

비접지 선박 3상 배전선로의 대지전압 벡터 모니터링 장치의 구성 최 순 만†

(원고접수일 : 2011년 9월 28일, 원고수정일 : 2011년 10월 26일, 심사완료일 : 2011년 11월 2일)

Configuration of a Module for Monitoring Voltages Between Power Lines and Hull Onboard Vessels Based on the Vector Diagram at 3 Phase Ungrounded Power Distribution Ssystem

Soon-Man Choi†

요 약 : 비접지방식 선박에서의 접지 고장은 대지 임피던스의 불평형을 가져오고 대지전압을 상승시켜 감전이나 전기화재의 염려가 높아진다. 접지에 따른 이 같은 대지전압의 왜곡 상태는 전기안전의 측면에서 실시간으로 감시할 필요가 있으며 이 경우 대지전압의 측정치를 위상변화 감시가 가능한 벡터다이아그램으로 나타내는 것이 효과적이다. 대지전압의 상태는 중성점 위치에 의해 표시될 수 있다는 점에서 우선 측정된 대지전압 입력에 대해 벡터 평면의 중성점을 출력하는 연산과정과 알고리즘의 해석이 필요하다. 이를 토대로 본 연구에서는 매 샘플링 주기마다 대지전압을 입력하여 컴퓨터 모니터 상에 중성점과 벡터 대지전압을 출력하는 모듈을 구성한 후 실제 배전선로에서의 실험을 통해 제시한 장치의 적정성을 확인하였다.

주제어 : 대지전압, 비접지배전계통, 대지 임피던스, 중성점

Abstract: Power distribution systems onboard vessels are typically configured without any live line connected to hulls for earthing purpose, where the line to hull voltages are affected and deformed depending on the impedances consisting of insulation resistances and distributed capacitances between power lines and hull. An insulation fault at power lines causes the line to hull voltages to increase to a higher level which brings more possibilities to electric shock and deterioration of insulation material. This study focuses on how to configure a module which enables to continuously monitor the voltages between power line and hull based on the vector diagram by analyzing the neutral point of 3 phase voltages and the algorithm for plotting method on the PC monitors.

Key words: Line to ground voltage, Ungrounded power system, Impedance to ground, Neutral point

1. 서 론

전기안전과 시스템 안정의 목적에서 다양한 형태의 접지방식이 배전계통에 적용된다. 특히 육상과 달리 선박은 비접지 방식 배전선로를 채택함으로써 한 상의 접지 시에도 정전사고 없이 안정된 급전이 가능하도록 하고 있으나 이 같은 비접지 계통에서는 선로와 선체 간 분포정전용량과 절연 저항이 합성된 대지임피던스의 상태에 따라 선체

와 선로 사이의 대지전압이 왜곡되어 불평형으로 되기 쉽다[1-3]. 따라서 한 상에서 접지되는 경우 다른 접지방식에 비해 대지전압이 상대적으로 높게 상승하여 감전 및 스파크의 발생과 함께 선로 절연물의 열화를 촉진시킨다[4-5].

한편, 선로의 절연상태 감시 목적으로 설치되는 접지저항계나 접지렘프 등으로는 대지전압에 대한 직접적인 정보를 알 수 없으므로 별도로 대지전압

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

자체를 실시간 감시하는 것이 전기안전을 위해서 중요하다. 이 경우 단순 측정에 의해 대지전압을 스칼라 양으로 표시하기보다는 위상변화를 함께 확인할 수 있는 벡터다이아그램으로 나타내는 것이 효과적이며 또한 기관실감시경보장치(E/R AMS : Engine Room Alarm Monitoring System)의 컴퓨터 모니터에 그래픽 방식으로 벡터 대지전압을 표시할 수 있어 보다 체계적인 감시가 가능해진다. 여기에는 1차원으로서의 대지전압 스칼라 양을 2차원 평면에서 벡터 양으로 변환하는 과정이 필요하며 대지전압의 중성점 위치를 구하는 문제로 대두된다. 3상 대지전압의 벡터 관계와 중성점 위치는 종이와 컴퍼스에 의한 기하학적인 방법으로 구해질 수 있으나 기관실감시경보장치의 모니터에 결과가 출력되기 위해서는 적절한 알고리즘과 연산과정을 통한 실시간 신호처리가 되어야 한다.

대지전압의 벡터방식 모니터링을 위해 본 연구에서는 이를 위한 연산모듈을 구성하고 중성점의 전기적 특성을 토대로 접지 상황에서의 중성점을 나타내기 위한 알고리즘을 구현하였으며 또한 실제의 배전선로에 연산모듈을 적용하여 얻어지는 출력 결과가 적정함을 확인하였다.

