

송전선로의 특성



우송정보대학 철도전기과

CONTENTS

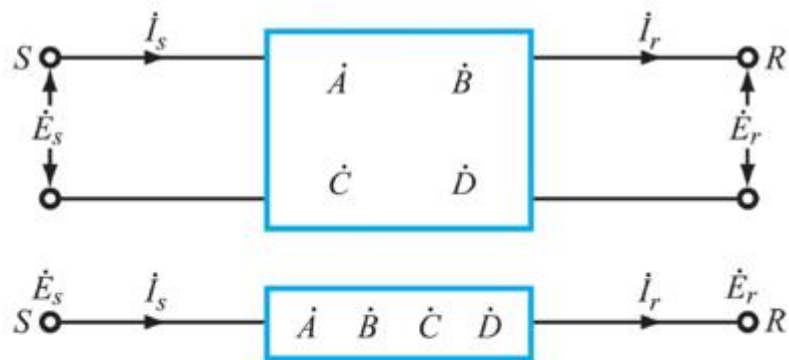
1. 4단자 정수회로

2. 송전선로의 해석

1.1 4단자 정수

★ 4단자 정수회로

송전단과 수전단 사이의 복잡한 회로를 4단자 정수로 바꾸어 송전단과 수전단의 특성을 알아보는 것



- \dot{E}_s : 송전단 전압 [V]
- \dot{E}_r : 수전단 전압 [V]
- \dot{I}_s : 송전단 전류 [A]
- \dot{I}_r : 수전단 전류 [A]

[그림 6-1] 4단자 정수회로

1.1 4단자정수

★ 송전단과 수신단의 전압, 전류의 관계

$$\begin{aligned}\dot{E}_s &= \dot{A}\dot{E}_r + \dot{B}\dot{I}_r \\ \dot{I}_s &= \dot{C}\dot{E}_r + \dot{D}\dot{I}_r\end{aligned}\tag{6.1}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_s \\ \dot{I}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_r \\ \dot{I}_r \end{bmatrix}\tag{6.2}$$

$$\dot{A} = \left. \frac{\dot{E}_s}{\dot{E}_r} \right|_{\dot{I}_r=0} \quad \dot{B} = \left. \frac{\dot{E}_s}{\dot{I}_r} \right|_{\dot{E}_r=0} \quad \dot{C} = \left. \frac{\dot{I}_s}{\dot{E}_r} \right|_{\dot{I}_r=0} \quad \dot{D} = \left. \frac{\dot{I}_s}{\dot{I}_r} \right|_{\dot{E}_r=0}$$

