

계통연계시 지락전류분포와 방향 고찰



글 _ 박재현 (No.98142)

전기안전기술교육원 부원장/공학박사

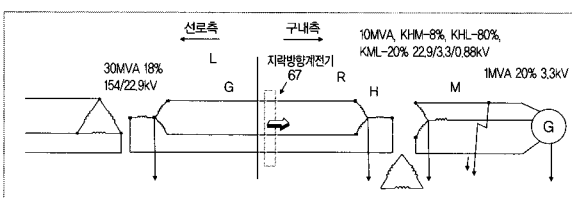
1. 서론

여기에서 기술하고자하는 내용은 유효접지계통이나 발전기 병렬운전측면에서 고객 수전변압기 1차가 중성점접지계통으로 운전되고 구내에 67 등의 지락방향계전기 있는 경우에 1선 지락고장을 상정하여 지락전류해석을 통한 방향성을 이해하고자하는 것이다.

이는 주로 154kV 계통 수전고객이 해당될 수 있고 최근에는 신재생에너지 증가로 폐열을 이용한 증기터빈 구동 유도발전기도 22.9kV 계통에 연결되어 운전하고 있는 추세이다.

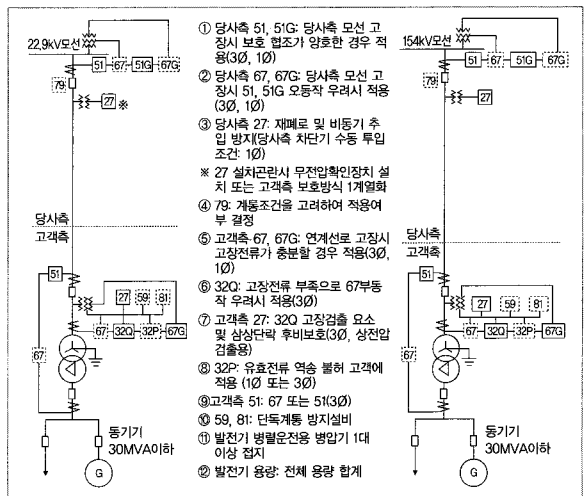
154kV 고객이 67을 운용할 경우 제전기의 방향성은 한전 계통과 통신연락을 통한 내부 지락이나 외부지락이나에 대한 판단의 정보가 될 수 있다. 그림 1은 구내발전기가 있는 경우, 변압기 1차측에 중성점접지하고 전원측과 계통연계된 상태에서 선로측 1선지락에 대한 예를 보여준다. 1차측에는 67이 있다.

해서 본 논고에서는 구내 발전기가 있는 경우에 대한 대칭좌표법에 의한 지락전류분포를 해석하고 방향계전기의 동작특성을 고찰하고자 한다. 단위는 모두 PU로 나타내었다.



【그림 1】 연계계통의 선로측 지락사고 상정

그림 2와 3은 한전의 “발전기 병렬운전 연계선로 보호업무”에 나와 있는 그림인데 154kV 이상 또는 22.9kV 계통의 구내 발전기 운전 시에 대한 보호업무지침이다. 선로는 1회선 전용선로 또는 방사상선로로서 일반적인 고객은 여기에 해당된다고 생각된다. 이보다 중요한 계통에서는 파일롯계전방식을 사용하기도 한다. 여기에서는 지락방향계전기가 옵션으로 설치 될 수가 있다.



【그림 2】 1회선 전용선로(A)한전, 송발전기 준수, 발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 참조)

【그림 3】 1회선 전용선로(B)

2. 선로측 1선지락 고장해석

2.1 임피던스 계산

고장해석을 하기 위해서는 정확한 임피던스가 계산이 이루어져야 되는데 여기서는 그림 1에 대한 지락고장해석을 하도록 하겠다. 고장계산 편의상 전원측 임피던스 0, 선로 임피던스나 접저저항값은 무시한다.

