 크기에 따른 영향을 확인하기 위해 C_d= 0[μF], 0.001[μF], 0.01[μF],0.1[μF], 1.0[μF]의 5 경우에 대해 얻은 궤적들이며 이를 순서대로 A, B, C, D, E로 구분하여 표시하였다. 이로부터 배전계통이 매우 소규모여서 정전용량 크기가 무시될 수 있는 경우의 중성점 편각은 0이 됨을 알 수 있으며 정전용량 증가에 따라 점차 지상위상이 커지고 최종적으로 반원 모양에 이르고 경로에 관계없이 완전 접지인 상태에서는 동일 지점에 수렴하고 있다. 특히 0.1[μF], 1.0[μF]의 경로인 D, E가 중첩함에 따라 정전용량이 일정 이상 커지는 경우 동일한 반원 모양의 궤적을 보인다.

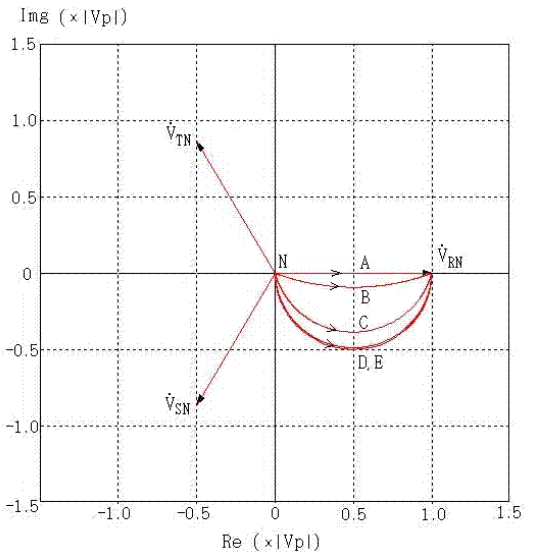

Figure 6: Loci at 5 cases of Cd

Figure 7은 각 선로의 초기 접지저항이 1.0[$M\Omega$]인 상태에서 R상 절연저항 R_R만을 감소시켜 나간 때의 궤적이다. 또한 실제 실험 선로에서 측정을 통해 얻은 중성점 위치와 연산모듈의 결과를 5개 지점에서 비교하였다. 이를 위해 3상 220[V]의 소규모 전원계통에서 각 선로의 대지정전용량을 0.1[μF]로 맞추기 위해 고전압 콘덴서들을 조합하여 선로와 접지 간에 병렬로 연결하였으며 이와 함께 R상에는 탄소저항을 연결하여 접지저항을 단계적으로 감소시켰으며 각 단계 a, b, c, d, e 경우에 대한 측정 결과는 Table 1과 같다. Table 1에서의 대지전압 측정치로 중성점 위치를 구하는 데에는 컴퍼스를 이용하는 방법이 사용되었으며 Figure 7의 좌표 상 표시된 작은 원

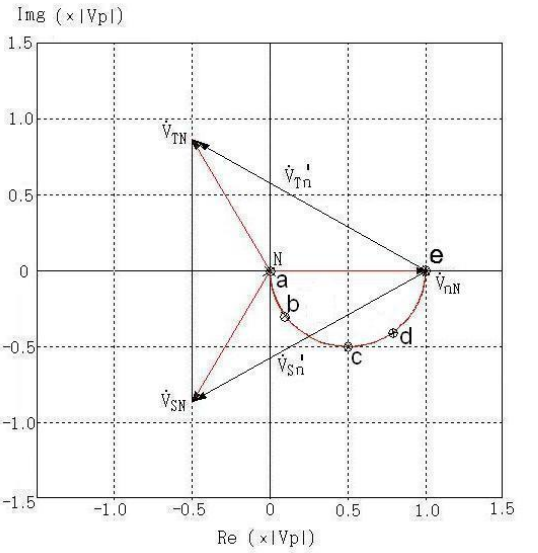

Figure 7: Measured results at 5 cases of RR (Cd=0.001[μF])