• $\dot{I}_r = 0$: 수신단이 개방인 조건

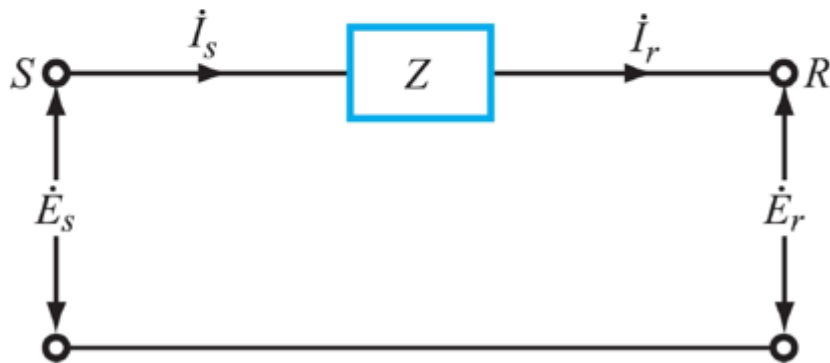
• $\dot{E}_r = 0$: 수신단이 단락인 조건

1.2 4단자 정수회로

★ 직렬 임피던스 회로

송전선로에 변압기 등 기기가 직렬로 연결되어 있을 때의 4단자 정수

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



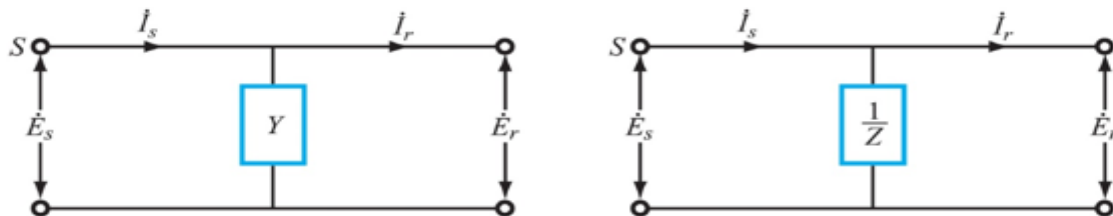
[그림 6-2] 직렬 임피던스 회로

1.2 4단자 정수회로

★ 병렬 어드미턴스 회로

송전선로에 분기선이 연결되어 있을 때의 4단자 정수

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix}$$



[그림 6-3] 병렬 어드미턴스 회로

★ 4단자 정수 ★

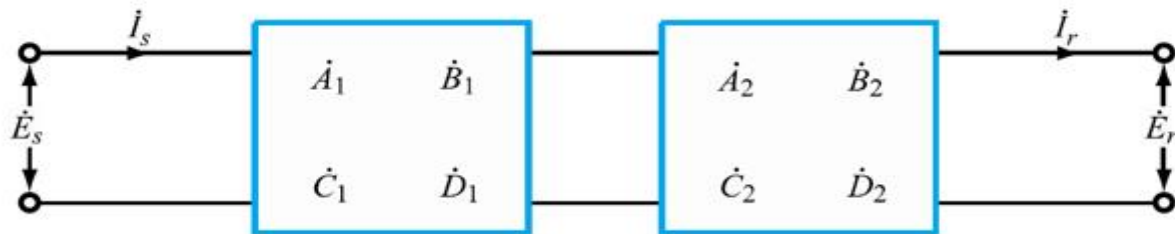
- 직렬 임피던스 회로 $\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
- 병렬 어드미턴스 회로 $\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix}$

1.2 4단자 정수회로

★ 4단자 정수회로의 직렬연결

송전선로에 분기선이 연결되어 있을 때의 4단자 정수

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_2 & \dot{B}_2 \\ \dot{C}_2 & \dot{D}_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \dot{A}_1\dot{A}_2 + \dot{B}_1\dot{C}_2 & \dot{A}_1\dot{B}_2 + \dot{B}_1\dot{D}_2 \\ \dot{A}_2\dot{C}_1 + \dot{C}_2\dot{D}_1 & \dot{B}_2\dot{C}_1 + \dot{D}_1\dot{D}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{6.8}$$



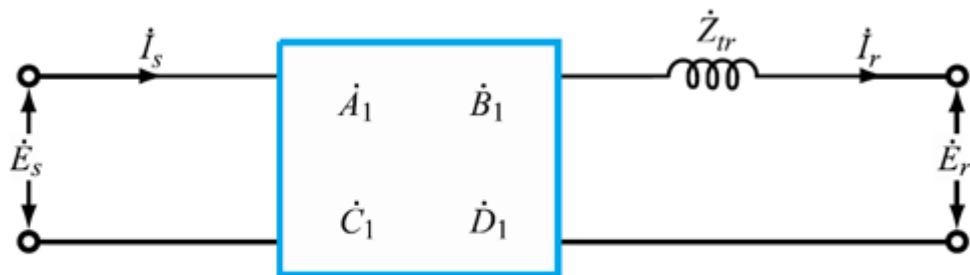
[그림 6-4] 4단자 정수회로의 직렬연결

1.2 4단자 정수회로

★ 수전단에 변압기가 연결된 경우

송전선로에 분기선이 연결되어 있을 때의 4단자 정수

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z}_{tr} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{A}_1 \dot{Z}_{tr} + \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{C}_1 \dot{Z}_{tr} + \dot{D}_1 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$



