

회로이론 및 제어공학

핵심 요점정리

세종전기소방학원

043)224-3200

제1장. 직류회로

1. 전기의 본질

1) 전자의 전하량(전기량)

- (1) 전자의 전하량 $e = 1.602 \times 10^{-19} [C]$
- (2) 전자의 질량 $m = 9.10955 \times 10^{-31} [kg]$
- (3) 양자의 질량 $m_p = 1.67261 \times 10^{-27} [kg]$

2) 전하량의 계산 ★★★

$$Q = C \times V = I \times t = n \times e$$

여기서, Q : 전하량[C], V : 전압[V], I : 전류[A], t : 시간[s]

n : 전자 수, e : 전자 1개의 전기량[C]

C : 정전용량 또는 Capacitance[F]

3) 직류와 교류

- (1) 직류(DC) : 시간에 따라서 전압, 전류의 크기가 일정, 대문자로 표기
- (2) 교류(AC) : 시간에 따라서 전압, 전류의 크기가 변화, 소문자로 표기

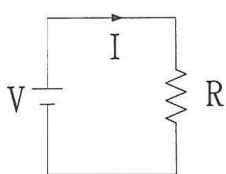
2. 옴의 법칙

1) 정의 ★★★

(1) 정의

도체에 흐르는 전류는 전압에 비례하고 회로의 전기저항에 반비례한다.

(2) 상호관계



V(전압)	
I(전류)	R(저항)

$$\textcircled{1} \text{ 전류 } I = \frac{V}{R} [A]$$

$$\textcircled{2} \text{ 전압 } V = IR [V]$$

$$\textcircled{3} \text{ 저항 } R = \frac{V}{I} [\Omega]$$

2) 전류

(1) 정의

- ① 전자의 흐름이다.
- ② 단위시간당 이동한 전기의 양을 말한다.
- ③ 단위 : Ampere(암페어)[A]

④ 직류식 표현 $I = \frac{Q}{t} [A]$

⑤ 교류식 표현 $i = \frac{dq}{dt} [A], q = \int i dt [C]$

(2) 산출식 ★★★

전류 $I = \frac{Q}{t} = \frac{V}{R} [A] [C/s]$

여기서, Q : 전기량[C], t : 시간[s], V : 전압[V], R : 저항[Ω]

3) 전압(voltage)

(1) 정의 ★★★


① 도체의 양단에 일정한 전류를 계속 흐르게 하는 전기적 힘을 말한다.

② $Q[C]$ 의 전기량이 이동하여 $W[J ; \text{joule}]$ 만큼 행한 일의 양

③ 단위 : Volt(볼트)[V]

④ 직류식 표현 $V = \frac{W}{Q} [J/C], W = QV [J]$

⑤ 교류식 표현 $v = \frac{dw}{dq}, w = \int v dq [J]$

⑥ 심벌 : 

(2) 산출식

전압 $V = \frac{W}{Q} = IR [V] [J/C]$

여기서, W : 일 또는 전력량[J], Q : 전기량[C], I : 전류[A]
R : 저항[Ω]


4) 저항(Resistance)

(1) 정의 ★

① 전류의 흐름을 방해하는 물리량으로서 저항이 클수록 전류는 작아지며, 저항이 작을수록 전류는 증가한다.

② 일반적으로 도체의 전기저항은 재료의 종류 및 온도에 따라 다르다.

③ 단위 : ohm(옴)[Ω]

④ 심벌 : 

⑤ 컨덕턴스의 역수 : $R = \frac{1}{G}, G : \text{컨덕턴스}[U]$

(2) 산출식 ★★

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{\ell}{A} = \rho \frac{\ell}{\frac{\pi}{4} \times D^2} = \frac{\ell}{kA} [\Omega]$$

ρ : 고유저항 [$\Omega \cdot m$], ℓ : 도체의 길이 [m], A : 도체의 단면적 [m^2]

k : 도전율 [Ω/m], D : 도체의 직경 [m]

5) 컨덕턴스(conductance)

(1) 정의 ★

① 전류의 흐름을 도와주는 물리량으로서 저항의 역수를 말한다.

② 단위 : mho(모) [Ω], 또는 지멘스(siemens) [S]

(2) 산출식

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V}$$

여기서, R : 저항 [Ω], V : 전압 [V], I : 전류 [A]

6) 온도변화에 따른 저항 값 산출 ★

$$R_T = R_t \times [1 + \alpha_t (T - t)]$$

여기서, R_T : $T[^\circ C]$ 일 때 저항값 [Ω]

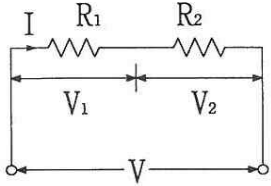
R_t : $t[^\circ C]$ 일 때 저항값 [Ω]

α_t : 저항온도계수

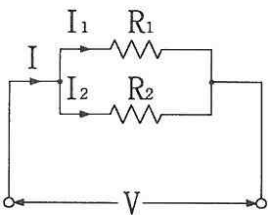
T : 변환 후 온도 [$^\circ C$], t : 변환 전 온도 [$^\circ C$]

3. 저항회로의 연결

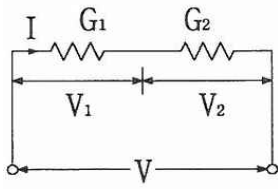
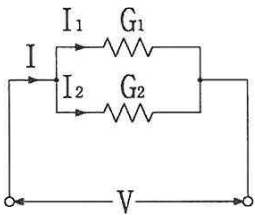
1) 저항의 직렬연결 ★★★

	<p>(1) 합성전압(전전압) : $V = IR_T = V_1 + V_2$</p> <p>(2) 합성전류(전전류) : $I = \frac{V}{R_T} = \frac{V}{R_1 + R_2}$</p> <p>(3) 합성저항 : $R_T = R_1 + R_2$</p> <p>(4) 분압법칙</p> <p>① $V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V$</p> <p>② $V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V$</p>
---	---

2) 저항의 병렬연결 ★★★

	<p>(1) 합성전압(전전압) : $V = IR_T = V_1 = V_2$</p> <p>(2) 합성전류(전전류) : $I = \frac{V}{R_T} = I_1 + I_2$</p> <p>(3) 합성저항 :</p> $R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$ <p>(4) 분류법칙</p> <p>① $I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times I$</p> <p>② $I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times I$</p>
--	---

4. 컨덕턴스의 연결 ★

직렬연결	병렬연결
 <p>① 합성 컨덕턴스</p> $G_T = \frac{1}{R_T} = \frac{G_1 \times G_2}{G_1 + G_2}$ <p>② 전 전류</p> $I = \frac{V}{R_T} = G_T V$	 <p>① 합성 컨덕턴스</p> $G_T = \frac{1}{R_T} = G_1 + G_2$ <p>② 전 전류</p> $I = \frac{V}{R_T} = G_T V = I_1 + I_2$

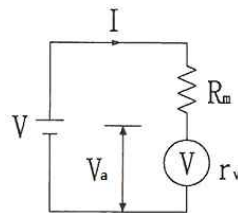
5. 배율기와 분류기

1) 배율기(Multiplier) ★★★

(1) 정의

전압의 측정범위를 확대시키기 위하여 전압계와 직렬로 접속한 저항

(2) 배율기 저항



$$R_m = (m - 1) \times r_v [\Omega]$$

여기에서, m : 배율 ($m = \frac{V}{V_a}$)

r_v : 전압계 내부저항 [Ω]

V : 확대하고자 하는 전압 [V]

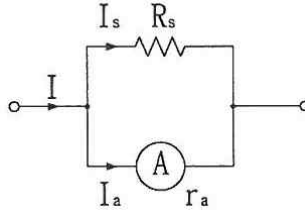
V_a : 전압계 지시값[V]

2) 분류기(Shunt) ★★

(1) 정의

전류의 측정범위를 확대시키기 위하여 전류계와 병렬로 접속한 저항

(2) 분류기 저항



$$R_s = \frac{1}{(m-1)} \times r_a [\Omega]$$

여기에서, m : 배율 ($m = \frac{I}{I_a} = 1 + \frac{r_a}{R_s}$)

r_a : 전류계 내부저항 [Ω]

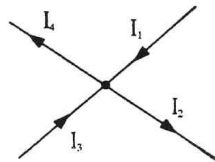
I : 확대하고자 하는 전류 [A]

I_a : 전류계 지시값 [A]

6. 키르히호프의 법칙

1) 제1법칙(전류평형의 법칙) ★★★

(1) 임의의 점에 유입, 유출되는 전류 대수의 합은 0이다.

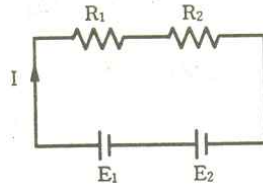


(2) 계산식

유입전류의 합 = 유출전류의 합, 즉 $\sum I = 0 \rightarrow I_1 + I_3 - (I_2 + I_4) = 0$

2) 제2법칙(전압평형의 법칙) ★

(1) 임의의 폐회로망 내에서 각 지로에 유기되는 기전력의 총합은 그 지로 내에 발생한 전압강하의 총합과 같다.



(2) 계산식

$$\underline{\Sigma E = \Sigma IR \quad E_1 + E_2 = IR_1 + IR_2}$$

7. 전력, 전력량 및 열량 ★★★

1) 전력

(1) 정의

- ① 단위시간당 한 일의 양을 말한다.
- ② 단위 : Watt(와트)[W]

(2) 전력계산

$$\underline{P = \frac{W}{t} = VI = I^2R = \frac{V^2}{R} [W]}$$

여기서, W : 전력량[W·s], t : 시간[s]

V : 전압[V], I : 전류[A], R : 저항[Ω]

2) 전력량

(1) 정의

- ① 전력에 사용시간을 곱한 값
- ② 단위 : Joule(줄)[J] 또는 [W·s]

(2) 전력량 계산

$$\underline{W = QV = Pt = VIt = I^2Rt = \frac{V^2}{R}t}$$

여기서, Q : 전하[C], V : 전압[V]

3) 열량

(1) 주율의 법칙

일정시간동안 저항 R에 전류 I가 흐를 때 저항 R에서 소비되는 에너지 W [J]는 열에너지 H[cal](칼로리)로 변환되며 이것을 줄의 법칙이라 한다.

(2) 열량의 계산

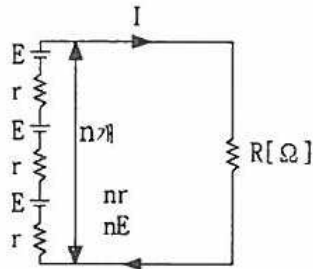
$$H = 0.24 \times Pt = 0.24 \times VIt = 0.24 \times I^2 Rt = 0.24 \times \frac{V^2}{R} t [\text{cal}]$$

$$= mc\Delta t = mc(t_2 - t_1)$$

여기서, P : 전력[W], t : 시간[s], m : 질량[g], c : 비열[cal/g · °C]

8. 전지의 접속

1) 직렬접속 ★



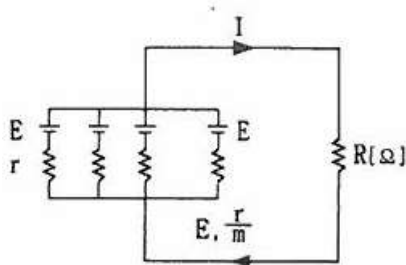
① 합성기전력 $E_T = nE [\text{V}]$

② 합성저항 $R_T = R + nr [\Omega]$

③ 전 전류 $I = \frac{E_T}{R_T} = \frac{nE}{nr + R} [\text{A}]$

여기서, n : 전지의 직렬연결 수, R : 부하저항, r : 전지 내부저항
 E : 전지 1개의 기전력[V]

2) 병렬접속 ★



① 합성기전력 $E_T = E [\text{V}]$

② 합성저항 $R_T = R + \frac{r}{m} [\Omega]$

$$\textcircled{3} \text{ 전 전류 } I = \frac{E_T}{R_T} = \frac{E}{\frac{r}{m} + R} [A]$$

여기서, m : 전지의 병렬연결 수

R : 부하저항

r : 전지 내부저항

E : 전지 1개의 기전력[V]

3) 직병렬접속 ★★★

$$\textcircled{1} \text{ 합성기전력 } E_T = nE [V]$$

$$\textcircled{2} \text{ 합성저항 } R_T = R + \frac{nr}{m} [\Omega]$$

$$\textcircled{3} \text{ 전 전류 } I = \frac{E_T}{R_T} = \frac{nE}{\frac{nr}{m} + R} [A]$$

여기서, m : 전지의 병렬연결 수

n : 전지의 직렬연결 수

R : 부하저항

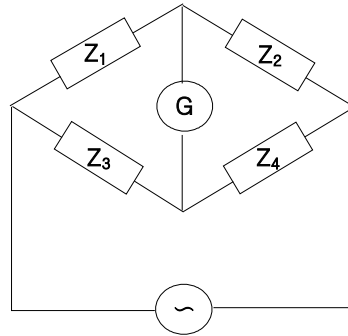
r : 전지 내부저항

E : 전지 1개의 기전력[V]

9. 휘스톤(Wheatstone) 브리지 평형

1) 개념 ★

브리지 회로의 기본형으로 저항을 측정하는 장치이며, 보통 $0.1[M\Omega] \sim 1[M\Omega]$ 까지의 저항을 측정하는데 사용하는 계기



2) 브리지 평형조건 ★★★

(1) 검류계에 전류가 흐르지 않을 조건

(2) $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$, $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$

제2장. 정현파 교류

1. 교류회로의 기초

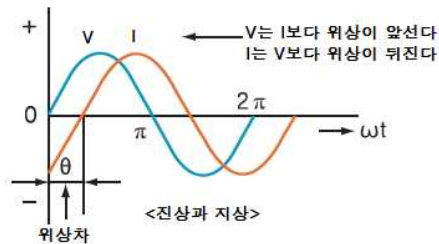
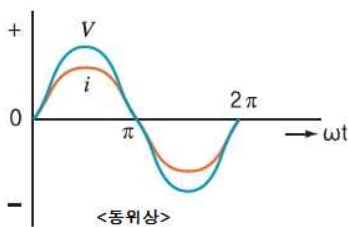
1) 각속도(각주파수)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

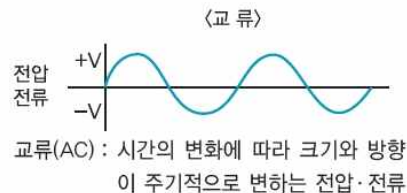
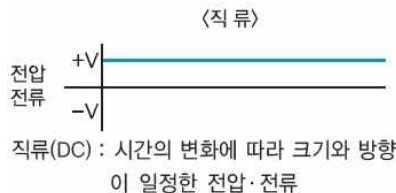
여기서, ω : 각속도[rad/s], π : 3.14, f : 주파수 [Hz]

2) 위상의 표현

- ① 지상 : 시간적으로 느린 상태. 즉, θ 만큼 느리다(뒤진다).
- ② 진상 : 시간적으로 빠른 상태. 즉, θ 만큼 빠르다(앞선다).
- ③ 동상(동위상) : 시간적 차이가 없는 상태.



3) 직류(DC)와 교류(AC)의 표현



2. 교류의 표현방법

1) 순시값

(1) 정의

순간순간 변하는 교류의 임의의 시간에 있어서 전압이나 전류의 값

(2) 순시값의 기본 표현법

$$\text{순시값} = \text{최대값} \times \sin(\omega t + \theta)$$

$$\textcircled{1} \text{ 전압 } v = V_m \sin(\omega t + \theta) [\text{V}]$$

$$\textcircled{2} \text{ 전류 } i = I_m \sin(\omega t + \theta) [\text{A}]$$

2) 평균값

(1) 정의

어떤 함수의 1주기에 대한 곡선의 면적을 구하여 그것을 다시 주기로 나눈 값

(2) 평균값의 기본 표현법

$$\textcircled{1} \text{ 전압 } V_a = \frac{1}{T} \int_0^T v dt [V] \quad \textcircled{2} \text{ 전류 } I_a = \frac{1}{T} \int_0^T i dt [A]$$

3) 실효값

(1) 정의

직류의 크기와 같은 일을 하는 교류의 크기 값으로 순시치의 제곱에 대한 1사이클 간의 평균값의 제곱근으로 나타낸다.