2. 대지전압의 중성점

Figure 1은 발전기와 배전선로 및 선로와 선체 간의 임피던스로서 각 상의 접지저항 R_R, R_S, R_T 와 선로와 선체 사이에 작용하는 분포용량을 C 로 나타내고 있다. 이에 대한 선로와 선체 간의 대지전압이 갖는 벡터다이아그램은 Figure 2와 같다.

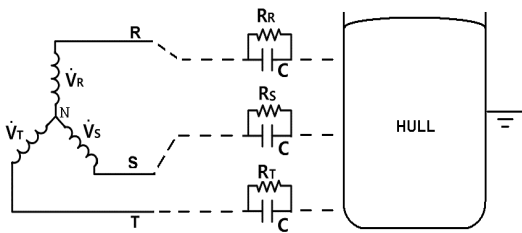


Figure 1: Circuit of power line to ground

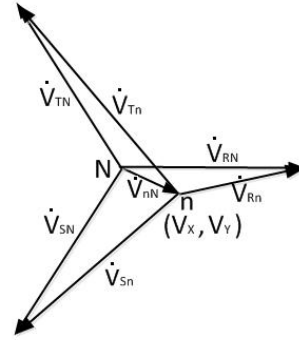


Figure 2: Vector diagram

V_{RN}, V_{SN}, V_{TN} 은 크기가 같은 평형 3상 전원의 상전압이고 R상을 기준으로 할 때 $V_{SN} = V_{RN} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $V_{TN} = V_{RN} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}$ 의 관계이다. 정상상태에서의 대지전압 중성점 N 에 대해 Figure 2의 n 지점은 접지된 상태에서의 중성점이며 V_{nN} 은 두 중성점 간의 전위차이고 V_X 와 V_Y 는 V_{nN} 의 수평 및 수직성분 전압이다. 여기에서 V_{Rn}, V_{Sn}, V_{Tn} 의 대지전압 측정값으로부터 V_{nN} 의 위상과 크기를 구하도록 한다. Figure 2로부터 각 상 대지전압의 크기를 V_X 와 V_Y 가 포함하여 나타내면 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$V_{Rn}^2 = (V_{RN} - V_X)^2 + V_Y^2 \tag{1}$$

$$V_{Sn}^2 = \left(\frac{V_{SN}}{2} + V_X\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_{SN} - V_Y\right)^2 \tag{2}$$

$$V_{Tn}^2 = \left(\frac{V_{TN}}{2} + V_X\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_{TN} + V_Y\right)^2 \tag{3}$$

이로부터 V_Y 를 소거하고 V_{RN}, V_{SN}, V_{TN} 는 상전압 V_P 이므로 위식에서 다음 방정식 f 가 얻어진다.

$$f(V_P, V_{Rn}, V_{Sn}, V_X) = V_{Sn}^2 - V_{Rn}^2 + \frac{3}{2} V_P^2 - 3 V_P V_X - \sqrt{3} V_P \sqrt{V_{Sn}^2 - \left(\frac{V_P}{2} + V_X\right)^2} = 0 \tag{4}$$

한편, V_P 가 일정하고 R, S 상의 대지전압이 실시간 측정값 $\overline{V_{Rn}}, \overline{V_{Sn}}$ 로 주어진다면 식 (4)는 변수 V_X 만의 방정식인 g 로 나타낼 수 있다.

$$f(V_P, \overline{V_{Rn}}, \overline{V_{Sn}}, V_X) = g(V_X) = 0 \quad (5)$$

따라서 중성점의 수평성분 V_X 의 크기는 식(5)의 해로 구해지고 또한 V_X 와 식(1)로부터 수직성분 V_Y 는 다음 식이 된다.

$$V_{Y..} = [V_{Rn}^2 - (V_P - V_X)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

이로부터 3상 선로 중 2개 선로에서의 대지전압 측정치가 주어지면 벡터다이아그램 상에서 대지전압의 중성점이 정해진다는 것을 알 수 있다.

3. 연산모듈의 구성

3.1 벡터다이아그램 연산모듈

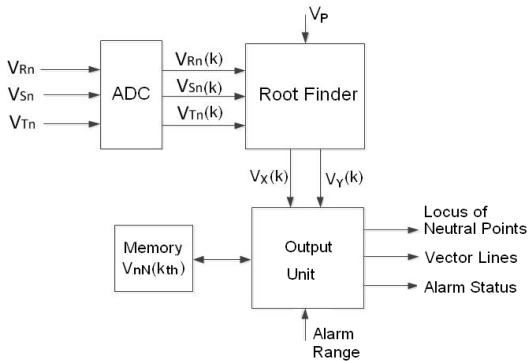


Figure 3: Block Diagram of Module Configuration

Figure 3은 컴퓨터 모니터에 대지전압의 벡터다이아그램 출력을 위한 연산모듈의 구성이다.