[그림 6-5] 4단자 회로와 직렬연결된 변압기 \dot{Z}_{tr}

1.3 4단자 정수회로 예

★ 4단자 정수의 예

[표 6-1] 4단자 정수의 예

회로의 종류 (좌측 송전단, 우측 수신단)	4단자 정수			
	\dot{A}	\dot{B}	\dot{C}	\dot{D}
	1	\dot{Z}	0	1
	$1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}$	$\dot{Z}\left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4}\right)$	\dot{Y}	$1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}$
	$1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}$	\dot{Z}	$\dot{Y}\left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4}\right)$	$1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}$
	$\cosh \sqrt{\dot{Z}\dot{Y}}$	$\sqrt{\frac{\dot{Z}}{\dot{Y}}} \sinh \sqrt{\dot{Z}\dot{Y}}$	$\sqrt{\frac{\dot{Y}}{\dot{Z}}} \cosh \sqrt{\dot{Z}\dot{Y}}$	$\cosh \sqrt{\dot{Z}\dot{Y}}$
	\dot{A}	\dot{B}	\dot{C}	\dot{D}
	$\dot{A} + \dot{C}\dot{Z}_s$	$\dot{B} + \dot{D}\dot{Z}_s$	\dot{C}	\dot{D}

2.1 송전선로의 해석

★ 송전선로의 해석

- 3상 교류를 사용하며, 각 상의 전선에는 선로정수인 저항 R , 인덕턴스 L , 정전용량 C , 누설 컨덕턴스 g 가 균일하게 분포되어 있음
- 송전선로의 등가회로는 송전선로의 길이에 따라 서로 다르게 나타남
- 송전단에서 수전단까지의 거리에 따라 단거리, 중거리, 장거리 송전선로로 구분

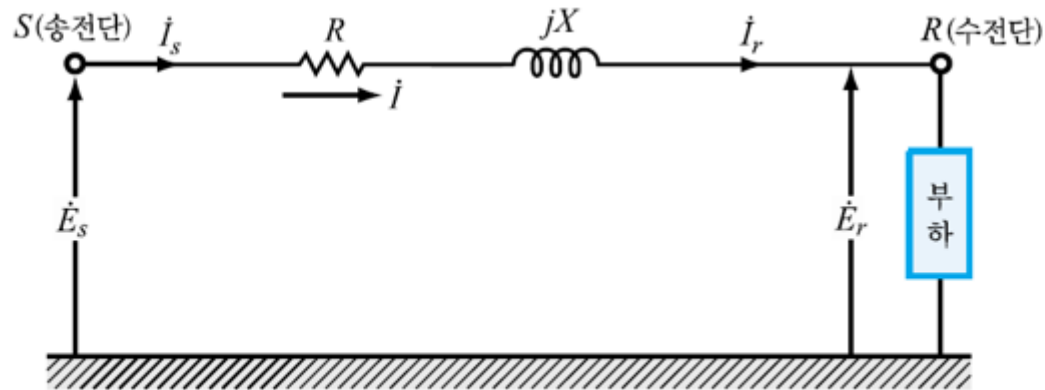
[표 6-2] 단거리, 중거리, 장거리 송전선로의 특징

구분	길이	선로정수	취급회로
단거리 송전선로	수[km]	R, L	집중정수회로
중거리 송전선로	수십[km]	R, L, C	집중정수회로
장거리 송전선로	수백[km] 이상	R, L, C, g	분포정수회로

2.2 단거리 송전선로

★ 단거리 송전선로

- 전선로의 길이가 수 킬로미터인 송전선로
- 누설 컨덕턴스 g 와 정전용량 C 의 크기가 아주 작기 때문에 g, C 를 무시한 집중정수회로로 취급