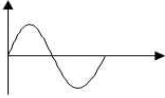

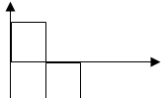
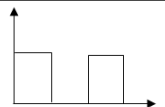
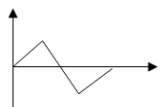
(2) 실효값의 기본 표현법

$$\textcircled{1} \text{ 전압 } V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt [V]} \quad \textcircled{2} \text{ 전류 } I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt [A]}$$

4) 파형율과 파고율

파형율	파고율
$\frac{\text{실효값}}{\text{평균값}}$	$\frac{\text{최대값}}{\text{실효값}}$

5) 파형에 따른 실효값, 평균값, 파고율, 파형율

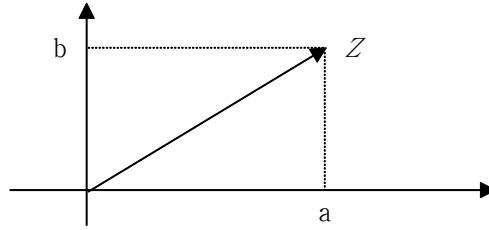
구분	파형	실효값	평균값	파형율	파고율
정현파		$\frac{\text{최대값}}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\pi} \times \text{최대값}$	1.11	$\sqrt{2}$
반파정류		$\frac{\text{최대값}}{2}$	$\frac{1}{\pi} \times \text{최대값}$	1.57	2
구형파		최대값	최대값	1	1
구형반파		$\frac{\text{최대값}}{\sqrt{2}}$	$\frac{\text{최대값}}{2}$	1.414	$\sqrt{2}$
삼각파		$\frac{\text{최대값}}{\sqrt{3}}$	$\frac{\text{최대값}}{2}$	1.155	$\sqrt{3}$

제3장. 기본교류회로

1. 복소수

1) 복소수의 개념

a, b 가 실수일 때 $Z = a + jb$ 를 복소수라 한다.



① 절대치 $|Z| = \sqrt{a^2 + b^2}$

② 위상 $\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a}$

a : 실수부, b : 허수부, j : 허수단위 ($j = \sqrt{-1}$, $j^2 = -1$)

2) 복소수의 해석

복소수	$A = a + jb$	$A = a - jb$
극형식	$A = A \angle \theta$	$A = A \angle -\theta$
삼각함수 형식	$ A \angle \theta = A (\cos\theta + j\sin\theta)$	$ A \angle -\theta = A (\cos\theta - j\sin\theta)$
지수형식	$A = A e^{j\theta}$	$A = A e^{-j\theta}$

3) 극형식의 계산

$$Z_1 = |Z_1| \angle \theta \quad Z_2 = |Z_2| \angle \theta$$

① 곱셈 $Z_1 \times Z_2 = |Z_1| \times |Z_2| \angle \theta_1 + \theta_2$

② 나눗셈 $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{|Z_1|}{|Z_2|} \angle \theta_1 - \theta_2$

2. R, L, C 단일회로의 해석

1) 임피던스(Impedance)

(1) 정의

- ① 교류에서 전류의 흐름을 방해하는 것으로 저항과 리액턴스의 벡터합
- ② 임피던스의 표현

$Z = \frac{1}{Y} = \frac{V}{I} = R \pm jX [\Omega]$	R : 저항 [Ω] X : 리액턴스 [Ω] Y : 어드미턴스 [U] V : 전압 [V] I : 전류 [A]
---	--

- ③ 리액턴스(X) : L 또는 C에서 전류의 흐름을 방해하는 물리량

(2) 임피던스의 계산

- ① 크기 $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$
- ② 위상 $\theta = \pm \tan^{-1} \frac{X}{R}$
- ③ 저항 $R = \sqrt{Z^2 - X^2}$
- ④ 리액턴스 $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$
- ⑤ 역률 $\cos \theta = \frac{R}{Z}$
- ⑥ 무효율 $\sin \theta = \frac{X}{Z}$

2) 어드미턴스(Admittance)

(1) 정의

- ① 교류에서 전류의 흐름을 도와주는 것으로 컨덕턴스(conductance)와 서셉턴스(susceptance)의 벡터 합
- ② 임피던스의 역수이다.
- ③ 어드미턴스의 표현

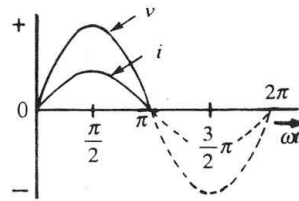
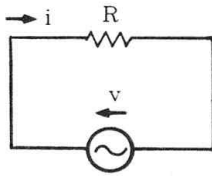
$Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{V} = G \mp jB [\text{U}]$	G : 컨덕턴스 [U] B : 서셉턴스 [U] Z : 임피던스 [Ω] V : 전압 [V] I : 전류 [A]
---	---

- ④ 컨덕턴스(G) : 저항(R)의 역수
- ⑤ 서셉턴스(B) : 리액턴스(X)의 역수

(2) 어드미턴스의 계산

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}$$

3) R(저항)만의 회로

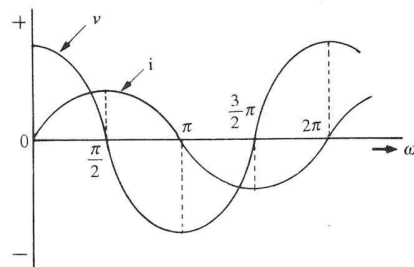
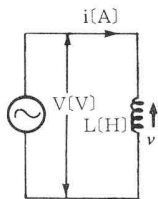


① 임피던스 $Z=R[\Omega]$

② 위상관계 : 동상

③ 전압 $V = IR[V]$, 전류 $I = \frac{V}{R}[A]$

4) L(인덕턴스)만의 회로



① 임피던스 $Z = jX_L[\Omega]$

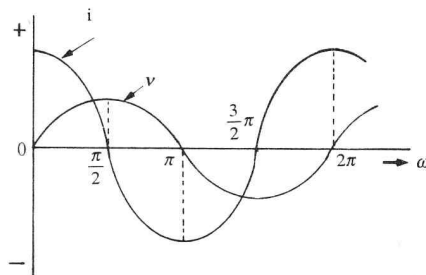
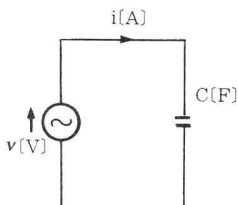
② 유도성리액턴스 $X_L = \omega L = 2\pi fL[\Omega]$

여기서, L : 인덕턴스(inductance)[H], f : 주파수[Hz]

③ 전류 $I = \frac{V}{X_L}[A]$, 전압 $V = IX_L[V]$

④ 위상관계 : 전압이 전류보다 90° 만큼 빠르다.(유도성)

5) C(정전용량) 회로

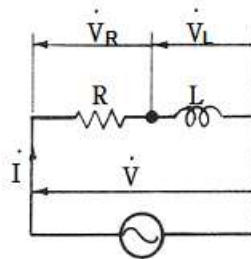


(1) 특징

- ① 전류 i 가 콘덴서 C 에 흐를 때 전류가 전압보다 90° 만큼 빠르다.
 ② 전류가 빠른 진상전류이다.(용량성)
 (2) 회로의 해석
 ① 임피던스 $Z = -jX_c [\Omega]$
 ② 용량성리액턴스 $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega]$
 여기서, C : 정전용량(capacitance)[F], f : 주파수[Hz]
 ③ 전류 $I = \frac{V}{X_c} [A]$, 전압 $V = IX_c [V]$

3. RL 직렬회로

1) 임피던스회로의 해석



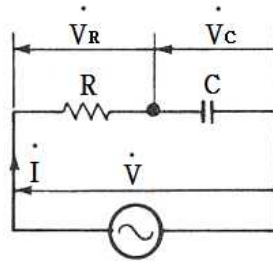
- (1) 합성임피던스 $Z = R + jX_L = R + j\omega L [\Omega]$
 (2) 위상 $\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$, 크기 $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} [\Omega]$
 (3) 위상관계 : 전류가 전압보다 θ 만큼 뒤진다.(지상)
 전류 $I = \frac{V \angle 0}{Z \angle \theta} = \frac{V}{Z} \angle -\theta$
 (4) 역률 $\cos \theta = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$ 무효율 $\sin \theta = \frac{X_L}{Z} = \frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$

2) 전압의 계산

- (1) 전전압 $V = V_R + jV_L = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$
 (2) R양단 전압 $V_R = IR$
 (3) X_L 양단 전압 $V_L = IX_L$
 (4) 역률 $\cos \theta = \frac{V_R}{V}$, 무효율 $\sin \theta = \frac{V_L}{V}$

4. RC 직렬회로

1) 임피던스회로의 해석



(1) 합성임피던스 $Z = R - jX_c = R - j\frac{1}{\omega C} [\Omega]$

(2) 위상 $\theta = -\tan^{-1} \frac{X_c}{R}$, 크기 $Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} [\Omega]$

(3) 위상관계 : 전류가 전압보다 θ 만큼 앞선다.(진상)

$$\text{전류 } I = \frac{V \angle 0}{Z \angle -\theta} = \frac{V}{Z} \angle +\theta$$

(4) 역률 $\cos\theta = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$ 무효율 $\sin\theta = \frac{X_c}{Z} = \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$

2) 전압의 계산

(1) 전전압 $V = V_R - jV_c = \sqrt{V_R^2 + V_c^2}$

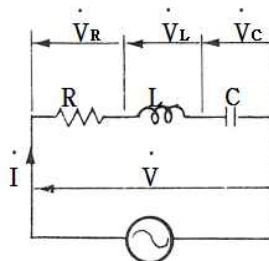
(2) R양단 전압 $V_R = IR$

(3) X_c 양단 전압 $V_c = IX_c$

(4) 역률 $\cos\theta = \frac{V_R}{V}$, 무효율 $\sin\theta = \frac{V_c}{V}$

5. RLC 직렬회로

1) 임피던스회로의 해석



- (1) 합성임피던스 $Z = R + j(X_L - X_c) = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) [\Omega]$
- (2) 위상 $\theta = \tan^{-1} \frac{X_L - X_c}{R}$; 크기 $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2} [\Omega]$

2) 위상의 해석

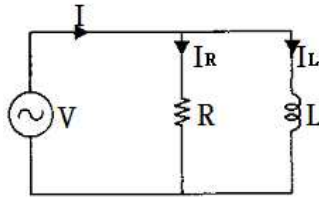
- (1) $X_L > X_c$: 유도성 부하, 전류가 전압보다 지상(늦다.)
- (2) $X_L = X_c$: 직렬공진
- (3) $X_L < X_c$: 용량성 부하, 전류가 전압보다 진상(빠르다.)

3) 직렬공진

- (1) 직렬공진 발생조건
- ① 임피던스의 허수부가 0인 조건
 - ② $Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$ 에서 $(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = 0$
- (2) 직렬공진의 특성
- ① 임피던스가 최소가 된다.
 - ② 전류가 최대가 된다.
 - ③ 직렬공진 주파수 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} [\text{Hz}]$
여기서, L : 인덕턴스[H], C : 정전용량[F]
- (3) 선택도(전압확대율, 첨예도, 저항에 대한 리액턴스 비)
- $$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} = \frac{V_L}{V} = \frac{V_C}{V} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$
- f_r : 공진주파수[Hz], f_2 : 고주파수, f_1 : 저주파수

6. RL 병렬회로

1) 어드미턴스회로의 해석



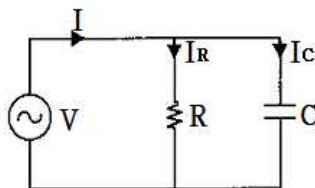
- (1) 합성어드미턴스 $Y = \frac{1}{R} - j\frac{1}{X_L} [\text{U}]$
- (2) 위상 $\theta = -\tan^{-1} \frac{R}{X_L}$, 크기 $Y = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}} [\text{U}]$
- (3) 위상관계 : 전류가 전압보다 θ 만큼 뒤진다.(지상)
- (4) 역률 $\cos\theta = \frac{G}{Y} = \frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$ 무효율 $\sin\theta = \frac{B}{Y} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$

2) 전류의 계산

- (1) 전전류 $I = I_R - jI_L = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$
- (2) R에 흐르는 전류 $I_R = \frac{V}{R}$
- (3) X_L 에 흐르는 전류 $I_L = \frac{V}{X_L}$
- (4) 역률 $\cos\theta = \frac{I_R}{I}$, 무효율 $\sin\theta = \frac{I_L}{I}$

7. RC 병렬회로

1) 어드미턴스회로의 해석



- (1) 합성어드미턴스 $Y = \frac{1}{R} + j\frac{1}{X_c} = \frac{1}{R} + j\omega [\text{U}]$
- (2) 위상 $\theta = \tan^{-1} \frac{R}{X_c}$, 크기 $Y = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_c^2}} [\text{U}]$
- (3) 위상관계 : 전류가 전압보다 θ 만큼 빠르다.(진상)

$$(4) \text{ 역률 } \cos\theta = \frac{G}{Y} = \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$$

$$(5) \text{ 무효율 } \sin\theta = \frac{B}{Y} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$$

2) 전류의 계산

$$(1) \text{ 전전류 } I = I_R + jI_c = \sqrt{I_R^2 + I_c^2}$$

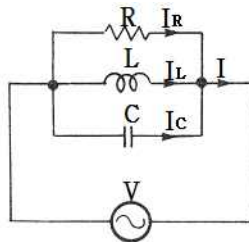
$$(2) R \text{에 흐르는 전류 } I_R = \frac{V}{R}$$

$$(3) X_c \text{에 흐르는 전류 } I_c = \frac{V}{X_c} = \omega CV$$

$$(4) \text{ 역률 } \cos\theta = \frac{I_R}{I}, \text{ 무효율 } \sin\theta = \frac{I_c}{I}$$

8. RLC 병렬회로의 해석

1) 어드미턴스회로의 해석



$$(1) \text{ 합성어드미턴스 } Y = \frac{1}{R} + j\left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}\right) = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$$

$$(2) \text{ 크기 } Y = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}\right)^2} V$$

2) 전류의 계산

$$(1) \text{ 전전류 } I = I_R + j(I_c - I_L) = \sqrt{I_R^2 + (I_c - I_L)^2}$$

3) 위상의 해석

$$(1) X_L > X_c \left(\frac{1}{X_c} > \frac{1}{X_L} \right) : \text{용량성 부하, 전류가 전압보다 진상(빠르다)}$$

$$(2) \underline{X_L = X_c \left(\frac{1}{X_c} = \frac{1}{X_L} \right) : \text{병렬공진}}$$

$$(3) X_L < X_c \left(\frac{1}{X_c} < \frac{1}{X_L} \right) : \text{유도성 부하, 전류가 전압보다 지상(늦다)}$$

4) 병렬공진

(1) 병렬공진 발생조건

① 어드미턴스의 허수부가 0인 조건

$$\textcircled{2} Y = \frac{1}{R} + j\left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}\right) = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \text{에서 } \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = 0$$

(2) 병렬공진의 특성

① 임피던스가 최대가 된다.(어드미턴스가 최소가 된다.)

② 전류가 최소가 된다.

$$\textcircled{3} \text{병렬공진 주파수 } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} [\text{Hz}]$$

(3) 선택도(전류확대율, 양호도)

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} = \frac{I_L}{I} = \frac{I_C}{I} = \frac{R}{\omega L} = \omega CR = R\sqrt{\frac{C}{L}}$$

f_r : 공진주파수[Hz], f_2 : 고주파수, f_1 : 저주파수

제4장. 단상교류 전력

1. 기본 교류전력

1) 피상전력(Apparent Power)

$$P_a = VI = I^2 Z = \frac{V^2}{Z} = \sqrt{P^2 + P_r^2} [VA]$$

여기서, V : 전압[V], I : 전류[A], Z : 임피던스[Ω]

2) 유효전력(Real Power; 소비전력, 평균전력, 일률)

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R} = P_a \cos \theta = VI \cos \theta = \sqrt{P_a^2 - P_r^2} [W]$$

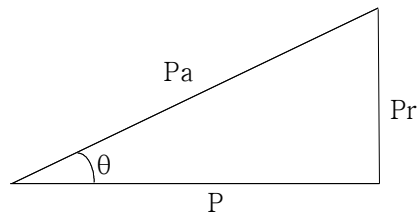
여기서, V : 전압[V], I : 전류[A], R : 저항[Ω], $\cos \theta$: 역률

3) 무효전력(Reactive Power)

$$P_r = I^2 X = \frac{V^2}{X} = P_a \sin \theta = VI \sin \theta = \sqrt{P_a^2 - P^2} [VAR]$$

여기에서, V : 전압[V], I : 전류[A], X : 리액턴스[Ω], $\sin \theta$: 무효율

4) 전력과 역률, 무효율과의 관계



(1) 역률

- ① 개념 : 피상전력에 대한 유효전력의 비를 말한다.