V_{Rn}, V_{Sn}, V_{Tn} 중 2개 이상의 아날로그 측정값은 8채널 12비트 ADC에 의해 k 번째 값 $V_{Rn}(k), V_{Sn}(k), V_{Tn}(k)$ 으로 변환되고 다음 근탐색기(Root Finder)가 식 (5)에서의 방정식 해를 구하기 위해 이들 값을 읽어 들인다. 상전압 V_P 가 일정하게 주어진 상태에서 수치해석으로 근탐색기는 k 번째 중성점의 수평성분인 $V_X(k)$ 를 계산하고 또한 식 (6)에 의해 $V_Y(k)$ 를 출력한다. 출

력유닛(Output Unit)은 컴퓨터 모니터 상에 벡터다이아그램 출력 및 경보 출력을 위한 것으로 중성점 해가 구해지면 일정 상전압에 대해 $\dot{V}_{Rn}, \dot{V}_{Sn}, \dot{V}_{Tn}$ 의 크기와 위상관계를 나타내는 선분을 그린다. 이와 함께 중성점이 반지름으로 주어지는 설정 경보영역(Alarm Range)을 벗어나면 경보상태를 출력한다. 모듈의 구성에서 저장요소(Memory)의 부분은 매 k 번째의 $V_X(k)$ 와 $V_Y(k)$ 의 위치 정보를 저장하기 위한 것으로 중성점의 시간적 추이(Locus of Neutral Points)를 출력할 수 있다.

3.2 근탐색기 프로시저

식 (5)의 해를 구하는 근탐색기의 연산 프로시저는 Figure 4와 같다. k 번째인 샘플링에서 R상과 S상 대지전압 크기를 읽어 들인 후 두 번째 블록은 중성점의 수평성분 V_X 가 세로축의 우측 평면에 존재하는지 여부를 구별하기 위한 알고리즘 부분이다. R상 대지전압 크기가 전원 측 상전압 크기보다 작은 경우 우측 평면에 위치하게 되고 그 반대이면 좌측 평면에 해당하여 중성점은 2상한 혹은 3상한에 위치하게 된다. 측정치의 중성점 위치가 우측으로 판단되는 경우에는 우측 평면에서 해를

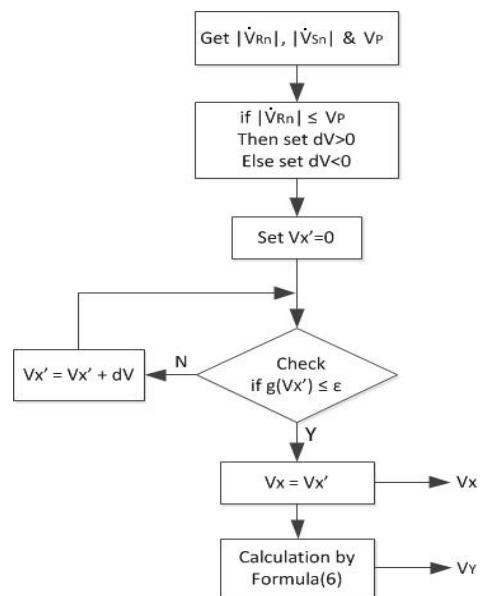


Figure 4: Procedure at each sampling period

찾도록 하기 위해 근탐색기는 원점으로부터의 미소 증감치 dV 를 양의 부호로 설정하고 그 반대이면 음 부호인 dV 치로 설정한다. 이후 임시적인 수평성분 해를 V_X' 라고 하면 이를 0부터 시작하여 V_X' 에 dV 를 더하는 과정을 반복하여 임시 해 V_X' 가 식 (5)를 미소값 ϵ 이내로 만족하는지의 여부를 확인하는 것에 의해 V_X 을 구한다. 또한 V_X 의 결과를 식 (6)에 대입하여 V_Y 를 출력함으로써 중성점의 수평 및 수직 성분의 값이 모두 정해진다.