100MVA 기준, 각 TR의 임피던스는

$$\text{전원측 30MVA TR 임피던스, } 0.13 \times \frac{100}{30} = 0.4333\text{PU,}$$

고객측 3권선 변압기의 임피던스는

$$X_{HM} = 8\%, X_{HL} = 30\%, X_{ML} = 20\%$$

$$X_H = \frac{1}{2}(0.08 + 0.3 - 0.2) = 0.09\text{PU}$$

$$X_M = \frac{1}{2}(0.08 + 0.2 - 0.3) = 0.01\text{PU}$$

$$X_L = \frac{1}{2}(0.3 + 0.2 - 0.08) = 0.21\text{PU}$$

100MVA 기준으로 환산하면,

$$X_H = 0.09 \times \frac{100}{10} = 0.9\text{PU}$$

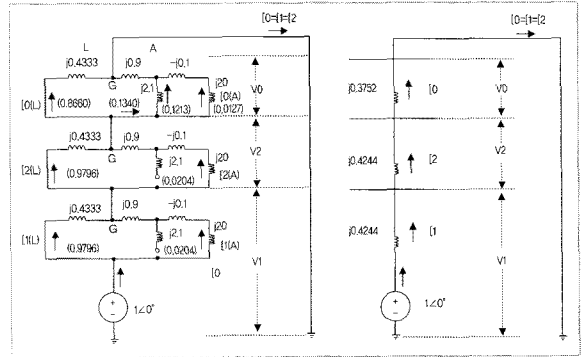
$$X_M = -0.01 \times \frac{100}{10} = -0.1\text{PU}$$

$$X_L = 0.21 \times \frac{100}{10} = 2.1\text{PU}$$

발전기 임피던스는 $Z_0 = Z_1 = Z_2$ 이라고 가정했을 때

$$0.2 \times \frac{100}{1} = 20\text{PU가 된다.}$$

그림 4와 5는 대칭좌표법을 이용하여 1선지락시 그림1 회로에 대한영상, 정상, 역상등가회로를 나타낸 것이다. 3권선 변압기 임피던스 해석시 영상회로는 특히 주의하여야 한다. 정상과 역상에서는 3차측은 Open 되어 있다. $I_0(L), I_1(L), I_2(L)$ 은 지락점 좌측에 대한 대칭성분전류이고 $I_0(R), I_1(R), I_2(R)$ 은 지락점 우측 대칭성분전류분이다. 또한, ()안은 각 대칭성분전류의 분류비율이다.



【그림 4】 1선지락사고시 대칭좌표법에 의한 등가 임피던스회로

【그림 5】 그림 4의 합성 등가회로

2.2 지락전류분포 및 크기 계산

대칭좌표법에 의한 1선지락시 고장전류를 계산하면 다음과 같이 된다.

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E_0}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

실제 지락전류 I_f 는

$$I_f = 3 \times I_0 = \frac{3E_0}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

그림 4의 임피던스를 이용하여 1상당 영상성분전류를 구하면 다음과 같다.

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{j0.3752 + j0.4244 + j0.4244} = \frac{1}{j1.224} = -j0.8710[\text{PU}]$$

실제 지락점에 흐르는 전류는 식(2)에서

$$I_f = 3 \times I_0 \approx -j2.4509[\text{PU}] = 2.4509 \angle -90^\circ [\text{PU}] \text{된다.}$$

지금부터는 각 상당 흐르는 전류분포를 계산하기 위해 그림3의 등가회로를 참조해서 고장점에서 각 성분에 대한 대칭성분전류를 구한다.

① 고장점 좌측 L에서 각 대칭성분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_0(L) \\ I_1(L) \\ I_2(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8660 \times I_0 \\ 0.9796 \times I_0 \\ 0.9796 \times I_0 \end{bmatrix} \text{에서}$$

$$\begin{bmatrix} I_0(L) \\ I_1(L) \\ I_2(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.7075 \\ -j0.8003 \\ -j0.8003 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7075 \angle -90^\circ \\ 0.8003 \angle -90^\circ \\ 0.8003 \angle -90^\circ \end{bmatrix}$$

각 대칭성분을 이용해서 각 상에 흐르는 전류를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} I_a(L) \\ I_b(L) \\ I_c(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0(L) \\ I_1(L) \\ I_2(L) \end{pmatrix} \quad (3)$$

단, $a = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

식(3)에 대입하면

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j2.3082 \\ j0.0929 \\ j0.0929 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3082 \angle -90^\circ [PU] \\ -0.0929 \angle -90^\circ [PU] \\ -0.0929 \angle -90^\circ [PU] \end{pmatrix}$$