② 역률의 계산 :

$$\cos\theta = \frac{P}{P_a} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_r^2}} = \frac{P}{VI}$$

(2) 무효율

① 개념 : 피상전력에 대한 무효전력의 비를 말한다.

② 무효율의 계산 : $\sin\theta = \frac{P_r}{P_a} = \frac{P_r}{\sqrt{P^2 + P_r^2}} = \frac{P_r}{VI}$

2. 복소 피상전력

$$P_a = \overline{VI} = P \pm jP_r$$

① \overline{V} : 전압의 공액 복소수, I : 전류, P : 유효전력[W] P_r : 무효전력[var]

② $P_r > 0$: 용량성 부하, $P_r < 0$: 유도성 부하

3. 최대전력 전송

1) 저항부하

(1) 최대전력 전송조건

① 부하저항(R)과 전원의 내부저항(r)이 같을 때 최대전력이 전송된다.

$$\underline{R_L = r}$$

② 등가회로



(2) 최대전력

$$P_{\max} = \frac{V^2}{4R_L} \quad (R_L : \text{부하저항}, V : \text{전압})$$

2) 임피던스 부하

(1) 최대전력 전송조건



$Z_L = \overline{Z_g}$ (Z_L : 부하측 임피던스, Z_g : 전원측 임피던스)

(2) 최대전력 $P_{\max} = \frac{V^2}{4Z_L}$

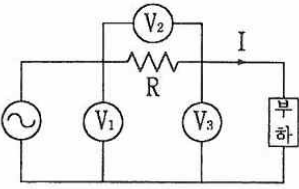
3) L 또는 C 의 단독부하

(1) L 부하 $P_{\max} = \frac{V^2}{2X_L}$

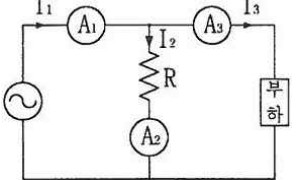
(2) C 부하 $P_{\max} = \frac{V^2}{2X_C} = \frac{1}{2} \omega C V^2$

4. 3전압계법, 3전류계법

1) 3전압계법

	<p>① 전력 $P = \frac{1}{2R} (V_1^2 - V_2^2 - V_3^2)$</p> <p>② 역률 $\cos\theta = \frac{V_1^2 - V_2^2 - V_3^2}{2V_2V_3}$</p>
---	---

2) 3전류계법

	<p>① 전력 $P = \frac{R}{2} (I_1^2 - I_2^2 - I_3^2)$</p> <p>② 역률 $\cos\theta = \frac{I_1^2 - I_2^2 - I_3^2}{2I_2I_3}$</p>
---	--

5. 전압, 전류가 순시값인 경우 전력계산

전압 $v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \theta_1) = V_m \sin(\omega t + \theta_1)$

전류 $i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta_2) = I_m \sin(\omega t + \theta_2)$

1) 피상전력

$P_a = VI = \frac{1}{2} V_m I_m [\text{VA}]$

2) 유효전력(평균전력, 소비전력)

① 전력 $P = VI \cos \theta = \frac{1}{2} V_m I_m \cos \theta [W]$

② 위상차 $\theta = |\theta_1 - \theta_2|$

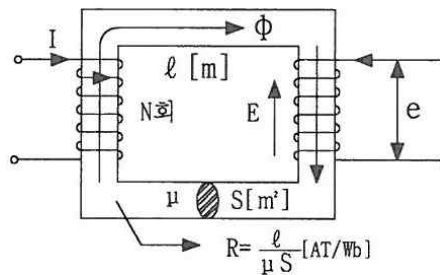
3) 무효전력

① 전력 $P = VI \sin \theta = \frac{1}{2} V_m I_m \sin \theta [VAR]$

② 위상차 $\theta = |\theta_1 - \theta_2|$

제5장. 결합회로

1. 전자유도 관련법칙



(1) 패러데이(faraday) 법칙

① 정의

전자유도에 의해 발생하는 기전력의 크기는 쇄교자속의 시간 변화감쇄율에 비례한다.

② 유기기전력 $e = \frac{d\phi}{dt} [V]$

(여기서, $d\phi$: 자속의 변화, dt : 시간의 변화)

③ 자속변화에 따른 기전력의 크기를 결정한 법칙

(2) 렌츠의 법칙

① 정의

전자유도에 의해 발생하는 기전력은 자속이 증가될 때는 자속을 감소시키는 방향으로, 감소될 때는 자속을 증가시키는 방향으로 발생한다.

② 유기기전력 $e = - \frac{d\phi}{dt} [V]$

③ 자속변화에 따른 기전력의 방향(유도전류의 방향)을 결정한 법칙

(3) 패러데이-렌츠 전자유도 법칙

$$\text{유기기전력 } e = -N \frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} [\text{V}]$$

여기서, N : 권선수

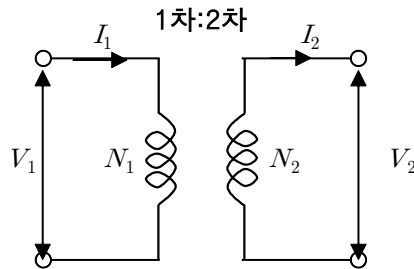
$d\phi$: 자속의 변화량[Wb]

dt : 시간변화[s]

L : 인덕턴스[H]

di : 전류의 변화량[A]

2. 권수비



$$a = n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{E_1}{E_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

N_1, N_2 : 1차, 2차 권선수

V_1, V_2 : 1차, 2차 정격전압[V]

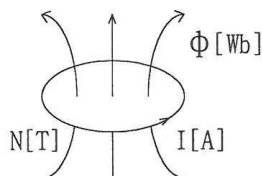
I_1, I_2 : 1차, 2차 정격전류[A]

E_1, E_2 : 1차, 2차 상전압[V]

Z_1, Z_2 : 1차측, 2차측 임피던스[Ω]

3. 인덕턴스

(1) 자기인덕턴스



① 정의 : 코일의 권수와 형태, 재질 등에 따라 정해지는 상수

② 계산식

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{\mu SN^2}{\ell} [\text{H}]$$

여기서, N : 권선수, ϕ : 자속 [Wb], I : 전류[A], S : 면적[m²]
 ℓ : 자로의 길이[m]

(2) 상호인덕턴스

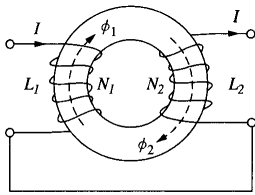
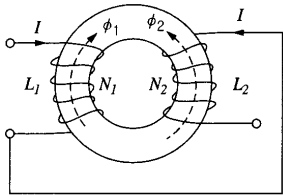
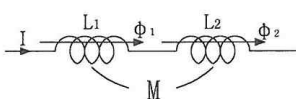
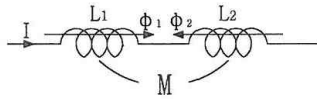
$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

여기서, M : 상호인덕턴스[H], k : 결합계수, L_1, L_2 : 자기인덕턴스[H]

(3) 결합계수

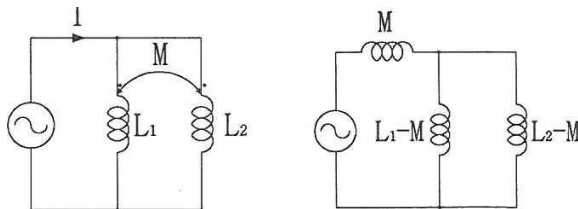
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (\text{완전결합의 경우} = \text{누설이 없는 경우 } k=1)$$

4. 인덕턴스의 직렬접속

가동결합(가극성)	차동결합(감극성)
	
합성인덕턴스 $L = L_1 + L_2 + 2M$	합성인덕턴스 $L = L_1 + L_2 - 2M$
	

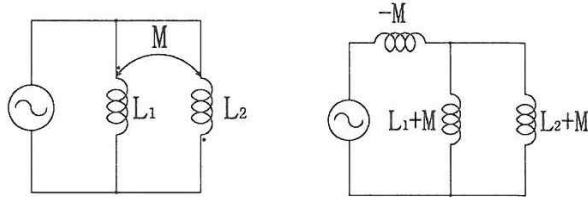
5. 인덕턴스의 병렬접속

(1) 가동결합



$$L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$

(2) 차동 결합



$$L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}$$

제6장. 회로망

1. 선형성과 비선형성

1) 선형성

- ① 전압, 전류가 시간에 따라 변화하는 특성
- ② 저항, 콘덴서, 철심이 없는 코일
- ③ 소자 자체에 영향이 없다.

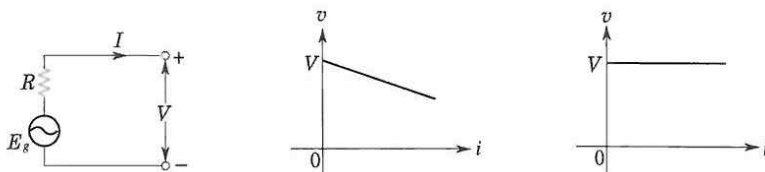
2) 비선형성

- ① 전압, 전류가 시간에 관계없이 일정한 특성
- ② 반도체 소자, 철심이 있는 코일
- ③ 소자 자체에 영향이 있다.

2. 전압원과 전류원

1) 전압원

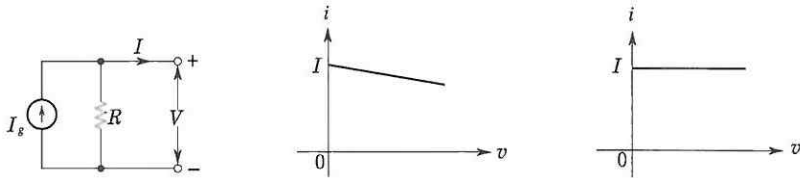
전압원이란 그 출력단자의 전위차가 시간의 함수로 나타나며, 그 크기 및 시간에 대한 변화가 전류의 크기에 무관한 것을 말하며 내부임피던스는 0이다.



- ① 이상적인 전압원 : 전류의 크기는 변할지라도 전압의 크기는 항상 일정.
내부저항=0

② 종속적인 전압원 : 전압의 크기가 일정한 크기의 매질상수에 의해 변화.

2) 전류원

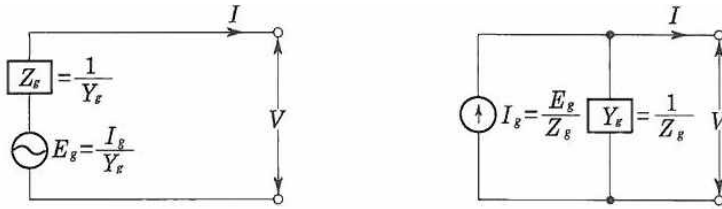


① 이상적인 전류원 : 전압의 크기가 변할지라도 전류의 크기는 항상 일정.

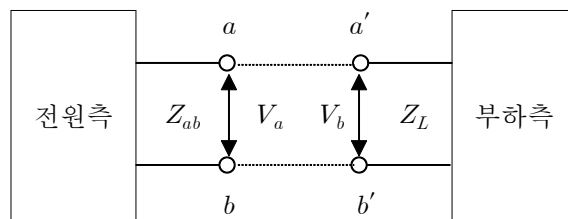
내부저항=∞

② 종속적인 전류원 : 전류의 크기가 어떤 매질의 상수에 의해 변화.

3) 등가변환



3. 테브낭의 정리



$$\text{전류 } I = \frac{V_a - V_b}{Z_{ab} + Z_L} = \frac{V_{ab}}{Z_{ab} + Z_L} [\text{A}]$$

Z_{ab} : 전원측으로 바라본 합성 임피던스[Ω]

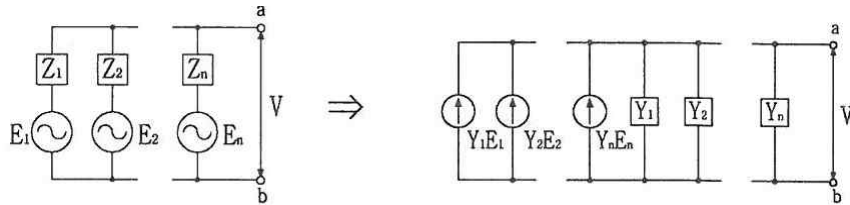
Z_L : 부하측으로 바라본 합성 임피던스[Ω]

V_{ab} : a, b 양단의 전압차[V]

4. 밀만의 정리

1) 정의

다수의 전압원이 병렬로 접속시 말단에 나타나는 합성 전압은 각각의 전압원을 단락했을 때 흐르는 전류의 합을 내부 어드미턴스의 합으로 나눈 것과 같다.



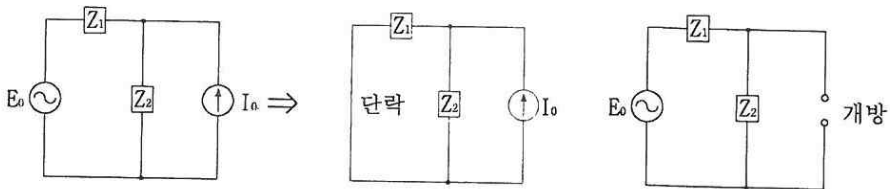
$$2) \text{ 전압 } V = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n} = \frac{\frac{V_1}{Z_1} + \frac{V_2}{Z_2} + \dots + \frac{V_n}{Z_n}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}}$$

5. 중첩의 원리

1) 정의

- ① 다수의 기전력을 포함하는 회로망에 있어서의 전류 분포는 각 기전력이 단독으로 그 위치에 있을 때 흐르는 전류의 총합과 같다. 이것을 중첩의 원리라 한다.
- ② 전압원은 단락, 전류원은 개방

2) 해석



6. 쌍대회로

1) 개념

전기회로에서 성립되는 관계식에 대하여 서로 대응적인 양이나 상태로 치환하여 얻는 동일한 형식의 관계식을 만족하는 전기회로를 쌍대회로라 한다.