4. 분석과 결과

제시된 모듈을 3상 220[V] 배전계통에 접속하여 컴퓨터 모니터에 모듈이 나타내는 대지전압 중성점과 측정치가 보여야 하는 중성점의 실제 위치가 서로 같은지를 비교해 보기로 한다. Figure 5는 각 선로의 접지저항이 1[MΩ]으로 평형인 때의 출력 결과로서 중성점 위치가 정상적임을 알 수 있다. 실수축과 허수축의 눈금은 상전압 V_P 크기에 대한 배율로 나타내었으며 실험 배전 계통의 경우 V_P 는 127[V]이고 설정된 샘플링주기는 0.5[s]이다. Figure 5에서 연산모듈의 중성점은 $V_X=0[V]$, $V_Y=0[V]$ 이고 실험 배전선로에서의 대지전압 측정치는 $V_{Rn}=127.8[V]$, $V_{Sn}=128.0[V]$, $V_{Tn}=127.2[V]$ 이다.

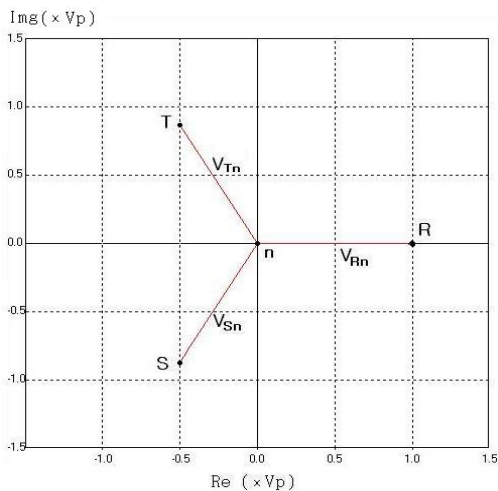


Figure 5: Normal condition($V_X: 0$ V, $V_Y: 0$ V) ($V_{Rn}=127.8$ V, $V_{Sn}=128.0$ V, $V_{Tn}=127.2$ V)

Figure 6은 Figure 5의 조건에서 R상 선로만을 10[kΩ] 저항에 의해 강제 접지시킨 결과 배전선로 대지전압 측정치는 $V_{Rn}=118.5[V]$, $V_{Sn}=109.1[V]$, $V_{Tn}=169.7[V]$ 를 나타내었다. 이에 대해 근탐색기가 찾아낸 중성점의 수평 및 수직성분 전압은 (12.9[V], -39.9[V])이고 4상한에 위치한다. 한편, 컴퍼스를 이용하여 측정된 대지전압을 반지름으로 하는 원호를 그릴 때 얻어지는 중성점 위치를 연산모듈이 표시하고 있는 중성점과 비교하면 서로 동일함을 확인할 수 있다. Figure 6의 R상 대지전압은 정상 경우인 Figure 5에 비해 118.5[V]로 감소하였으나 T상 대지전압은 169.7[V]로 42.5[V]가 상승한 반면 S상 대지전압은 다소 감소하고 있다.

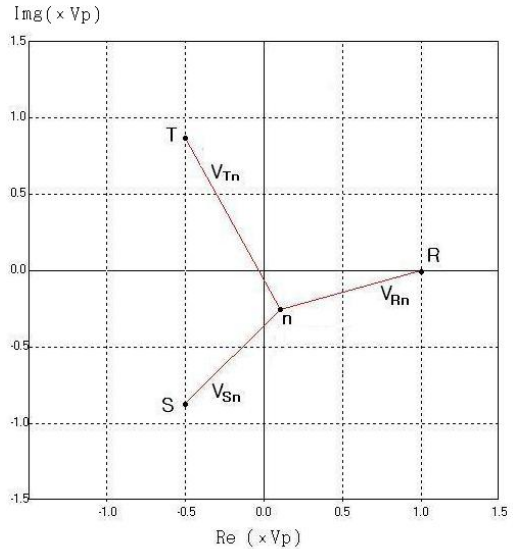


Figure 6: Case with R line grounded ($V_X: 12.9$ V, $V_Y: -31.9$ V) ($V_{Rn}=118.5$ V, $V_{Sn}=109.1$ V, $V_{Tn}=169.7$ V)

Figure 7은 R, S, T 선로의 접지 저항을 $R_R=0.1[MΩ]$, $R_S=1.0[MΩ]$, $R_T=0.1[MΩ]$ 으로 실험한 결과이다. 배전선로에서 측정된 대지전압은 $V_{Rn}=89.8[V]$, $V_{Sn}=170.7[V]$, $V_{Tn}=134.4[V]$ 이고 이때 근탐색기가 출력한 중성점 해는 (40.8[V], 25.2[V])로서 1상한에 위치한다. 또한, 대지전압 측정치를 컴퍼스를 이용하여 표시하는 중성점도 동

일 지점을 나타내었으며 접지가 되지 않은 S상의 대지전압이 가장 크고 R상 전압이 최소이다.