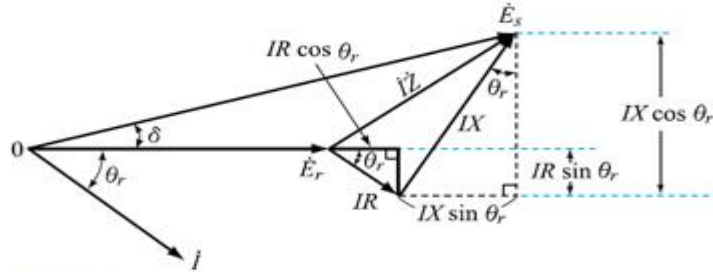


- \dot{E}_s : 송전단 전압(대지전압) [V]
- \dot{E}_r : 수전단 전압(대지전압) [V]
- \dot{I} : 선전류 [A]
- \dot{I}_s : 송전단 전류 [A]
- \dot{I}_r : 수전단 전류 [A]

[그림 6-6] 단거리 송전선로의 등가회로

2.2 단거리 송전선로

★ 전압강하



[그림 6-7] 전압강하 벡터도

$$\dot{E}_s = \dot{E}_r + \underbrace{IR \cos \theta_r + IX \sin \theta_r}_{\substack{\downarrow \\ \text{1항}}} + j \underbrace{(IX \cos \theta_r - IR \sin \theta_r)}_{\substack{\downarrow \\ \text{2항}}} \quad (6.10)$$

$$E_s = \sqrt{(E_r + IR \cos \theta_r + IX \sin \theta_r)^2 + (IX \cos \theta_r - IR \sin \theta_r)^2} \quad (6.11)$$

$$E_s \approx E_r + I(R \cos \theta_r + X \sin \theta_r) \quad (6.12)$$

$$e = E_s - E_r = I(R \cos \theta_r + X \sin \theta_r) \quad (6.13)$$

2.2 단거리 송전선로

★ 전압강하율 ★

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{E_s - E_r}{E_r} \times 100 = \frac{e}{E_r} \times 100 \\ &= \frac{I(R \cos \theta_r + X \sin \theta_r)}{E_r} \times 100 \\ &= \frac{P}{E_r^2} (R + X \tan \theta) \times 100 [\%]\end{aligned}\tag{6.14}$$

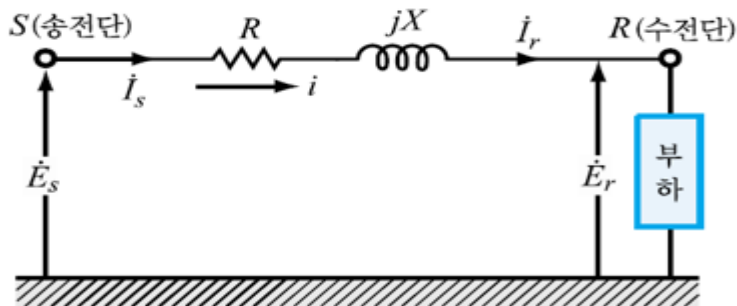
★ 전압변동률

★ 전압변동률 ★

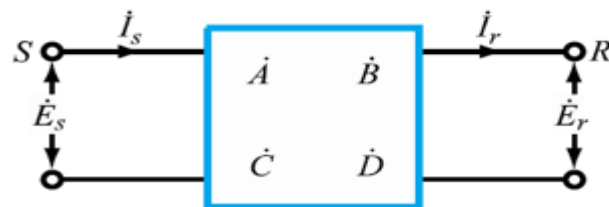
$$\text{전압변동률} = \frac{E_{ro} - E_r}{E_r} \times 100 [\%]\tag{6.18}$$

2.2 단거리 송전선로

★ 4단자 정수



(a) 등가회로



(b) 4단자 정수회로

[그림 6-8] 단거리 송전선로의 등가회로와 4단자 정수회로

$$\begin{aligned} \dot{E}_s &= \dot{A}\dot{E}_r + \dot{B}\dot{I}_r = \dot{E}_r + \dot{Z}\dot{I}_r \\ \dot{I}_s &= \dot{C}\dot{E}_r + \dot{D}\dot{I}_r = \dot{I}_r \end{aligned} \quad (6.19)$$