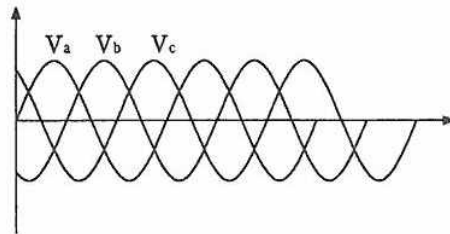
2) 쌍대관계

전압원	전류원	직렬	병렬
저항	컨덕턴스	개방	단락
인덕턴스	커패시턴스	키르히호프의 전압법칙	키르히호프의 전류법칙
리액턴스	서셉턴스	폐로방정식	절점방정식
임피던스	어드미턴스	테브낭의 정리	노튼의 정리

제7장. 다상교류

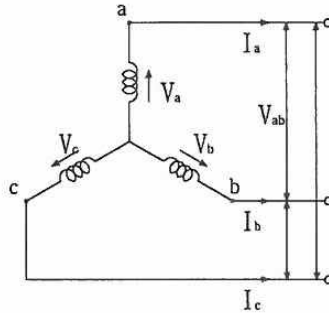
1. 3상 교류

1) 평형 3상



- (1) $V_a = V_m \sin \omega t$
- (2) $V_b = V_m \sin (\omega t - 120^\circ)$
- (3) $V_c = V_m \sin (\omega t + 120^\circ)$
- (4) $V_a + V_b + V_c = 0$

2) Y결선 (성형결선, 스타결선)



(1) 선간전압(단자전압, 정격전압)

① 선간전압은 상전압보다 30° 앞선다. ($V_\ell = \sqrt{3} \times V_p \angle 30^\circ$)

② 선간전압의 계산

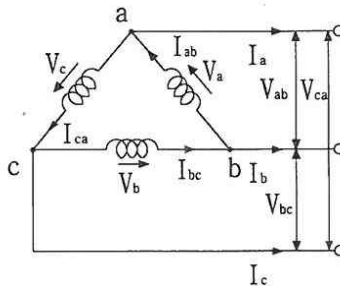
$$V_\ell = \sqrt{3} \times V_p = \sqrt{3} \times I_p \times Z [V]$$

여기서, V_p : 상전압[V], I_p : 상전류[A], Z : 임피던스[Ω]

(2) 선전류(부하전류, 정격전류)

$$I_\ell = I_p = \frac{V_p}{Z} = \frac{V_\ell}{\sqrt{3} \times Z} [A]$$

3) Δ 결선(델타 결선)



(1) 선간전압(단자전압, 정격전압)

$$V_\ell = V_p = I_p \times Z [V]$$

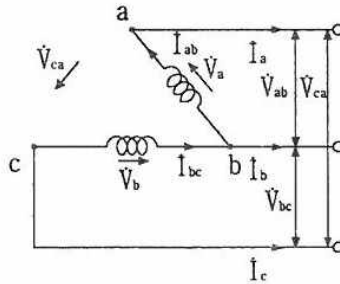
여기서, V_p : 상전압[V], I_p : 상전류[A], Z : 임피던스[Ω]

(2) 선전류(부하전류, 정격전류)

① 선전류는 상전류보다 30° 뒤진다.(지상)

$$I_\ell = \sqrt{3} I_p = \sqrt{3} \times \frac{V_p}{Z} = \sqrt{3} \times \frac{V_\ell}{Z} [A]$$

4) V결선의 주요특성



① V결선시의 출력 $P_v = \sqrt{3} \times P = \sqrt{3} \text{ [VA]}$

② V결선시의 이용률 $\frac{\sqrt{3}P}{2P} = 0.866$

③ V결선시 고장전의 출력비 $\frac{\sqrt{3}P}{3P} = 0.577 = \frac{1}{\sqrt{3}}$

5) Y↔Δ등가변환

구분	임피던스	저항	선전류	유효전력
Y→Δ	3	3	3	3
Δ→Y	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

(1) Δ에서 Y로 등가변환

$$R_a = \frac{R_{ab} \times R_{ac}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$$

$$R_b = \frac{R_{bc} \times R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$$

$$R_c = \frac{R_{bc} \times R_{ac}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$$

(2) Y에서 Δ로 등가변환

$$R_{ab} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_a R_c}{R_c}$$

$$R_{bc} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_a R_c}{R_a}$$

$$R_{ac} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_a R_c}{R_b}$$

2. 대칭 다상교류

1) n상 성상결선

$$(1) \text{ 선간전압 } V_\ell = 2\sin\frac{\pi}{n} V_P[V]$$

$$(2) \text{ 선전류 } I_\ell = I_P[A]$$

$$(3) \text{ 위상차 } \theta = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n}\right)$$

2) n상 환상결선

$$(1) \text{ 선간전압 } V_\ell = V_P[V]$$

$$(2) \text{ 선전류 } I_\ell = 2\sin\frac{\pi}{n} I_P[A]$$

$$(3) \text{ 위상차 } \theta = -\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n}\right)$$

3) 대칭 n상 교류전력

$$P = n V_P I_P \cos\theta = \frac{n}{2\sin\frac{\pi}{n}} V_\ell I_\ell \cos\theta [W]$$

3. 3상 전력

1) 피상전력 $P_a[VA]$

$$P_a = 3 \times V_P I_P = 3 \times I_P^2 Z = 3 \times \frac{V_P^2}{Z} = \sqrt{3} \times V_\ell I_\ell = \sqrt{P_a^2 + P_r^2} [VA]$$

여기서, V_P : 상전압[V], I_P : 상전류[A], Z : 임피던스[Ω]

V_ℓ : 선간전압[V], I_ℓ : 선전류[A]

2) 유효전력(소비전력, 평균전력, 소모전력) $P[W]$

$$P = 3 \times I_P^2 R = 3 \times \frac{V_P^2}{R} = \sqrt{3} \times V_\ell I_\ell \cos\theta = \sqrt{P_a^2 - P_r^2} [W]$$

여기서, V_P : 상전압[V], I_P : 상전류[A], R : 저항[Ω]

V_ℓ : 선간전압[V], I_ℓ : 선전류[A], $\cos\theta$: 역률

3) 무효전력 $P_r[VAR]$

$$P_r = 3 \times I_p^2 X = 3 \times \frac{V_p^2}{X} = \sqrt{3} \times V_\ell I_\ell \sin \theta = \sqrt{P_a^2 - P^2} [\text{VAR}]$$

여기에서, V_p : 상전압[V], I_p : 상전류[A], X : 리액턴스[Ω]

V_ℓ : 선간전압[V], I_ℓ : 선전류[A], $\sin \theta$: 무효율

4) 역률 계산

$$\cos \theta = \frac{P}{P_a} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_r^2}} = \frac{P}{\sqrt{3} V_\ell I_\ell}$$

5) 무효율 계산

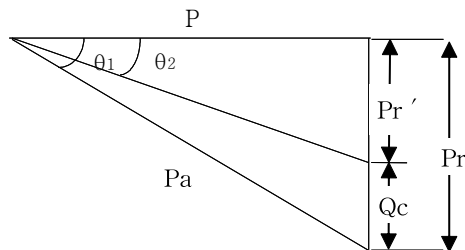
$$\sin \theta = \frac{P_r}{P_a} = \frac{P_r}{\sqrt{P^2 + P_r^2}} = \frac{P_r}{\sqrt{3} V_\ell I_\ell}$$

4. 역률개선

1) 역률개선 원리

- (1) 부하와 콘덴서를 병렬로 연결, 진상전류를 공급하여 무효전력을 감소시켜 역률을 개선시킨다.
- (2) 역률개선 효과
 - ① 전기설비의 여유도 증가
 - ② 전기요금의 경감
 - ③ 공급능력증대, 전압강하의 감소
 - ④ 전력손실을 감소

2) 전력용 콘덴서(역률개선용 콘덴서) 용량



$$Q_c = P_r - P_r' = P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) = P \left(\frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} - \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \right) [\text{kV A}]$$

$$= P \left(\frac{\sqrt{(1 - \cos^2 \theta_1)}}{\cos \theta_1} - \frac{\sqrt{(1 - \cos^2 \theta_2)}}{\cos \theta_2} \right) [kVA] \quad P = P_a \cos \theta$$

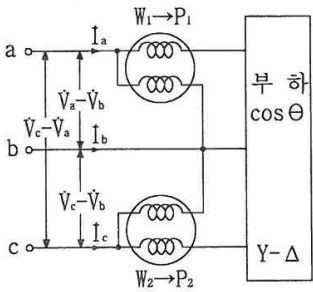
여기서, Q_c : 콘덴서 용량[kVA]

P : 유효전력[kW]

$\cos \theta_1$: 개선 전 역률

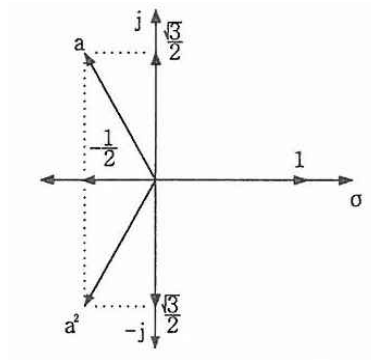
$\cos \theta_2$: 개선 후 역률

5. 2전력계법

	<p>(1) 유효전력 $P = P_1 + P_2 [W]$</p> <p>(2) 무효전력 $P_r = \sqrt{3} (P_1 - P_2) [Var]$</p> <p>(3) 역률</p> $\cos \theta = \frac{P}{P_a} = \frac{P_1 + P_2}{2 \times \sqrt{P_1^2 + P_2^2 - P_1 P_2}}$ <p>① $P_1 = P, P_2 = 0 \quad \cos \theta = 0.5$</p> <p>② $P_1 = 2P_2 \quad \cos \theta = 0.866$</p> <p>③ $P_1 = 3P_2 \quad \cos \theta = 0.76$</p>
---	--

제8장. 대칭좌표법

1. 벡터연산자



$$1) \quad a = 1 \angle 120^\circ = (\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$2) a^2 = 1 \angle 240^\circ = (\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$3) 1 + a + a^2 = 0$$

2. 각상의 전압

$$1) a\text{상 전압 } V_a = V_o + V_1 + V_2$$

$$2) b\text{상 전압 } V_b = V_o + a^2 V_1 + a V_2$$

$$3) c\text{상 전압 } V_c = V_o + a V_1 + a^2 V_2$$

3. 각상의 전류

$$1) a\text{상 전류 } I_a = I_o + I_1 + I_2$$

$$2) b\text{상 전류 } I_b = I_o + a^2 I_1 + a I_2$$

$$3) c\text{상 전류 } I_c = I_o + a I_1 + a^2 I_2$$

4. 영상분, 정상분, 역상분

1) 영상분

$$\textcircled{1} \text{ 영상전압 } V_o = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$$

$$\textcircled{2} \text{ 영상전류 } I_o = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

2) 정상분

$$\textcircled{1} \text{ 정상전압 } V_1 = \frac{1}{3}(V_a + a V_b + a^2 V_c)$$

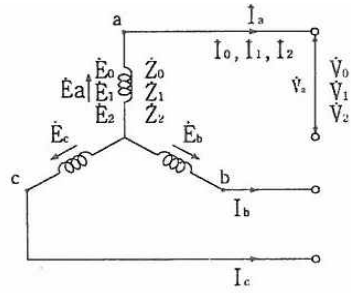
$$\textcircled{2} \text{ 정상전류 } I_1 = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c)$$

3) 역상분

$$\textcircled{1} \text{ 역상전압 } V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2 V_b + a V_c)$$

$$\textcircled{2} \text{ 역상전류 } I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c)$$

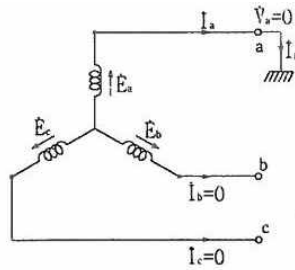
5. 3상 교류발전기 기본식



- 1) $V_0 = -I_0 Z_0$
- 2) $V_1 = E_a - I_1 Z_1$
- 3) $V_2 = -I_2 Z_2$

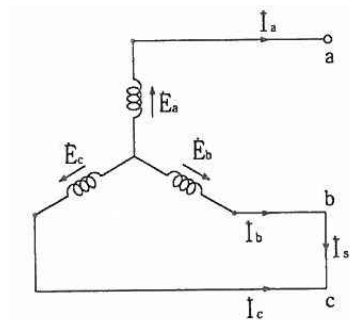
6. 3상회로의 고장계산

1) 1선 지락사고



- ① 전류 $I_0 = I_1 = I_2$
- ② 지락전류 $I_g = 3I_0 = \frac{3E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$

2) 선간 단락사고



$$\text{단락전류 } I_s = (a^2 - a) \frac{E_a}{Z_1 + Z_2}$$

6. 불평형율

$$= \frac{\text{역상분}}{\text{정상분}} \times 100[\%]$$

7. 대칭분에 의한 전력 표시

$$P_a = \overline{VI} = 3(\overline{V_0 I_0} + \overline{V_1 I_1} + \overline{V_2 I_2})$$

제9장. 비정현파 교류

1. 비정현파(왜형파) 교류

1) 비정현파의 발생 이유

- (1) 교류 발전기 전기자반작용에 의한 일그러짐 발생
- (2) 다이오드의 비직선성에 의한 전류 파형의 일그러짐 발생
- (3) 변압기 철심의 자기포화 및 히스테리시스 현상으로 여자 전류의 일그러짐 발생

2) 푸리에급수

- (1) 주기적인 비정현파는 일반적으로 푸리에 급수로 표현할 수 있으며, 무수히 많은 주파수 신호의 합성이다.

(2) 비정현파=직류분+기본파+고조파

$$(3) \text{ 함수 } f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t$$

여기서, a_0 : 직류분, a_n : 우수항(짝수), b_n : 기수항(홀수)

3) 비정현파의 계산

$$v(t) = V_0 + V_1 \sin \omega t + V_2 \sin 2\omega t + \dots$$

(1) 비정현파의 실효값

① 각 고조파의 실효값의 제곱의 합의 제곱근

$$② \text{ 전압 } V = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots}$$

여기서, V_0 : 직류분, V_1 : 기본파 실효값, V_2 : 2고조파 실효값

$$③ \text{ 전류 } I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}$$

여기서, I_0 : 직류분, I_1 : 기본파 실효값, I_2 : 2고조파 실효값

(2) 왜형률

① 기본파 실효값에 대한 전고조파 실효값의 비로 파형의 일그러짐 정도를 왜형률이라 한다.

② 왜형률

$$= \frac{\text{전고조파의 실효값}}{\text{기본파 실효값}} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_1}$$

2. 비정현파의 전력계산

$$v(t) = V_0 + \sqrt{2} V_1 \sin \omega t + \sqrt{2} V_2 \sin 2\omega t + \dots + \sqrt{2} V_n \sin n\omega t$$

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sqrt{2} I_2 \sin(2\omega t + \theta_2) + \dots + \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \theta_n)$$

1) 피상전력

$$P_a = VI = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \times \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$$

2) 소비전력

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \theta_n$$

$$= V_0 I_0 + V_1 I_1 \cos \theta_1 + V_2 I_2 \cos \theta_2 + V_3 I_3 \cos \theta_3 + \dots + V_n I_n \cos \theta_n \text{ [W]}$$

3) 무효전력

$$\begin{aligned} P_r &= V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \theta_n \\ &= V_0 I_0 + V_1 I_1 \sin \theta_1 + V_2 I_2 \sin \theta_2 + V_3 I_3 \sin \theta_3 + \dots + V_n I_n \sin \theta_n \text{ [W]} \end{aligned}$$

4) 역률 $\cos \theta = \frac{P}{P_a}$

3. 비정현파의 직렬 임피던스 회로 해석

1) R-L 직렬

① n차 임피던스

$$Z_n = R + jn\omega L = \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}$$

② n차 고조파 전류 : $I_n = \frac{V_n}{Z_n}$

2) R-C 직렬

① n차 임피던스

$$Z_n = R - j \frac{1}{n\omega C} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{n\omega C}\right)^2}$$

② n차 고조파 전류 : $I_n = \frac{V_n}{Z_n}$

3) R-L-C 직렬

① n차 임피던스

$$Z_n = R + jn\omega L - j \frac{1}{n\omega C} = \sqrt{R^2 + \left(n\omega L - \frac{1}{n\omega C}\right)^2}$$

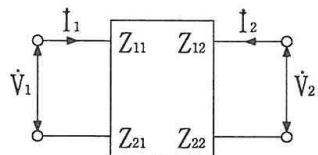
② n차 공진 주파수

$$f_n = \frac{1}{2\pi n \sqrt{LC}} \text{ [Hz]}$$

제10장. 4단자망

1. 임피던스 파라미터

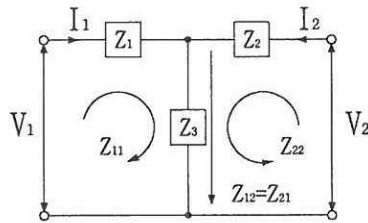
1) 임피던스 파라미터의 개념



$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \quad \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

- ① $Z_{11} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{I_2=0}$: 출력개방 구동점 임피던스
- ② $Z_{12} = \frac{V_1}{I_2} \Big|_{I_1=0}$: 입력 개방 역방향 전달 임피던스
- ③ $Z_{21} = \frac{V_2}{I_1} \Big|_{I_2=0}$: 출력개방 순방향 전달 임피던스
- ④ $Z_{22} = \frac{V_2}{I_2} \Big|_{I_1=0}$: 입력개방 구동점 임피던스

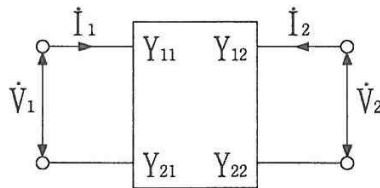
2) 임피던스 파라미터의 해석



- ① $Z_{11} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{I_2=0} = \frac{(Z_1 + Z_3)I_1}{I_1} = Z_1 + Z_3$
- ② $Z_{12} = \frac{V_1}{I_2} \Big|_{I_1=0} = \frac{Z_3 I_2}{I_2} = Z_3$
- ③ $Z_{21} = \frac{V_2}{I_1} \Big|_{I_2=0} = \frac{Z_3 I_1}{I_1} = Z_3$
- ④ $Z_{22} = \frac{V_2}{I_2} \Big|_{I_1=0} = \frac{(Z_2 + Z_3)I_2}{I_2} = Z_2 + Z_3$