② 다음은 구내 3권선 TR 1차측 각 대칭성분전류를 구하면,

$$\begin{pmatrix} I_0(tr1) \\ I_1(tr1) \\ I_2(tr1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1340 \times I_0 \\ 0.0204 \times I_0 \\ 0.0204 \times I_0 \end{pmatrix} \text{에서}$$

$$\begin{pmatrix} I_0(tr1) \\ I_1(tr1) \\ I_2(tr1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.1095 \\ -j0.0929 \\ -j0.0929 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1095 \angle -90^\circ \\ 0.0166 \angle -90^\circ \\ 0.0166 \angle -90^\circ \end{pmatrix}$$

각 상에 흐르는 전류를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.1427 \\ -j0.0929 \\ -j0.0929 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1427 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0929 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0929 \angle -90^\circ [PU] \end{pmatrix}$$

③ 구내 3권선 TR 2차측 각 대칭성분전류를 구하면,

$$\begin{pmatrix} I_0(tr2) \\ I_1(tr2) \\ I_2(tr2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0127 \times I_0 \\ 0.0204 \times I_0 \\ 0.0204 \times I_0 \end{pmatrix} \text{에서}$$

$$\begin{pmatrix} I_0(tr2) \\ I_1(tr2) \\ I_2(tr2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.0104 \\ -j0.0166 \\ -j0.0166 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0104 \angle -90^\circ \\ 0.0166 \angle -90^\circ \\ 0.0166 \angle -90^\circ \end{pmatrix}$$

각 상에 흐르는 전류는

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.0436 \\ j0.0062 \\ j0.0062 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0436 \angle -90^\circ [PU] \\ -0.0062 \angle -90^\circ [PU] \\ -0.0062 \angle -90^\circ [PU] \end{pmatrix} \text{이 된다.}$$

④ 마찬가지로 구내 3권선 TR 3차측 Δ회로 각 대칭성분전류를 구하면,

$$\begin{pmatrix} I_0(\Delta) \\ I_1(\Delta) \\ I_2(\Delta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1213 \times I_0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{에서}$$

$$\begin{pmatrix} I_0(\Delta) \\ I_1(\Delta) \\ I_2(\Delta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.0991 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0991 \angle -90^\circ \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

각 상에 흐르는 전류는 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.0991 \\ -j0.0991 \\ -j0.0991 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0991 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0991 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0991 \angle -90^\circ [PU] \end{pmatrix}$$

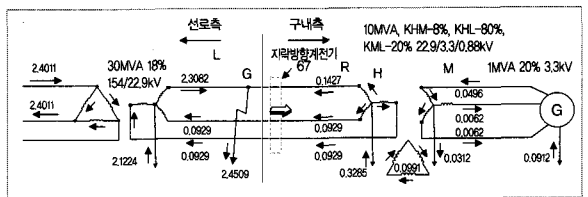
⑤ 구내 발전기측 각 대칭성분전류를 구하면, ③의 구내 3권선 TR 2차측 각 대칭성분전류와 같다.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.0436 \\ j0.0062 \\ j0.0062 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0436 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0062 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0062 \angle -90^\circ [PU] \end{pmatrix}$$

이상의 결과를 가지고 실제회로에 대한 지락전류분포를 도시하면 다음 그림 6과 같이 된다.

각 요소에 대한 지락전류의 방향은 고장점을 기준으로 들어오는 방향이 +가 되고 -는 반대방향임을 뜻한다.

2.3. 지락방향계전기 동작 검토



【그림 6】 선로측 사고시 지락전류분포와 크기

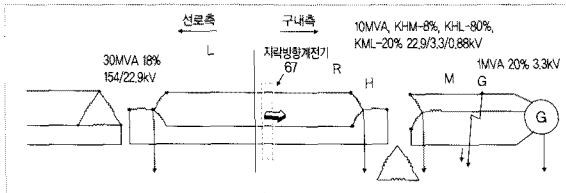
먼저 그림 6을 참고해서 구내 67의 동작특성을 이해한다. 만약 방향계전기의 방향이 구내측인 경우에 선로측에서 지락사고시 67을 통과하는 전류는 역방향이므로 동작하지 않음을 알 수 있다. 그러므로 67 사용 시는 어느 방향을 보고 있는지를 검토하여 보호방법을 검토하여야 할 것이다. 발전기가 있는 경우는 고장점을 향하여 전원측 및 발전기측에서도 지락전류를 공

급한다. 그러므로 없을 경우보다 지락전류가 증가된다.