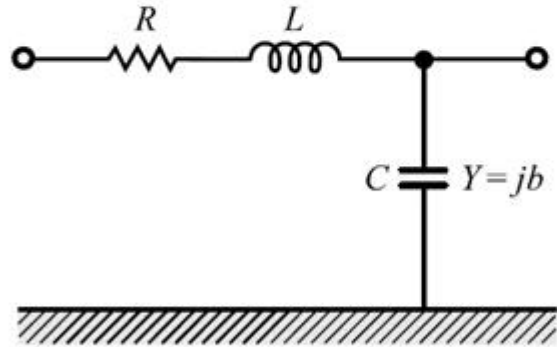
★ 단거리 송전선로의 4단자 정수 ★

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

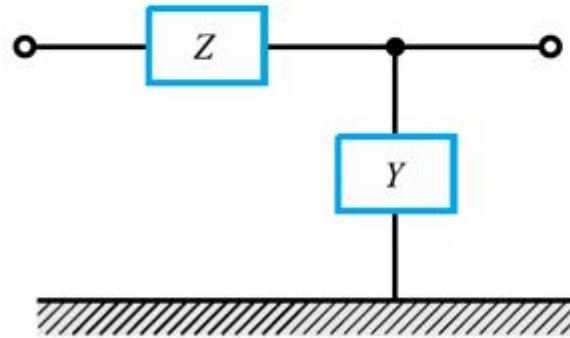
2.3 중거리 송전선로

★ 중거리 송전선로

- 전선로의 길이가 수십 킬로미터인 송전선로
- 저항 R 과 인덕턴스 L 을 합쳐 임피던스 Z 로 표현하고, 정전용량 C 는 어드미턴스 Y 로 표현



(a) 집중정수회로

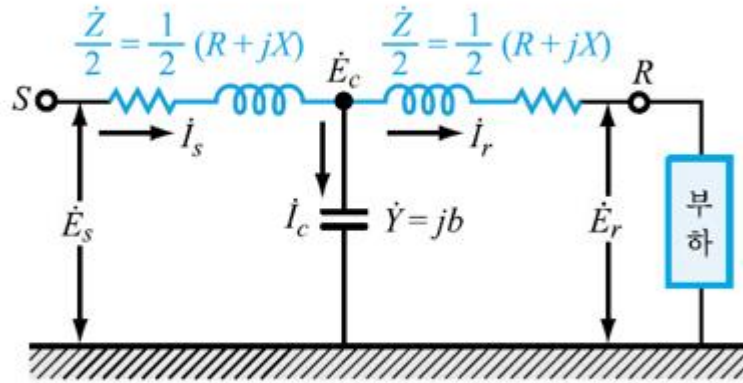


(b) 등가회로

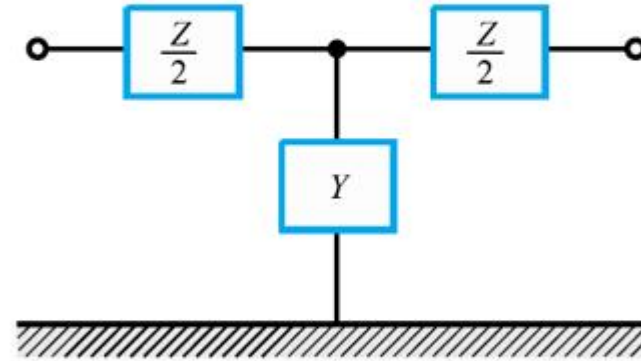
[그림 6-9] 중거리 송전선로의 등가회로

2.3 중거리 송전선로

★ T형 회로



(a) T형 회로



(b) T형 회로의 등가회로

[그림 6-10] T형 회로와 T형 회로의 등가회로

2.3 중거리 송전선로

★ 송전단 전압과 송전단 전류

$$\begin{aligned}\dot{E}_s &= \dot{E}_c + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{I}_s \\ \dot{I}_s &= \dot{I}_r + \dot{I}_c\end{aligned}\tag{6.21}$$