2. 어드미턴스 파라미터

1) 어드미턴스 파라미터의 개념

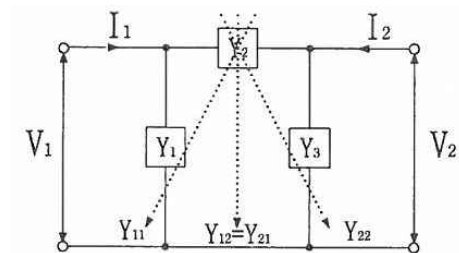


$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 \\ I_2 &= Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

- ① $Y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0}$: 단락 구동점 어드미턴스
- ② $Y_{12} = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0}$: 단락 전달 어드미턴스
- ③ $Y_{21} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0}$: 단락 전달 어드미턴스
- ④ $Y_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{V_1=0}$: 단락 구동점 어드미턴스

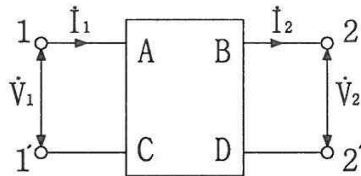
2) 어드미턴스 파라미터의 해석



- ① $Y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0} = \frac{(Y_1 + Y_2) V_1}{V_1} = Y_1 + Y_2$
- ② $Y_{12} = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0} = \frac{-Y_2 V_2}{V_2} = -Y_2$
- ③ $Y_{21} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0} = \frac{-Y_2 V_1}{V_1} = -Y_2$
- ④ $Y_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{V_1=0} = \frac{(Y_2 + Y_3) V_2}{V_2} = Y_2 + Y_3$

3. 전송파라미터 (4단자 정수)

1) 기본 방정식



$$\begin{aligned} V_1 &= A V_2 + B I_2 \\ I_1 &= C V_2 + D I_2 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$\textcircled{1} \quad A = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_2=0} : \text{전압비}$$

$$\textcircled{2} \quad B = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{V_2=0} : \text{임피던스비}$$

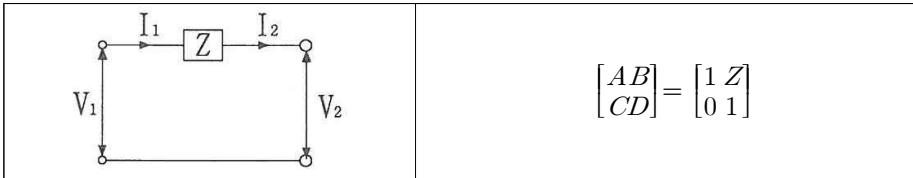
$$\textcircled{3} \quad C = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{I_2=0} : \text{어드미턴스비}$$

$$\textcircled{4} \quad D = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_2=0} : \text{전류비}$$

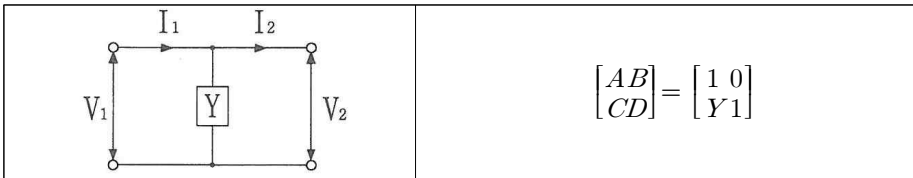
$$\textcircled{5} \quad \text{검산식 } AD - BC = 1$$

2) 4단자 정수의 해석

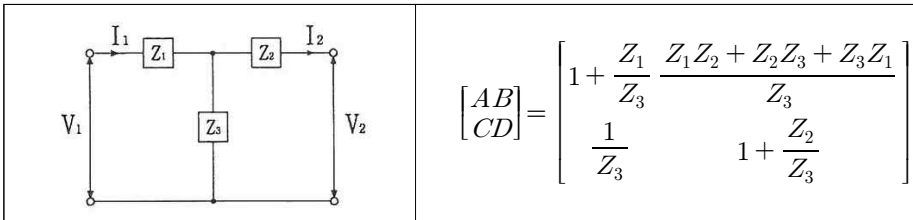
(1) 직렬 임피던스 단일소자



(2) 병렬어드미턴스 단일소자



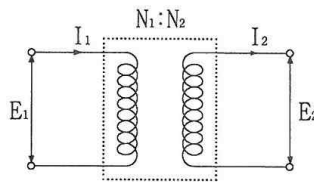
(3) T형 회로



(4) 기타

4단자 정수 회로의 종류	A	B	C	D
	1	Z	0	1
	1	0	$\frac{1}{Z}$	1
	$1 + \frac{Z_1}{Z_2}$	Z_1	$\frac{1}{Z_2}$	1
	1	Z_1	$\frac{1}{Z_2}$	$1 + \frac{Z_1}{Z_2}$
	$1 + \frac{Z_1}{Z_2}$	$\frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}{Z_2}$	$\frac{1}{Z_2}$	$1 + \frac{Z_3}{Z_2}$
	$1 + \frac{Z_2}{Z_3}$	Z_2	$\frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{Z_1 Z_3}$	$1 + \frac{Z_2}{Z_1}$

4. 변압기의 4단자 정수



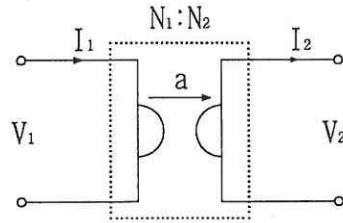
1) 권수비가 N:1

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & 0 \\ 0 & \frac{1}{N} \end{bmatrix}$$

2) 권수비가 1:N

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix}$$

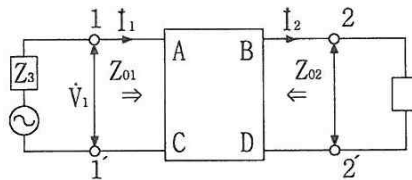
5. 발전기 4단자 정수(Gyrator)



a : 자이레이터 (Gyrator)

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a \\ \frac{1}{a} & 0 \end{bmatrix}$$

6. 영상 파라미터



1) 영상파라미터

$$(1) Z_{01} Z_{02} = \frac{B}{C}$$

$$(2) \frac{Z_{01}}{Z_{02}} = \frac{A}{D}$$

$$(3) Z_{01} = \sqrt{\frac{AB}{CD}}$$

$$(4) Z_{02} = \sqrt{\frac{BD}{AC}}$$

2) 영상전달정수

$$\theta = \ln(\sqrt{AD} + \sqrt{BC}) = \cosh^{-1} \sqrt{AD} = \sinh^{-1} \sqrt{BC}$$

3) 4단자 정수와 영상파라미터

$$(1) A = \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}} \cosh \theta$$

$$(2) B = \sqrt{Z_{01} Z_{02}} \sinh \theta$$

$$(3) C = \frac{1}{\sqrt{Z_{01} Z_{02}}} \sinh \theta$$

$$(4) D = \sqrt{\frac{Z_{02}}{Z_{01}}} \cosh \theta$$

7. 반복 임피던스

무한개의 4단자망을 무한개로 접속하는 경우 어느 단자에서나 우측으로 본 임피던스는 동일하면 이와 같은 임피던스를 반복임피던스라 한다.

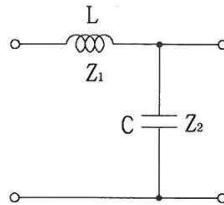
반복 파라미터는 $\gamma = \cos^{-1} \frac{A+D}{2}$ 로 표현한다.

8. 여파기(Filter)

1) 용어정의

- (1) 통과역 : 전송 전력이 자유롭게 통과할 수 있는 주파수 대역
- (2) 감쇠역 : 감쇠가 현저하게 커져 통과를 저지하는 주파수의 대역
- (3) 차단주파수 : 통과역과 감쇠역의 한계 주파수를 말한다.

2) 정K형 저역 여파기

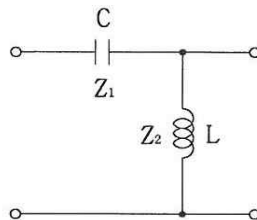


(1) 공칭 임피던스(K) $K^2 = Z_1 Z_2 = \frac{L}{C}$

(2) 차단 주파수

$$f_c = \frac{K}{\pi L} = \frac{1}{\pi CK} [\text{Hz}]$$

3) 정K형 고역 여파기



(1) 공칭 임피던스(K) $K^2 = Z_1 Z_2 = \frac{L}{C}$

(2) 차단 주파수

$$f_c = \frac{K}{4\pi L} = \frac{1}{4\pi CK} [\text{Hz}]$$

제11장. 2단자망

1. 구동점 임피던스

$$Z(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{(s + Z_1)(s + Z_2)(s + Z_3) \dots}{(s + P_1)(s + P_2)(s + P_3) \dots}$$

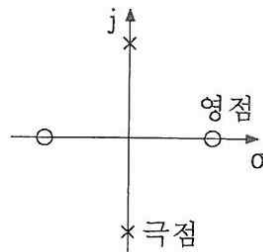
1) 영점 (Zero) :

- (1) 회로망 함수 $Z(s)$ 가 0이 되는 s 의 값(분자 = 0)
- (2) 회로망 단락상태
- (3) $s = -Z_1, -Z_2, -Z_3$

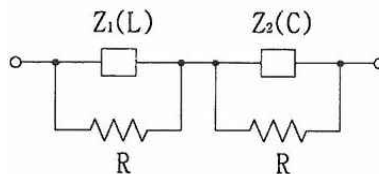
2) 극점 (Pole) :

- (1) 회로망 함수 $Z(s)$ 가 ∞ 가 되는 s 의 값(분모 = 0)
- (2) 회로망 개방상태
- (3) $s = -P_1, -P_2, -P_3$

3) 영점과 극점의 표시



2. 정저항 회로



2단자임피던스가 주파수에 관계없이 항상 일정하게 되는 회로를 정저항회로라 한다.

$$\text{정저항 조건 : } R^2 = K^2 = Z_0^2 = Z_1 Z_2 = \frac{L}{C}$$

3. 리액턴스 2단자망 회로

1) RLC 직렬회로

$$Z(s) = R + sL + \frac{1}{sC}$$

2) RLC 병렬회로

$$Z(s) = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{sL} + sC}$$

- (1) 모든 구동점 임피던스의 분자식을 1로 한다.
- (2) 분수식 밖의 +는 직렬, 상수는 저항, s의 계수는 L 값, $\frac{1}{s}$ 의 계수는 C값
- (3) 분수식 안의 +는 병렬, 상수는 저항, s의 계수는 C값, $\frac{1}{s}$ 의 계수는 L값

4. 역회로

1) 역회로의 개념

구동점 임피던스가 각각 2개의 2단자 회로망에 있어서 $K^2 = Z_1 Z_2$
 단, K는 실정수의 관계가 있을 때, Z_1, Z_2 는 K에 관하여 역회로라 한다.

2) 역회로 관계

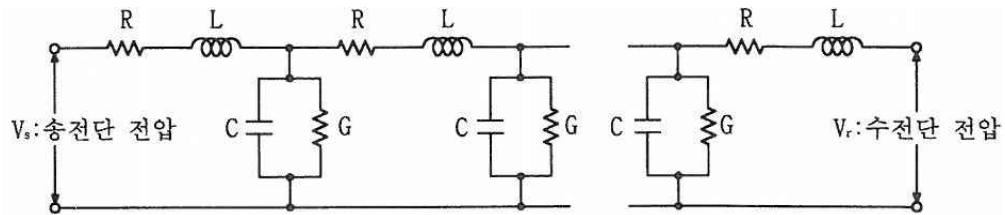
전 압	전 류
직 렬	병 렬
저 항	컨덕턴스
리액턴스	서셉턴스
임피던스	어드미턴스
L	C

제12장. 분포정수회로

1. 분포정수회로

1) 개념

중·장거리 송전선로에서 전기에너지나 신호등을 임의의 한 점에서 다른 점으로 전송하는 경우에 나타나는 선로정수(R, L, C, G)가 선로에 따라 공간적으로 분포되어 있는 회로를 분포정수회로라 한다.



2) 미분방정식

$$(1) \text{ 전압방정식 : } \frac{d^2 V}{dx^2} = -Z \frac{dI}{dx} = YZV$$

$$(2) \text{ 전류방정식 : } \frac{d^2 I}{dx^2} = -Y \frac{dV}{dx} = YZI$$

3) 임피던스와 어드미턴스의 표현

$$(1) \text{ 직렬 임피던스 : } Z = R + j\omega L [\Omega/\text{m}]$$

$$(2) \text{ 병렬 어드미턴스 : } Y = G + j\omega C [\text{S}/\text{m}]$$

4) 특성임피던스

(1) 특성임피던스의 개념

송전 선로의 길이에 관계없이 어느 점에서나 항상 일정한 값을 유지하는 것으로 전류에 대한 전압의 비를 말한다.

(2) 특성임피던스의 표현

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

5) 전파정수

(1) 전파정수의 개념

송전 선로에서 전압의 크기 및 위상관계를 나타내는 상수

(2) 전파정수의 표현

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$$

① α : 감쇠정수[V/m]

무한장 선로에서 단위길이당 전압의 크기가 감쇠하는 정도

② β : 위상정수[rad/m]

무한장 선로에서 단위길이당 전압의 위상이 감쇠하는 정도

6) 전파방정식

(1) 전압, 전류 방정식

① 송전단 전압

$$V_s = A V_R + B I_R = \cosh \gamma \ell V_R + Z_0 \sinh \gamma \ell I_R$$

② 송전단 전류

$$I_s = C V_R + D I_R = \frac{1}{Z_0} \sinh \gamma \ell V_R + \cosh \gamma \ell I_R$$

(2) 수전단 개방시 입력 임피던스($I_R=0$)

$$Z_{s0} = \frac{V_s}{I_s} = Z_0 \coth \gamma \ell$$

(3) 수전단 단락시 입력 임피던스($V_R=0$)

$$Z_{ss} = \frac{V_s}{I_s} = Z_0 \tanh \gamma \ell$$

(4) 특성임피던스

$$Z_0 = \sqrt{Z_{ss} \times Z_{s0}}$$

2. 분포정수회로의 해석

1) 무손실 선로 ($R = G = 0$)

(1) 특성 임피던스 (파동 임피던스)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{g + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

(2) 전파정수

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = j\omega \sqrt{LC}$$

$$\alpha = 0, \beta = \omega \sqrt{LC}$$

(3) 위상 속도 (전파속도) $v = f\lambda = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ [m/s]

f : 주파수[Hz], λ : 파장[m], ω : 각주파수, β : 위상정수

2) 무왜형 회로 ($RC = LG$)

(1) 특성 임피던스

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{\frac{RC}{L} + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{\frac{C}{L}(R + j\omega L)}} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

(2) 전파정수

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \sqrt{RG} + j\omega \sqrt{LC}$$

$$\alpha = \sqrt{RG}, \beta = \omega \sqrt{LC}$$

(3) 위상 속도 (전파속도) $v = f\lambda = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ [m/s]

f : 주파수[Hz], λ : 파장[m], ω : 각주파수, β : 위상정수

3) 반사계수(ρ)

(1) 반사의 개념

전송로의 말단 또는 특성임피던스가 서로 다른 선로의 접속점에서 전압과 또는 전류파의 반사가 발생하여 일부 또는 전부가 전원으로 되돌아오는 현상을 말한다.