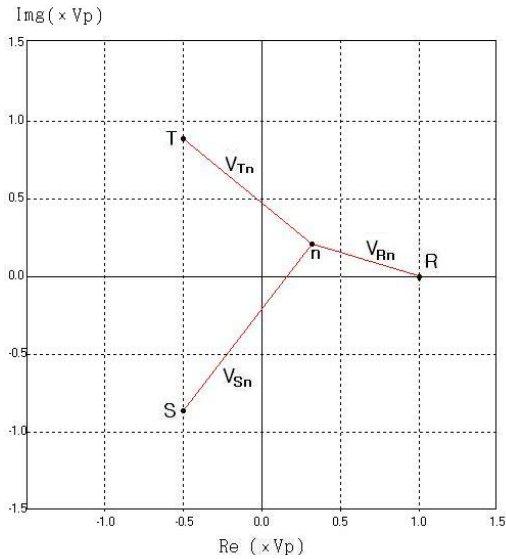


Figure 7: Case with R and T lines grounded ($V_X:40.8\text{ V}$, $V_Y:25.2\text{ V}$) ($V_{Rn}=89.8\text{ V}$, $V_{Sn}=170.7\text{ V}$, $V_{Tn}=134.4\text{ V}$)

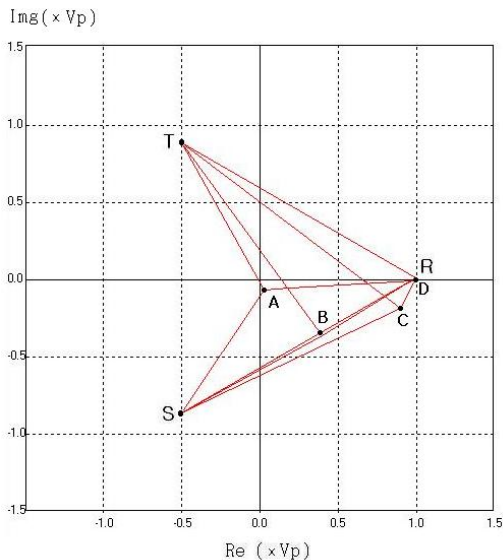


Figure 8: 5 cases with R Line grounded

Figure 8은 $R_R=1.0[\text{M}\Omega]$, $R_S=1.0[\text{M}\Omega]$, $R_T=1.0[\text{M}\Omega]$ 의 초기상태에서 R상의 접지저항을 $500[\text{k}\Omega]$,

$100[\text{k}\Omega]$, $20[\text{k}\Omega]$, $0[\Omega]$ 의 순서로 감소시킬 때의 대지전압 중성점을 A,B,C,D로 구분하여 나타낸 것이다. R상 접지 시의 중성점 위치가 모두 상전압 V_{Rn} 에 대해 낮은 위상으로 편각되어 4상환에 위치하고 있는데 이는 선로의 분포정전용량의 영향으로 보인다. 또한, R상 선로가 완전하게 접지된 D 경우는 $V_{Rn}=0[\text{V}]$ 임에 대해 V_{Sn} 과 V_{Tn} 은 동일하게 $\sqrt{3}V_P$ 의 크기로 전압이 높아지고 있다.

5. 결론

비접지 계통인 선박 3상 배전선로에서의 측정 대지전압으로부터 벡터 전압의 중성점 위치를 구하기 위한 수식들이 정리되었으며 이를 토대로 측정전압 신호를 온라인으로 처리할 수 있는 연산모듈을 구성하였다. 또한 구성한 장치를 220[V] 3상 배전선로에 적용하여 실험한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있다.

부분 접지된 3상 선로에서 대지전압 측정치가 입력되는 경우 해당 중성점 위치를 구성모듈이 벡터 다이어그램 상에 정확한 지점으로 나타낸다는 것을 확인하였으며 접지 선로의 변경과 접지저항의 변동에 대해서도 중성점이 위치해야 하는 벡터 평면 상 지점을 올바르게 나타냄에 따라 제시된 수식적 과정과 중성점 출력에 대한 수치해석 프로시저가 적정함을 알 수 있다. 또한, 어느 선로에서의 부분 접지 시 중성점 위치는 상전압에 대해 위상이 낮은 편각을 나타내었으며 이는 선로의 분포정전용량의 영향으로 보인다. 이러한 결과를 통해 제시된 장치가 선박의 배전선로에 설치되어 기관실 모니터링 시스템과 결합시킬 경우 벡터 다이어그램에 의해 배전선로의 대지전압 상태를 효과적으로 감시할 수 있음을 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] L. J., Kingrey, R. D., Painter and A. S., Locker, “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] Seshaprasad, B. J., Peters, R. R., “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