★ 등가회로 병렬접속점의 전압과 전류

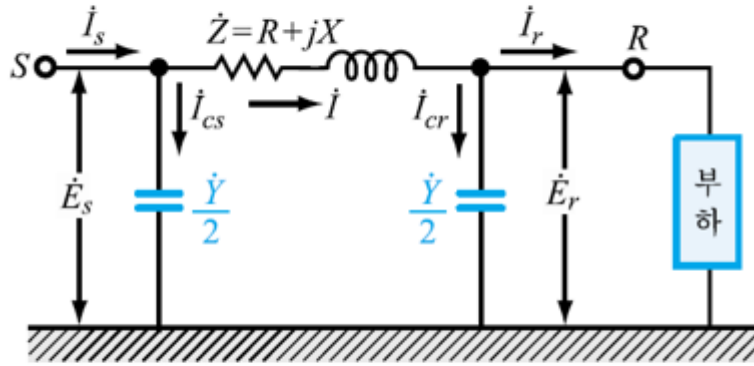
$$\begin{aligned}\dot{E}_c &= \dot{E}_r + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{I}_r \\ \dot{I}_c &= \dot{Y}\dot{E}_c\end{aligned}\tag{6.22}$$

★ 수전단 전압/전류로 표현한 송전단 전압/전류

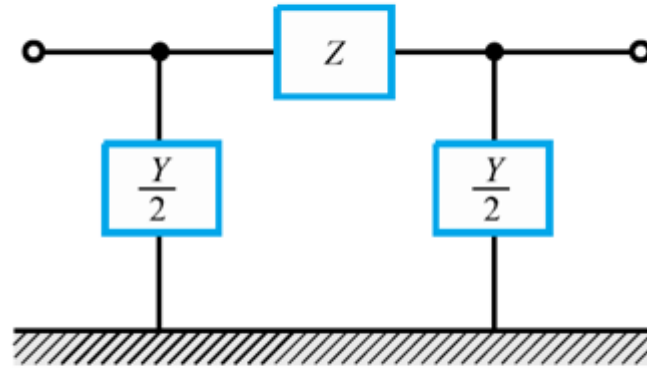
$$\begin{aligned}\dot{E}_s &= \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}\right)\dot{E}_r + \dot{Z}\left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4}\right)\dot{I}_r \\ \dot{I}_s &= \dot{Y}\dot{E}_r + \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}\right)\dot{I}_r\end{aligned}\tag{6.23}$$

2.3 중거리 송전선로

★ π 형 회로



(a) π 형 회로



(b) π 형 회로의 등가회로

[그림 6-12] π 형 회로와 π 형 회로의 등가회로

2.3 중거리 송전선로

★ 송전단 전압과 송전단 전류

$$\begin{aligned}\dot{E}_s &= \dot{E}_r + \dot{Z}\dot{I} \\ \dot{I}_s &= \dot{I}_{cs} + \dot{I}\end{aligned}\tag{6.25}$$

★ 각 부분의 전류

$$\begin{aligned}\dot{I}_{cr} &= \frac{\dot{Y}}{2}\dot{E}_r \\ \dot{I}_{cs} &= \frac{\dot{Y}}{2}\dot{E}_s \\ \dot{I} &= \dot{I}_{cr} + \dot{I}_r = \frac{\dot{Y}}{2}\dot{E}_r + \dot{I}_r\end{aligned}\tag{6.26}$$

★ 수전단 전압/전류로 표현한 송전단 전압/전류

$$\begin{aligned}\dot{E}_s &= \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}\right)\dot{E}_r + \dot{Z}\dot{I}_r \\ \dot{I}_s &= \dot{Y}\left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4}\right)\dot{E}_r + \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}\right)\dot{I}_r\end{aligned}\tag{6.27}$$