(2) 반사계수

$$= \frac{\text{반사파}}{\text{입사파}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} Z_L : \text{부하임피던스, } Z_0 : \text{특성임피던스}$$

4) 정재파비

(1) 정재파의 개념

선로 상에 입사파와 반사파가 존재하는 경우 두 개의 입사파와 반사파가 합쳐져 어느 방향으로도 진행하지 못하고 출렁이는 파

(2) 정재파비

$$= \frac{\text{정재파의 최대값}}{\text{정재파의 최소값}} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

제13장. 라플라스 변환

1. 라플라스 변환의 정의식

1) 라플라스 변환

- (1) 시간함수 또는 주파수 함수를 복소함수로 변환하는 것
- (2) 선형 상미분 방정식의 해를 구하거나 제어시스템을 설계하는데 자주 이용한다.

$$F(S) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (0 \leq t \leq \infty)$$

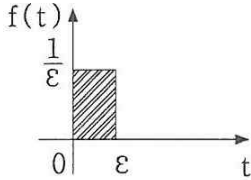
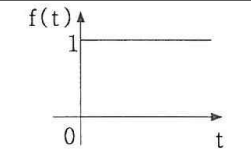
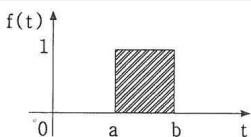
2) 라플라스 역변환

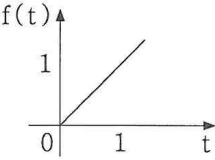
$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(S)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{e^{-j\infty}}^{e^{+j\infty}} f(t)e^{st} ds$$

2. 라플라스변환 주요정리

선형성의 정리	$\mathcal{L}[af_1(t) + bf_2(t)] = aF_1(s) + bF_2(s)$
상사정리	$\mathcal{L}\left[f\left(\frac{t}{a}\right)\right] = aF(as)$ $\mathcal{L}[f(at)] = \frac{1}{a}F\left(\frac{s}{a}\right)$
시간추이정리	$\mathcal{L}[f(t-a)] = e^{-as}F(s)$
복소추이정리	$\mathcal{L}[e^{-at}f(t)] = F(s+a)$
복소미분정리	$\mathcal{L}[t^n f(t)] = (-1)^n \frac{d^n}{ds^n} F(s)$
실미분정리	$\mathcal{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) - f(0)$ $\mathcal{L}\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = s^n F(s) - s^{n-1}f(0) - s^{n-2}f'(0) - \dots$
실적분정리	$\mathcal{L}[f(t)] = \int_0^t f(t)dt = \frac{1}{s}F(s)$
초기값 정리	$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$
최종값 정리	$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$
주기함수	$\mathcal{L}[f_1(t) + f_1(t-T) + f_1(t-2T) + \dots] = F_1(s) \frac{1}{1 - e^{-Ts}}$

3. 주요함수 라플라스 변환

함 수	파형	$f(t)$	$F(s)$
임펄스함수		$\delta(t)$	1
단위계단함수		$u(t), 1$	$\frac{1}{s}$
		$f(t) = u(t-a) - u(t-b)$	$\frac{1}{s}(e^{-as} - e^{-bs})$

단위램프 (경사)함수		t	$\frac{1}{s^2}$
n차 램프함수	—	t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
정현파 함수	—	$\sin\omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
여현파 함수	—	$\cos\omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
지수감쇠함수	—	e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
지수감쇠램프 함수 복소추이	—	$t^n e^{\pm at}$	$\frac{n!}{(s \mp a)^{n+1}}$
정현파 램프함수	—	$t \sin\omega t$	$\frac{2\omega s}{(s^2 + \omega^2)^2}$
여현파 램프함수	—	$t \cos\omega t$	$\frac{s^2 - \omega^2}{(s^2 + \omega^2)^2}$
지수감쇠정현 파함수	—	$e^{-at} \sin\omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
	—	$e^{-at} \cos\omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
쌍곡선함수	—	$\sinh\omega t$	$\frac{\omega}{s^2 - \omega^2}$
	—	$\cosh\omega t$	$\frac{s}{s^2 - \omega^2}$
기타	—	$t \sin\omega t e^{-at}$	$\frac{2\omega(s+a)}{[(s+a)^2 + \omega^2]^2}$
	—	$t \cos\omega t e^{-at}$	$\frac{(s+a)^2 - \omega^2}{[(s+a)^2 + \omega^2]^2}$
	—	$\frac{\sin\omega t}{t}$	$\tan^{-1} \frac{\omega}{s}$
	—	$\frac{1}{\sqrt{t}}$	$\sqrt{\frac{\pi}{s}}$

4. 주요함수의 라플라스 역변환

1) 부분분수 전개법(인수분해가 되는 경우)

$$(1) F(s) = \frac{2s+3}{s^2+3s+2} = \frac{2s+3}{(s+2)(s+1)} = \frac{A}{s+2} + \frac{B}{s+1}$$

$$A = \left[\frac{2s+3}{s+1} \right]_{s=-2} = \frac{2 \times (-2) + 3}{-2+1} = 1$$

$$B = \left[\frac{2s+3}{s+2} \right]_{s=-1} = \frac{2 \times (-1) + 3}{-1+2} = 1$$

$$F(s) = \frac{1}{s+2} + \frac{1}{s+1}$$

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+2} + \frac{1}{s+1}\right] = e^{-2t} + e^{-t}$$

$$(2) F(s) = \frac{1}{s^2+6s+10} = \frac{1}{(s+3)^2+1}$$

$$f(t) = e^{-3t} \sin wt$$

2) 중근의 경우

$$(1) F(s) = \frac{s}{(s+1)^2} = \frac{s+1-1}{(s+1)^2} = \frac{1}{s+1} - \frac{1}{(s+1)^2}$$

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = e^{-t} - te^{-t}$$

$$(2) F(s) = \frac{s+2}{(s+1)^2} = \frac{s+1+1}{(s+1)^2} = \frac{1}{s+1} + \frac{1}{(s+1)^2}$$

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = e^{-t} + te^{-t}$$

$$(3) F(s) = \frac{1}{(s+1)^2(s+2)} = \frac{A}{s+2} + \frac{B}{(s+1)^2} + \frac{C}{(s+1)}$$

$$A = \left[\frac{1}{(s+1)^2} \right]_{s=-2} = \frac{1}{(-2+1)^2} = 1$$

$$B = \left[\frac{1}{(s+2)} \right]_{s=-1} = \frac{1}{(-1+2)} = 1$$

$$C = \frac{dB}{ds} = \frac{d}{ds} \left[\frac{1}{(s+2)} \right] = \left[\frac{-1}{(s+2)^2} \right]_{s=-1} = \frac{-1}{(-1+2)^2} = -1$$

$$F(s) = \frac{1}{s+2} + \frac{1}{(s+1)^2} + \frac{-1}{(s+1)}$$

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = te^{-t} + e^{-2t} - e^{-t}$$

제14장. 과도현상

1. 과도현상

1) 과도현상

한 정상상태에서 다른 정상상태로 전이하는 것 또는 그 동안 경과하는 상태를 말한다.

2) 정상상태

회로에 흐르는 전압 또는 전류가 시간에 대하여 항상 같은 상태의 변화를 반복하고 일정한 시간에 일정한 전력을 소비하는 상태를 말한다.

3) 전류의 표현

$$i(t) = i(\infty) + [i(0) - i(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

(1) $i(\infty)$: 정상값(전원인가 또는 제거하고 일정시간이 지난 후)

(2) $i(0)$: 과도해(전원인가 또는 제거하는 순간)

(3) τ : 시정수(시상수)

4) 시정수(시상수)

(1) 의미 : 과도현상의 길고 짧음을 나타낸 값

(2) 시정수가 크다.

= 정상값에 늦게 도달한다.

= 과도현상이 오랫동안 지속된다.

= 과도전류가 천천히 사라진다.

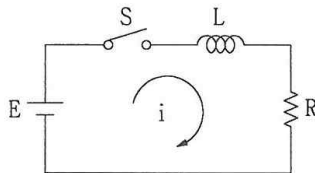
= 특성근이 작다.

(3) 단위 : 초(s)

2. 과도현상의 해석

1) R-L 직렬회로

(1) S/W ON(전원 인가시)



① 전압 평형방정식 $L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = E$

② 전류 $i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = 0.632 \frac{E}{R}$

③ 시정수 $\tau = \frac{L}{R} [s]$

④ R양단 전압 $V_R = i(t)R = E \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$

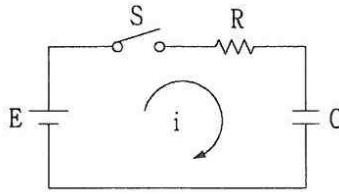
⑤ L양단 전압 $V_L = L \frac{di(t)}{dt} = E e^{-\frac{R}{L}t}$

(2) S/W OFF(전원 제거시)

① 전류 $i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t} = 0.368 \frac{E}{R}$

2) R-C 직렬회로

(1) S/W ON(전원 인가시, 충전중인 상태)



① 전압 평형방정식 $Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = E$

② 충전전기량 $q(t) = CE(1 - e^{-\frac{1}{RC}t})$

③ 전류 $i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{1}{RC}t} = 0.368 \frac{E}{R}$

④ R양단 전압 $V_R = Ri(t) = E e^{-\frac{1}{RC}t}$

⑤ C양단 전압 $V_c = \frac{1}{C} \int i(t) dt = E(1 - e^{-\frac{1}{RC}t})$

⑥ 시정수 $\tau = RC[s]$

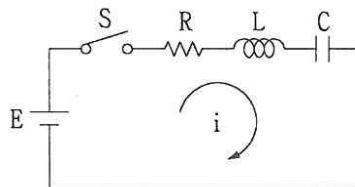
(2) S/W OFF(전원 제거시, 방전중인 상태)

① 방전전기량 $q(t) = CE e^{-\frac{1}{RC}t}$

② 전류 $i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{1}{RC}t} = 0.368 \frac{E}{R}$

③ C양단 전압 $V_c = E e^{-\frac{1}{RC}t}$

3) R-L-C 직렬합성회로



(1) 전압방정식

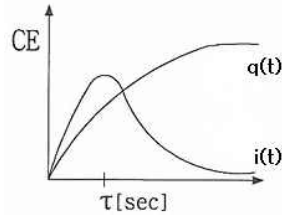
$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt = E$$

(2) 특성근

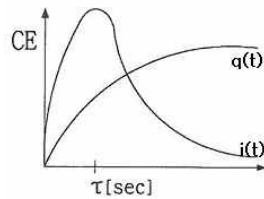
$$s = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

(3) 특성해석

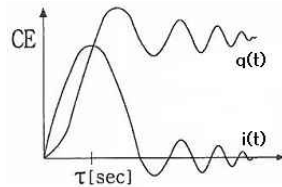
① $R^2 > 4\frac{L}{C}$, $\delta > 1$ 의 경우 : 과제동, 과감쇠, 비진동적



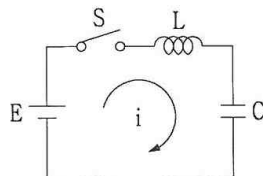
② $R^2 = 4\frac{L}{C}$, $\delta = 1$ 의 경우 : 임계제동, 임계감쇠, 임계진동



③ $R^2 < 4\frac{L}{C}$, $\delta < 1$ 의 경우 : 부족제동, 미흡감쇠, 진동



4) L-C회로의 과도현상



(1) 전압방정식

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt = E$$

(2) 전류 : 크기가 불변인 진동파형(무감쇠 진동 전류)

$$i(t) = \sqrt{\frac{C}{L}} E \sin \frac{1}{\sqrt{LC}} t$$

- (3) 콘덴서 최대전압 : 인가전압의 2배

$$V_c = \frac{1}{C} \int i(t) dt = E(1 - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t)$$

- (4) 코일 최대전압 : 인가전압의 1배

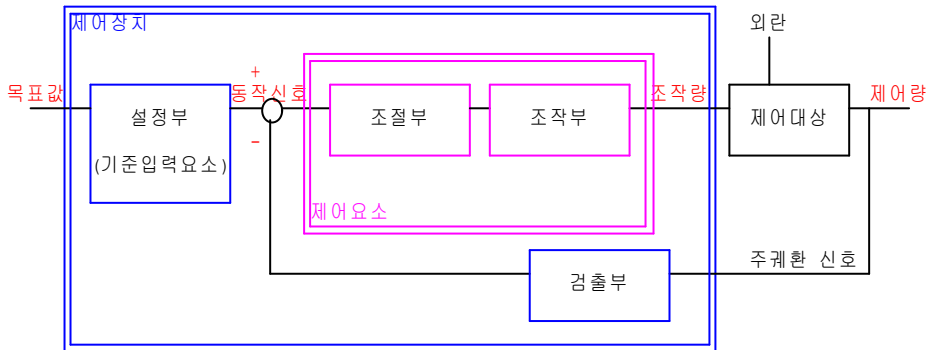
$$V_L = L \frac{di(t)}{dt} = E \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t$$

- (5) 시정수 $\tau = \sqrt{LC}$

제15장. 자동제어의 기초

1. 자동제어의 기초

1) 자동제어계의 기본구성



(1) 설정부

목표값을 제어할 수 있는 신호로 변환하는 장치

(2) 제어요소 ★★★

동작신호를 조작량으로 변환하는 장치로 조절부와 조작부로 구성

① 조절부 : 제어계가 작용을 하는데 필요한 신호를 만든다.

② 조작부 : 조절부로 받은 신호를 조작량으로 변환한다.

(3) 검출부 : 제어량과 설정값의 오차를 비교하는 장치

(4) 조작량 ★★★

① 제어요소가 제어대상에 주는 양

② 제어요소의 출력인 동시에 제어대상의 입력이 된다.

2) 자동제어의 분류

(1) 제어량에 의한 분류 ★★★

① 프로세스 제어 : 온도, 유량, 압력, 농도 등

② 서보기구 : 위치, 방향, 자세, 각도 등

③ 자동조정 : 전압, 속도, 주파수, 장력 등(응답속도가 빠르다.)

(2) 목표값에 의한 분류 ★

① 정치제어 : 목표 값이 시간에 관계없이 일정. (프로세스제어, 자동조정)

② 추종제어 : 목표 값이 임의의 시간변화를 하는 경우 제어량을 그 값에 추종시켜 제어하는 방식

③ 프로그램제어 : 목표 값이 미리 정해진 시간변화

④ 비율제어 : 목표 값이 일정한 비율을 가지고 변화한다.

3) 피드백 제어 ★★★

(1) 입력과 출력을 비교하는 장치가 필요하다.

(2) 대역폭이 증가하고, 정확성이 증가한다.

(3) 비용이 증가한다.

- (4) 계의 특성변화에 대한 입력 대 출력비의 감도가 감소한다.

4) 시퀀스 제어 ★★★

- (1) 정해진 순서에 따라 동작신호를 가했을 때 원하는 출력이 발생하는 회로
 (2) 회로를 구성하는 성분이 일시에 동작할 수 없다.
 (3) 미리 정해 놓은 순서에 따라서 각 단계가 순차적으로 진행되는 제어방식

2. 블록선도

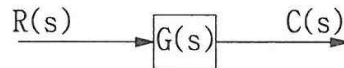
1) 정의

제어계 중에 포함된 각 요소의 신호가 어떻게 전달되는지를 나타내는 선도로서 전달요소, 화살표, 가산점, 인출점으로 구성되어 있다.