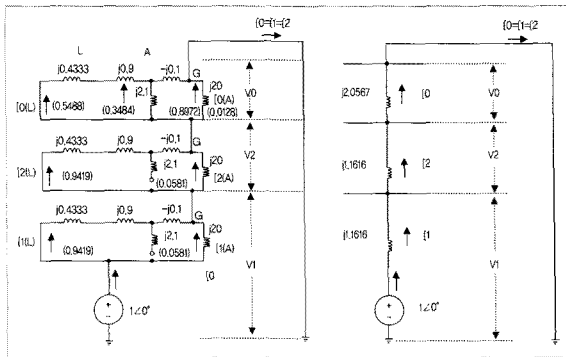
3. 구내측 1선지락 고장해석

3.1 지락전류분포 및 크기 계산

이번에는 구내측에서 지락사고 발생시 지락전류 분포를 계산한다. 각 기기의 임피던스 앞에서도 같지만 지락점이 다르므로 대칭좌표법에 의한 등가회로는 그림8, 9와 같이 된다. 이것을 참조해서 고장해석이 이루어진다.



【그림 7】 구내측 지락사고 상황



【그림 8】 1선지락사고시 대칭좌표법에 의한 등가 임피던스회로

【그림 9】 합성 등가회로

식(1)~식(3)을 참고해서 계산하면 다음과 같이 된다.

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{j2.0567 + j1.1616 + j1.1616} = \frac{1}{j4.3799} = -j0.2283 [PU]$$

실제 지락점에 흐르는 전류는

$$I_B = 3 \times I_0 = -j0.6849 [PU] = 0.6849 \angle -90^\circ [PU] \text{ 된다.}$$

이제 지락전류계산을 위해 각 구간별 대칭성분전류를 구한다.

- ① 고장점 좌측 선로 TR에서 각 대칭성분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} I_0(L) \\ I_1(L) \\ I_2(L) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.5488 \times I_0 \\ 0.9419 \times I_0 \\ 0.9419 \times I_0 \end{Bmatrix} \text{ 에서}$$

$$\begin{Bmatrix} I_0(L) \\ I_1(L) \\ I_2(L) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -j0.1253 \\ -j0.2150 \\ -j0.2150 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.1253 \angle -90^\circ \\ 0.2150 \angle -90^\circ \\ 0.2150 \angle -90^\circ \end{Bmatrix}$$

각 상의 지락전류를 구하기 위해 식(3)에 대입하면

$$\begin{Bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -j0.5553 \\ j0.0897 \\ j0.0897 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.5553 \angle -90^\circ [PU] \\ -0.0897 \angle -90^\circ [PU] \\ -0.0897 \angle -90^\circ [PU] \end{Bmatrix}$$

- ② 구내 3권선 TR 1차측은 앞의 ①와 같다.

$$\begin{Bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -j0.5553 \\ j0.0897 \\ j0.0897 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.5553 \angle -90^\circ [PU] \\ -0.0897 \angle -90^\circ [PU] \\ -0.0897 \angle -90^\circ [PU] \end{Bmatrix}$$

- ③ 구내 3권선 TR 2차측 각 대칭성분전류를 구하면,

$$\begin{Bmatrix} I_0(tr2) \\ I_1(tr2) \\ I_2(tr2) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.8972 \times I_0 \\ 0.9419 \times I_0 \\ 0.9419 \times I_0 \end{Bmatrix} \text{ 에서}$$

$$\begin{Bmatrix} I_0(tr2) \\ I_1(tr2) \\ I_2(tr2) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -j0.2048 \\ -j0.2150 \\ -j0.2150 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.2048 \angle -90^\circ \\ 0.2150 \angle -90^\circ \\ 0.2150 \angle -90^\circ \end{Bmatrix}$$

각 상에 흐르는 전류는

$$\begin{Bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -j0.6348 \\ -j0.0102 \\ -j0.0102 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.6348 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0102 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0102 \angle -90^\circ [PU] \end{Bmatrix} \text{ 이 된다.}$$