2.4 장거리 송전선로

★ 장거리 송전선로

- 전선로의 길이가 100킬로미터를 초과하는 송전선로
- 분포정수회로로 취급
- 단위길이당 직렬 임피던스와 병렬 어드미턴스

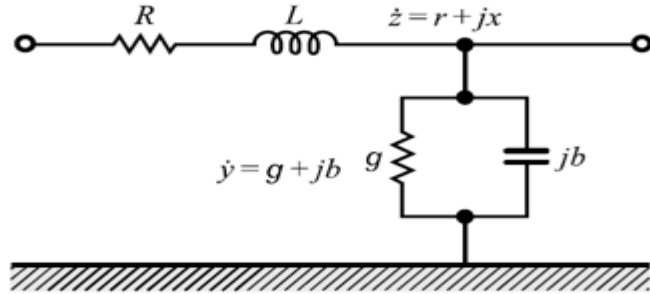
$$\dot{z} = r + j\omega L = r + jx [\Omega/\text{km}]$$

$$\dot{y} = g + j\omega C = g + jb [\text{U}/\text{km}]$$

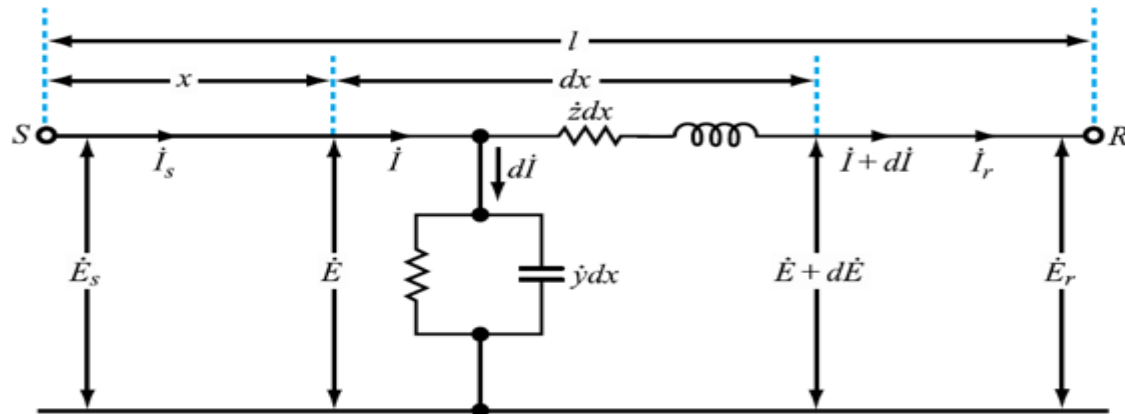
(6.29)

2.4 장거리 송전선로

★ 장거리 송전선로



[그림 6-14] 장거리 송전선로에서 미소부분 등가회로



[그림 6-15] 송전선로 각 부분의 전압과 전류

2.4 장거리 송전선로

★ 장거리 송전선로의 4단자 정수

★ 장거리 송전선로의 4단자 정수 ★

- 송전선로 150[km] 이상

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} + \frac{(\dot{Z}\dot{Y})^2}{24} & \dot{Z} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{6} + \frac{(\dot{Z}\dot{Y})^2}{120} \right) \\ \dot{Y} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{6} + \frac{(\dot{Z}\dot{Y})^2}{120} \right) & 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} + \frac{(\dot{Z}\dot{Y})^2}{24} \end{bmatrix} \quad (6.45)$$

- 송전선로 150[km] 이하

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} & \dot{Z} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{6} \right) \\ \dot{Y} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{6} \right) & 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \end{bmatrix} \quad (6.46)$$

2.5 특성 임피던스와 전파 정수

★ 특성 임피던스

$$\dot{Z}_w = \sqrt{\frac{\dot{z}}{\dot{y}}} = \sqrt{\frac{r+jx}{g+jb}} \doteq \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega] \quad (6.47)$$

★ 전파 정수

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z}\dot{y}} = \sqrt{(r+jx)(g+jb)} \doteq \sqrt{(j\omega L)(j\omega C)} = j\omega \sqrt{LC} [\text{rad}] \quad (6.48)$$