2) 블록선도의 구성

(1) 전달요소 : ★★★

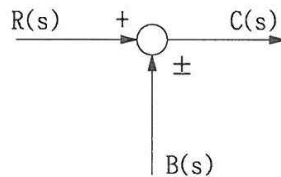
- ① 입력신호($R(s)$)를 받아 변환된 출력신호($C(s)$)를 만드는 요소
 ② 전달요소 $G(s) = \text{출력/입력} = C(s)/R(s)$



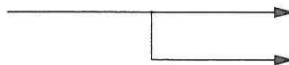
(2) 화살표 : 신호의 흐름을 표시

(3) 가산점(가합점) :

- ① 두 가지 이상의 신호가 있을 때 신호의 합(+) 또는 차(-)를 표시하는 요소
 ② 출력 $C(s) = R(s) \pm B(s)$

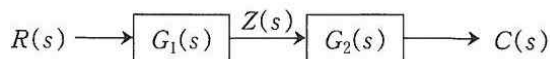


(4) 인출점 : 하나의 신호를 여러 부분으로 분기하는 요소



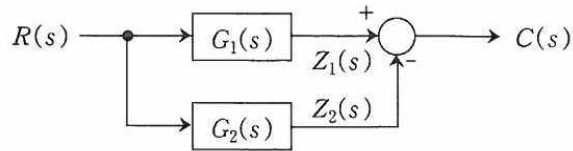
3) 블록선도의 결합

(1) 직렬결합



$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s)$$

(2) 병렬결합



$$C(s) = R(s) \cdot G_1(s) - R(s) \cdot G_2(s)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) = G_1(s) - G_2(s)$$

4) 블록선도의 해석

블록선도	전달함수
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G}{1 + H_1 G + H_2 G}$
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1}{1 + G_1 G_2}$
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1}{1 - G_2}$
	$\frac{b}{a} = G_1 G_2 + G_2 + 1$
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G}{1 + G}$
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1 G_2}{1 - G_1 G_2 G_3}$

	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G}{1 - H_1 G - H_2 G}$
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_2 (G_1 + H)}{1 + G_2}$
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1 G_2}{1 + G_2 G_3 + G_1 G_2 G_4}$
	$C = \frac{R G_1 G_2}{(1 + G_1 G_2)} + \frac{D G_2}{(1 + G_1 G_2)}$
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{H(s)}{1 \mp G(s)H(s)}$

3. 신호 흐름선도

1) 신호 흐름선도의 개념

제어계의 신호흐름을 선으로 나타낸 것

2) 신호 흐름선도의 표현

구분	블록선도	신호흐름선도
전달요소	$X_1 \rightarrow [G] \rightarrow X_2$ $X_2 = AX_1$	$X_1 \circ \xrightarrow{G} \circ X_2$
가합점	$X_1 \xrightarrow{+} \bigoplus \xrightarrow{\pm} X_3$ $X_2 \xrightarrow{\pm}$ $X_3 = X_1 \pm X_2$	$X_1 \circ \xrightarrow{1} \bigoplus \xrightarrow{\pm 1} X_3$ $X_2 \circ \xrightarrow{\pm 1}$
인출점	$X_1 \rightarrow \bullet \rightarrow \begin{cases} X_2 \\ X_3 \end{cases}$ $X_1 = X_2 = X_3$	$X_1 \circ \rightarrow \begin{cases} \xrightarrow{1} X_2 \\ \xrightarrow{1} X_3 \end{cases}$
직렬접속	$X_1 \rightarrow [G_1] \xrightarrow{X_2} [G_2] \rightarrow X_3$	$X_1 \circ \xrightarrow{G_1} \circ \xrightarrow{G_2} \circ X_3$
병렬접속	$X_1 \rightarrow \begin{cases} \xrightarrow{X_2} [G_1] \xrightarrow{+} X_3 \\ \xrightarrow{X_2} [G_2] \xrightarrow{\pm} X_3 \end{cases} \rightarrow X_4$ $X_4 = (G_1 \pm G_2) X_1$	$X_1 \circ \xrightarrow{1} \bigoplus \xrightarrow{G_1} \bigoplus \xrightarrow{\pm G_2} \bigoplus \xrightarrow{1} X_4$
피드백 접속	$X_1 \rightarrow \bigoplus \xrightarrow{X_2} [H] \xrightarrow{X_3} X_4$ $X_4 \xrightarrow{G} \bigoplus$ $X_4 = \frac{H}{1 \mp HG} X_1$	$X_1 \circ \xrightarrow{1} \bigoplus \xrightarrow{H} \bigoplus \xrightarrow{1} X_4$ $X_4 \circ \xrightarrow{\pm G} \bigoplus$

3) 신호흐름선도의 해석

신호흐름선도	전달함수
	$\frac{C}{R} = \frac{a}{1 - b}$
	$\frac{C}{R} = \frac{a}{1 + a + ab}$

	$\frac{C}{R} = a + 5$
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{X_1 + X_2}{1 - X_1 Y_1}$
	$\frac{B}{A} = \frac{abcde}{1 - cg - bcd f}$
	$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{abc + d(1 + bf)}{1 + ae + bf}$

4. 전달함수

1) 정의 ★★★

- (1) 모든 초기조건을 0으로 하였을 때 입력에 대한 출력의 비를 말한다.
- (2) 전달함수

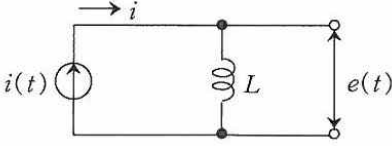
$$\begin{array}{ccc} x(t) & \longrightarrow & \boxed{\text{요 소}} \longrightarrow y(t) \\ \downarrow & & \downarrow \\ X(s) & & Y(s) \end{array}$$

$$G(s) = \frac{\text{출력}}{\text{입력}} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{C(s)}{R(s)}$$

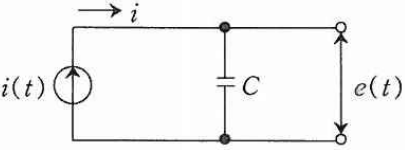
2) 전달함수의 성질

- (1) 전달함수는 선형 시불변 시스템에서 정의되고 비선형 시스템에서는 정의되지 않는다.
- (2) 시스템의 초기 조건은 0으로 한다.

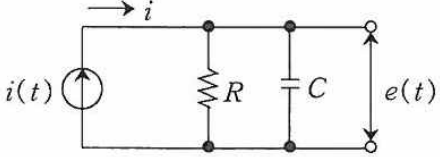
3) 미분요소의 해석

	$e(t) = L \frac{di(t)}{dt}$ $G(s) = \frac{E(s)}{I(s)} = \frac{sLI(s)}{I(s)} = sL$
---	---

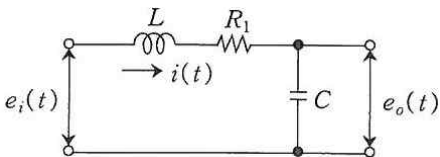
4) 적분요소의 해석

	$e(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$ $G(s) = \frac{E(s)}{I(s)} = \frac{\frac{1}{sC} I(s)}{I(s)} = \frac{1}{sC}$
---	--

5) 1차 지연요소의 해석

	$i(t) = \frac{e(t)}{R} + C \frac{de(t)}{dt}$ $G(s) = \frac{E(s)}{I(s)} = \frac{1}{\frac{1}{R} + sC} = \frac{R}{1 + RCs}$
--	--

6) 2차 지연 요소의 해석

	$\frac{e_o(t)}{e_i(t)} = \frac{\frac{1}{C} \int i(t) dt}{L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R + \frac{1}{C} \int i(t) dt}$ $\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$
---	--

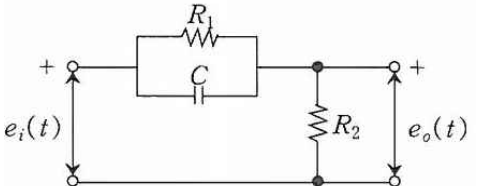
7) 최종정리

구분	시간함수	전달함수
비례요소	$y(t) = Kx(t)$ K : 이득정수	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = K$
미분요소	$y(t) = K \frac{dx(t)}{dt}$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = sK$
적분요소	$y(t) = K \int x(t) dt$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{s}$

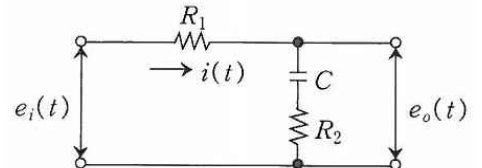
1차 지연요소	$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{1 + Ts}$
2차 지연요소	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Kw_n^2}{s^2 + 2w_n\delta s + w_n^2}$ w_n : 고유(각)주파수, δ : 제동비(감쇠계수) $\delta > 1$: 과제동(과감쇠), 비진동 $\delta = 1$: 임계제동(임계감쇠), 임계진동 $\delta < 1$: 부족제동(부족감쇠), 진동	
부동작 시간요소	$y(t) = Kx(t - L)$	$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = Ke^{-sL}$

8) 보상기

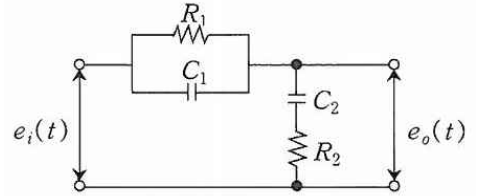
(1) 진상 보상기(lead compensator)

	<p>① 출력전압의 위상이 입력전압의 위상보다 앞서는 경우에 사용</p> <p>② $G(s) = \frac{s+a}{s+b}$ (단, $b > a$)</p>
---	--

(2) 지상 보상기(lag compensator)

	<p>① 출력전압의 위상이 입력전압의 위상보다 뒤지는 경우에 사용</p> <p>② $G(s) = \frac{a(s+b)}{b(s+a)}$ (단, $b > a$)</p>
---	--

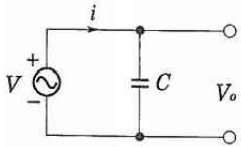
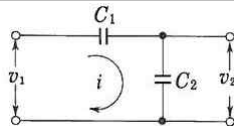
(3) 지상 진상 보상기(lag lead compensator)

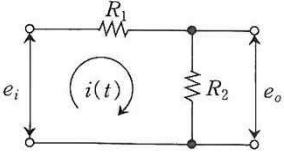
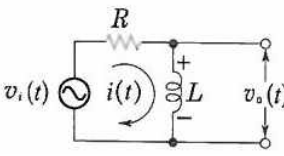
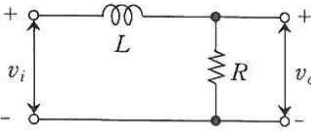
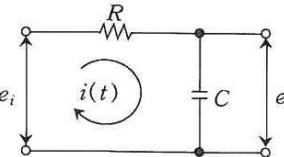
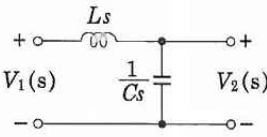
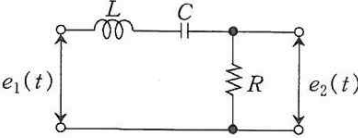
	<p>① 출력측에 콘덴서가 존재하는 경우로 출력 신호의 위상이 입력신호보다 뒤지는 경우</p> <p>② $G(s) = \frac{a(s+b)}{b(s+a)}$ (단, $b > a$)</p>
---	--

9) 조절부의 동작에 의한 분류

구분	약호	표현	특징
비례 동작	P	$y(t) = K_p z(t)$ K_p : 비례감도	잔류편차 발생
적분 동작	I	—	잔류편차 제거
미분 동작	D	—	오차가 커지는 것을 미리 방지
비례 적분 동작	PI	$y(t) = K_p [z(t) + \frac{1}{T_I} \int z(t)dt]$ T_I : 적분시간	잔류편차 제거 정상특성 개선
비례 미분 동작	PD	$y(t) = K_p [z(t) + T_D \frac{dz(t)}{dt}]$ T_D : 미분시간	응답 속응성의 개선
비례 적분 미분 동작	PID	$y(t) = K_p [z(t) + \frac{1}{T_I} \int z(t)dt + T_D \frac{dz(t)}{dt}]$ T_I : 적분시간 T_D : 미분시간	잔류편차 제거 응답 속응성의 개선 응답의 오버슈트 감소, 최적제어
비고	잔류편차 : 목표값과 제어량의 미소한 오차 속응성 : 정상상태에서 다음 정상상태로 넘어가는 상태의 시간 적분제어 : 오차의 크기와 오차가 발생하는 시간의 곱을 적분한 것 미분제어 : 오차가 변하는 속도에 비례하여 조작량을 가산 또는 감산		

10) RLC 전달함수

회로	전달함수
	$G(s) = \frac{V_o(s)}{I(s)} = \frac{1}{sC}$
	$G(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$

	$G(s) = \frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
	$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{sL}{sL + R}$
	$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R}{sL + R}$
	$G(s) = \frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1}$
	$G(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{\frac{1}{sC}}{sL + \frac{1}{sC}}$
	$G(s) = \frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{RCs}{LCs^2 + RCs + 1}$

5. 불대수의 기본정리 및 응용

1) 불대수의 정리 ★★★

(1) 드모르간 법칙

$$\textcircled{1} \overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$$

$$\textcircled{2} \overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$

(2) 불 대수(Boolean algebra)의 정리

논리합	논리곱
$X + 0 = X$	$X \cdot 0 = 0$
$X + 1 = 1$	$X \cdot 1 = X$
$X + X = X$	$X \cdot X = X$
$X + \overline{X} = 1$	$X \cdot \overline{X} = 0$
$X + Y = Y + X$	$X \cdot Y = Y \cdot X$
$X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$	$X (Y Z) = (X Y) Z$
$X (Y + Z) = XY + XZ$	$(X + Y)(Z + W) = XZ + XW + YZ + YW$
$X + XY = X(1 + Y) = X$ $\overline{X} + XY = \overline{X}(Y + \overline{Y}) + XY = \overline{X}Y + \overline{X}\overline{Y} + XY = \overline{X}(Y + \overline{Y}) + Y(\overline{X} + X)$ $= \overline{X} + Y$ $X + \overline{X}Y = X(Y + \overline{Y}) + \overline{X}Y = XY + X\overline{Y} + \overline{X}Y = X + Y$	

2) 시퀀스 제어 심벌 ★

명 칭	a접점	b접점
수동접점(유지형)		
수동동작 자동복귀 접점		
기계적 접점(리미트 접점)		
순시동작순시복귀접점 (계전기접점)		
한시동작순시복귀접점		
순시동작한시복귀접점		
열동계전기보조접점		
전자접촉기접점		

6. 무접점 논리회로 및 유접점 회로

1) AND회로(논리곱 회로) ★★★

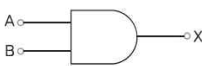
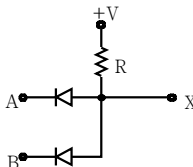
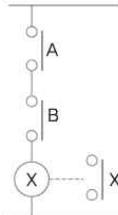
(1) 정의

입력단자 A, B중 모두 ON되어야 출력이 ON되고 그 중 어느 한 단자라도 OFF되면 출력이 OFF되는 회로

(2) 회로의 해석

① 논리식(출력식) $X = A \cdot B$

② 주요특성

Loggic 회로	무접점 회로	유접점 회로	진리표															
			<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	X	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
A	B	X																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																

2) OR회로(논리합 회로) ★★★

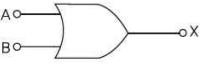
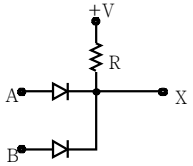
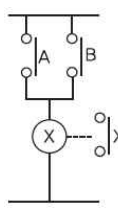
(1) 정의

입력단자 A, B중 어느 하나라도 ON되면 출력이 ON되고 A, B 모든 단자가 OFF되어야 출력이 OFF되는 회로

(2) 회로의 해석

① 논리식(출력식) $X = A + B$

② 주요특성

Loggic 회로	무접점 회로	유접점 회로	진리표															
			<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	X	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
A	B	X																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																

3) NAND 회로(부정 논리곱) ★★★


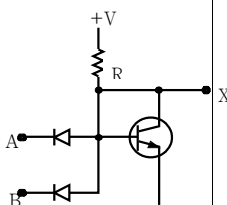
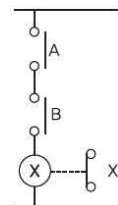
(1) 정의

입력단자 A, B중 어느 하나라도 OFF되면 출력이 ON되고, 입력단자 A, B 모두가 ON되어야 출력이 OFF되는 회로

(2) 회로의 해석

① 논리식(출력식) $X = \overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$

② 주요특성

Logic 회로	무접점 회로	유접점 회로	진리표															
			<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	X	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
A	B	X																
0	0	1																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																

4) NOR 회로(부정 논리합)


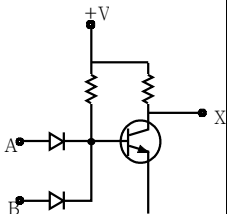
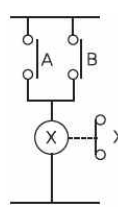
(1) 정의

입력 A, B 중 모두 OFF 되어야 출력이 ON되고 그 중 어느 입력단자 하나라도 ON되면 출력이 OFF 되는 회로

(2) 회로의 해석

① 논리식(출력식) $X = \overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$

② 주요특성

Loggic 회로	무접점 회로	유접점 회로	진리표															
			<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	X	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
A	B	X																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																

5) Exclusive OR(배타적 논리회로) ★★★

(1) 정의

A, B 두 개의 입력 중 어느 하나만 입력할 때 출력이 ON 상태가 나오는 회로를 Exclusive OR회로라 한다.