- ④ 마찬가지로 구내 3권선 TR 3차측 Δ 회로 각 대칭성분전류를 구하면,

$$\begin{Bmatrix} I_0(\Delta) \\ I_1(\Delta) \\ I_2(\Delta) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.3484 \times I_0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ 에서}$$

$$\begin{pmatrix} I_o(\Delta) \\ I_l(\Delta) \\ I_z(\Delta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.0795 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0795 \angle -90^\circ \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

각 상에 흐르는 전류는 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.0795 \\ -j0.0795 \\ -j0.0795 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0795 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0795 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0795 \angle -90^\circ [PU] \end{pmatrix}$$

⑤ 구내 발전기측 각 지락전류를 구하면,

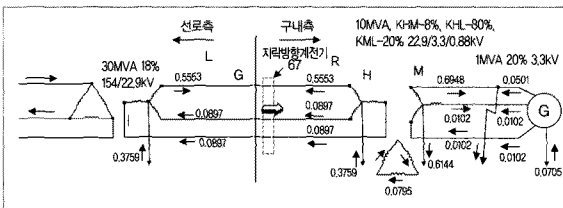
$$\begin{pmatrix} I_o(G) \\ I_l(G) \\ I_z(G) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1028 \times I_o \\ 0.0581 \times I_o \\ 0.0581 \times I_o \end{pmatrix} \text{에서}$$

$$\begin{pmatrix} I_o(G) \\ I_l(G) \\ I_z(G) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.0235 \\ -j0.0133 \\ -j0.0133 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0235 \angle -90^\circ \\ 0.0133 \angle -90^\circ \\ 0.0133 \angle -90^\circ \end{pmatrix}$$

각 상에 흐르는 전류는

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -j0.0501 \\ -j0.0102 \\ -j0.0102 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0501 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0102 \angle -90^\circ [PU] \\ 0.0102 \angle -90^\circ [PU] \end{pmatrix} \text{이 된다.}$$

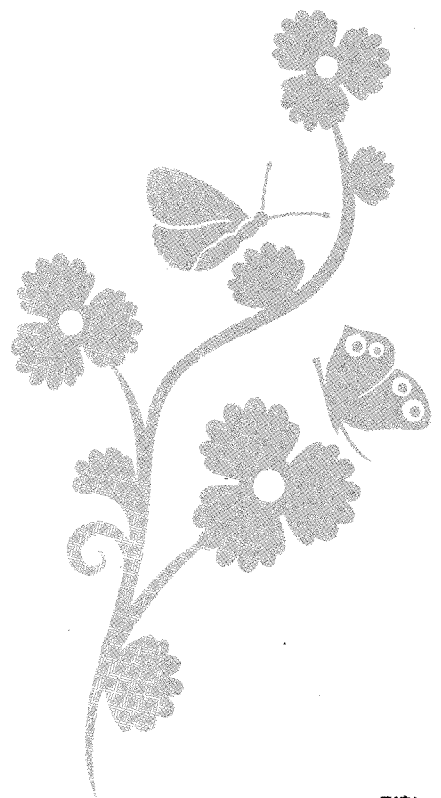
3.2 지락방향계전기 동작 검토



구내측에서 지락사고가 발생하면 방향계전기 보호방향으로 정상적인 전류가 감지되므로 계전기가 동작됨을 알 수 있다. 이렇게 계통해석을 함으로써 어떤 지점의 지락고장전류에 대해 방향성은 물론 지락방향계전기의 동작여부를 검토하는 도움이 될 것이다.

4. 결론

지금까지 변압기 중성점 접지계통에서 계통연계시에 대한 지락전류분포와 지락방향계전기의 동작여부를 검토하였다. 많은 계통시스템이 있지만 그 중에서 일부만 고찰하였으므로 모든 것이 다 여기에 해당된다고 볼 수는 없을 것이다. 그러므로 항상 정확한 계통해석을 통한 판단이 중요하다고 하겠다. 여기서는 예제의 계통에서 지락전류분포해석을 통해 방향성계전기 이해에 조금 도움이 되었으면 하고 세부적인 사항은 보다 전문 서적을 참조하였으면 한다. ❖



마침 ❖❖