Table 1: Measured values at 5 cases

	접지저항 R_R, R_S, R_T	$\|V_{Rn}\|$ 측정치	$\|V_{Sn}\|$ 측정치	$\|V_{Tn}\|$ 측정치	연산모듈의 V_X, V_Y[V]
a	1[MΩ],1[MΩ],1[MΩ]	130.3	129.4	128.6	0, 0
b	25[kΩ],1[MΩ],1[MΩ]	119.1	116.4	165.8	14.3, 37.1
c	8.6[kΩ],1[MΩ],1[MΩ]	87.6	1136.2	212.3	64.0, 60.2
d	3.3[kΩ],1[MΩ],1[MΩ]	47.4	183.2	229.1	109.6, 40.4
e	0[Ω],1[MΩ],1[MΩ]	0	223.9	223.2	127.0, 0

a, b, c, d, e 가 그 결과이다. c점의 편각은 $\pi/4$인 때이고 완전 접지 상태인 e점의 경우 R상 대지전압은 0이다. 이때의 T상 및 S상의 대지전압은 $\dot{V}_{Sn}'$와 $\dot{V}_{Tn}'$로 표시되었으며 그 크기는 3상 전원의 선간전압과 같아짐을 알 수 있다. 각각의 실측에 의한 중성점은 모두 연산모듈이 나타내는 중성점과 거의 일치된 결과를 보이는 한편, 접지 진행에 따른 경로의 궤적에 놓여 있으므로 이로부터 연산에 의한 중성점 위치가 적정하다는 것이 확인된다. Table 1 우측 열의 V_X, V_Y는 중성점 위치인 X축과 Y축의 전압을 표시한 것이다.

5. 결 론

비접지 배전계통 선박에서의 대지 임피던스 불균일로 나타나는 3상 선로 대지 전압의 불평형 특성을 확인하기 위해 대지전압 방정식으로부터 중성점 좌표의 출력이 가능한 연산모듈을 구성하였으며 이로부터 접지저항 저하에 따른 중성점의 이동경로를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

지락고장으로 절연저항이 감소하는 경우 대지전압의 중성점은 선로와 선체 사이에 작용하는 분포 정전용량으로 인해 일정한 형태의 경로를 거치게 된다. 따라서 어느 선로에서 절연저항이 점진적으로 저하하는 상황이 주어질 때 중성점은 처음의 원점 위치에서 출발하여 위상이 지상으로 편각되면서 호의 형태인 궤적을 나타내었다. 이후 반시계방향 경로를 거친 후 정상인 때의 대지전압 위치로 수렴하였으며 또한 정전용량 크기가 일정 이상이면 해당 선로의 접지저항 감소에 따라 중성점 이동경로는 항상 반원 형태의 궤적을 갖는다는 것을 알 수 있으며 정전용량이 0인 경우는 직선적인 경로가 되었다. 따라서 중성점 궤적이 나타내는 호의 곡률 형태는 해당 배전계통이 갖는 분포정전용량 특성값을 가늠할 수 있는 척도가 될 수 있었으며 이와 함께 연산모듈이 출력한 중성점들과 실험에서 측정된 중성점은 서로 같은 위치를 나타냄에 따라 궤적의 특성을 분석하기 위해 연구에서 사용한 연산모듈이 적정한 동작을 나타낸다는 것을 확인하였다.

참고문헌

[1] 한만춘, 김준현, 송전공학, 일조각, 1981.

[2] M.O. Durham and R. Durham, “Grounding system design for isolated locations and plant systems,” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 33, pp. 374-382, 1997.

[3] Kingrey, L.J., Painter, R.D., Locker and A.S., “Applying high resistance neutral grounding in medium voltage systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 3, pp. 1220-1231, 2011.

[4] B. Bridger, “High-resistance grounding”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-19, no. 1, pp. 15-21, 1983.

[5] Giuseppe Parise, “A summary of IEC protection against electric shock”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 5, pp.

911-922, 1998.

[6] B. J., Seshaprasad and R. R., Peters, “Investigation of Transient overvoltages in inductively grounded power systems”, Proceedings of the national power systems conference, vol. 9, pp. 466-470, 1996.

저 자 소 개

최순만(崔淳萬)

1955년 3월 30일생. 1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 동 대학원 석사, 1995년 동 대학원 박사, 현재 한국해양수산연수원 교수