(2) 회로의 해석

① 논리식(출력식) $X = \overline{A} \cdot B + A \cdot \overline{B}$

② 주요특성

무접점 회로	유접점 회로	진리표															
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr> <td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr> <td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	A	B	X	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
A	B	X															
0	0	0															
0	1	1															
1	0	1															
1	1	0															

6) 일치논리회로(一致論理回路) ★

(1) 정의

입력의 전부가 OFF 또는 ON일 때만 출력이 ON이 되는 논리회로를 일치 논리회로라고 한다.

(2) 회로의 해석

① 논리식(출력식) $X = \overline{A} \cdot \overline{B} + A \cdot B$

② 주요특성

무접점 회로	유접점 회로	진리표															
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr> <td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr> <td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	A	B	X	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1
A	B	X															
0	0	1															
0	1	0															
1	0	0															
1	1	1															

제16장. 자동제어계의 과도응답

1. 응답

1) 응답의 개념

(1) 임의의 시스템에 입력 신호를 가했을 때 출력신호의 변화를 나타내는 것을 응답이라 한다.

(2) 과도응답

① 기준입력신호로 단위 계단함수를 사용하여 해석

② 과도응답 $c(t) = \mathcal{L}^{-1}[C(s)] = \mathcal{L}^{-1}[G(s)R(s)]$

2) 과도응답(시간응답)의 종류

구분	입력신호	응답
임펄스 응답	$r(t) = \delta(t)$	$c(t) = \mathcal{L}^{-1}[G(s)]$
단위계단응답 (인디셜응답)	$r(t) = u(t)$	$c(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s} \times G(s)\right]$
램프응답 (경사응답)	$r(t) = tu(t)$	$c(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2} \times G(s)\right]$
포물선 응답 (파라볼라응답)	$r(t) = \frac{1}{2}at^2$	$c(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{a}{s^3} \times G(s)\right]$

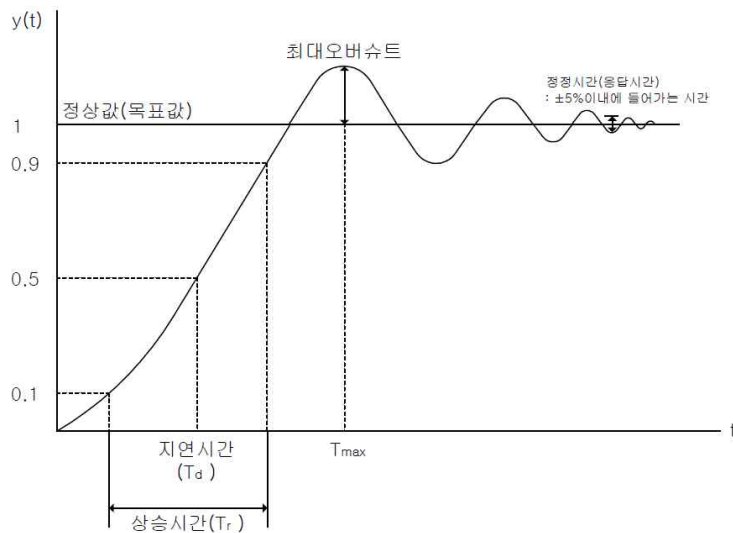
2. 시간응답의 특성

1) 정상응답

과도응답이 일정한 오차 범위 내에서 존재하는 응답(입력과 출력의 오차)

2) 과도응답

단위 계단 함수를 인가했을 때 나타나는 특성



- (1) 지연시간 : 응답이 목표값의 50%에 도달하는데 걸리는 시간
- (2) 상승시간 : 응답이 목표값의 10%에서 90%에 도달하는데 걸리는 시간
- (3) 오버슈트(over shoot)

- ① 자동제어계의 안정도를 판단하는 척도
- ② 입력과 출력사이의 최대 편차량
- ③ 백분율 최대오버슈트

$$= \frac{\text{최대 오버슈트}}{\text{최종 목표값}} \times 100[\%]$$

- (4) 감쇠비 : 과도 응답값이 소멸되는 정도를 나타내는 양

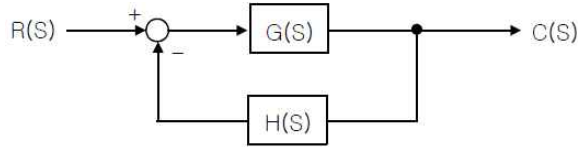
$$= \frac{\text{제2 오버슈트}}{\text{최대 오버슈트}}$$

- (5) 최대 오버슈트가 발생하는 시간

$$t = \frac{\pi}{w_n \sqrt{1 - \delta^2}}$$

3. 자동제어계의 과도응답

1) 특성방정식



(1) 종합전달함수

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{G(S)}{1 + G(S)H(S)}$$

(2) 특성 방정식

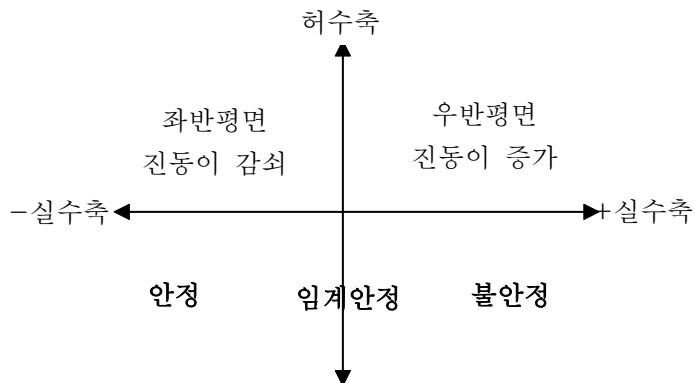
① 전달함수의 분모가 0인 방정식

$$1 + G(S)H(S) = 0$$

② 특성근 : 전달함수의 분모가 0인 방정식을 만족하는 S값

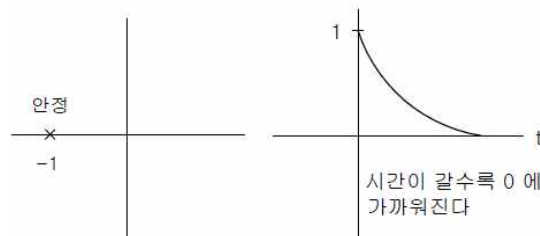
2) 특성방정식의 근의 위치와 응답

(1) 특성근의 위치에 따른 안정성의 판별

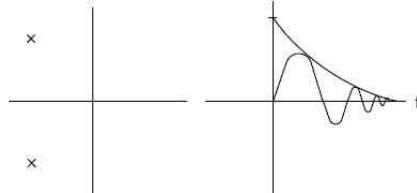


(2) 안정

① $G(S) = \frac{1}{S+1} \rightarrow e^{-t}$

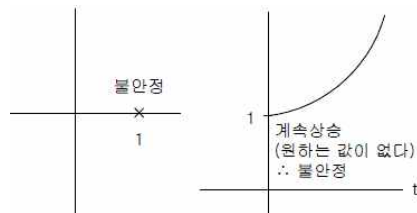


$$\textcircled{2} \quad G(S) = \frac{w}{(s+a)^2 + w^2} \rightarrow e^{-at} \sin wt$$

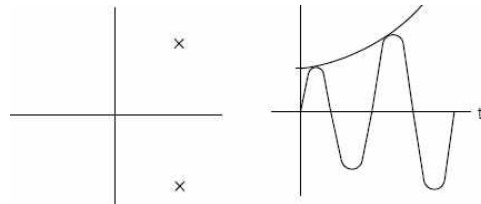


(3) 불안정

$$\textcircled{1} \quad G(S) = \frac{1}{S-1} \rightarrow e^t$$



$$\textcircled{2} \quad G(S) = \frac{w}{(s-a)^2 + w^2} \rightarrow e^{at} \sin wt$$



3) 영점(zero) 및 극점(pole)

영점	극점
전달함수가 0이 되는 s 값	전달함수가 ∞가 되는 s 값
분자=0인 상태	분모=0인 상태
회로 단락상태	회로 개방상태
좌표평면상 “○” 표시	좌표평면상 “×” 표시

4) 2차 제어계의 과도응답

(1) 2차계 전달함수

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2w_n\delta s + w_n^2}$$

(2) 특성방정식

$$s^2 + 2w_n\delta s + w_n^2 = 0$$

(3) 특성근

$$\text{특성근 } s = -w_n\delta \pm jw_n\sqrt{1-\delta^2} = -\sigma \pm jw$$

 δ : 제동비(감쇠계수) w_n : 자연 주파수(고유 주파수)실제 주파수(감쇠 진동 주파수) : $w = w_n\sqrt{1-\delta^2}$

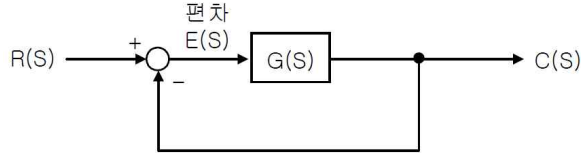
(4) 감쇠비에 따른 특성

- ① $\delta < 1$ 인 경우 : 부족제동(공액 복소수근을 갖는다)
- ② $\delta = 1$ 인 경우 : 임계제동(중근을 갖는다)
- ③ $\delta > 1$ 인 경우 : 과제동(2개의 실근을 갖는다)
- ④ $\delta = 0$ 인 경우 : 무제동

제17장. 편차와 감도

1. 편차

1) 정상편차



종합 전달함수 $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)}$ 에서 출력 $C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} R(s)$

$$\text{편차 } E(s) = R(s) - C(s) = \frac{1}{1 + G(s)} R(s)$$

정상편차($t = \infty$)

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s)} R(s)$$

2) 정상편차의 종류

(1) 정상위치 편차 : 단위계단입력 사용

① 입력 $r(t) = u(t) \rightarrow R(s) = \frac{1}{s}$

② 정상위치 편차

$$e_{ssp} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s)} \times \frac{1}{s} = \frac{1}{1 + k_p}$$

③ 정상위치 편차 상수

$$k_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)$$

(2) 정상속도 편차 : 단위램프입력 사용

① 입력 $r(t) = tu(t) \rightarrow R(s) = \frac{1}{s^2}$

② 정상속도 편차

$$e_{ssv} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s)} \times \frac{1}{s^2} = \frac{1}{k_v}$$

③ 정상속도 편차 상수

$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G(s)$$

(3) 정상가속도 편차 : 단위 포물선 입력 사용

① 입력 $r(t) = \frac{1}{2}t^2 \rightarrow R(s) = \frac{1}{s^3}$

② 정상가속도 편차 $e_{ssa} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s)} \times \frac{1}{s^3} = \frac{1}{k_a}$

③ 정상가속도편차 상수 $k_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)$

3) 0형, 1형, 2형 제어계의 분류

$$G(s) = \frac{K(s + z_1)(s + z_2)(s + z_3) \cdots}{s^n(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3) \cdots}$$

(1) s^n 의 n 의 차수에 따른 분류

$n=0$: 0형 제어계, $n=1$: 1형 제어계, $n=2$: 2형 제어계

(2) 형에 따른 정상편차

구분	0형	1형	2형
정상위치편차	존재	0	0
정상속도편차	∞	존재	0
정상가속도편차	∞	∞	존재

2. 감도

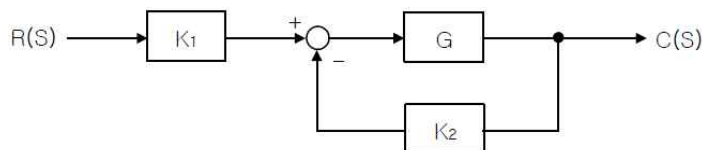
1) 감도의 정의식

(1) 미소 증가분에 대한 변화

(2) K 의 특성에 대한 페루프 전달함수 T 의 미분감도

$$S_K^T = \frac{d \ln T}{d \ln K} = \frac{\frac{dT}{T}}{\frac{dK}{K}} = \frac{K}{T} \times \frac{dT}{dK}$$

2) K_1 에 대한 계통의 감도해석



$$T = \frac{K_1 G}{1 + K_2 G} \quad S_{K_1}^T = \frac{K_1}{T} \times \frac{dT}{dK_1} = 1$$

제18장. 주파수 응답

1. 주파수 응답

1) 정의

(1) 정의 : 정현파 신호를 가할 때의 응답

(2) 주파수 전달함수

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| \angle G(j\omega) \text{ 주파수 이득 } \angle \text{ 위상차 (위상각)}$$

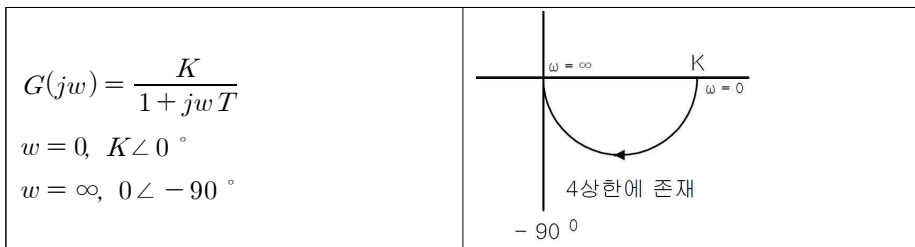
$$\textcircled{1} \text{ 주파수 이득 } |G(j\omega)| = \sqrt{\text{실수}^2 + \text{허수}^2}$$

$$\textcircled{2} \text{ 위상차 } \angle G(j\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{허수}}{\text{실수}}$$

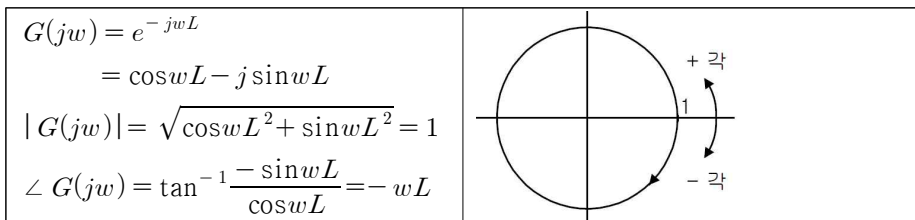
2) 벡터의 궤적

(1) 벡터궤적 : ω 를 $0 \rightarrow \infty$ 변화시켜 크기와 위상의 변화를 나타낸 것

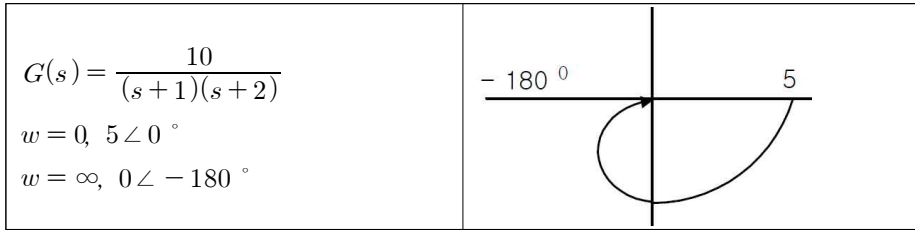
(2) 1차 지연요소의 벡터궤적



(3) 부동작 요소



(4) 2차 지연요소



2. 보드선도

1) 보드선도의 개념

- (1) 이득과 위상각을 주파수 w 의 함수로 표시한 것
- (2) 횡축에 주파수 w 를 종축에 이득[dB]을 나타낸 것

2) 이득과 위상차의 표현

- (1) 이득

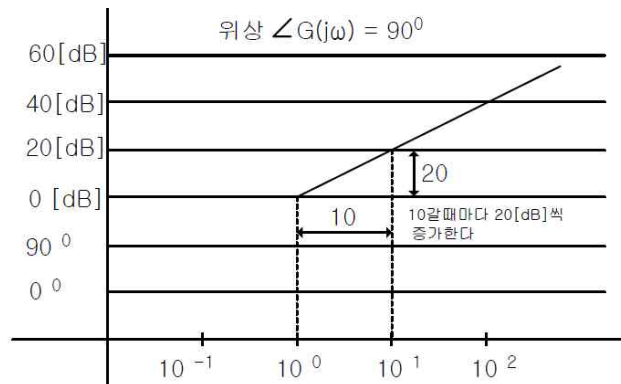
$$g = 20 \log_{10} |G(jw)H(jw)| [\text{dB}]$$

- (2) 위상차

$$\phi = \angle G(jw)H(jw)$$

3) 미분요소 $G(s) = s = (jw)^n$

- (1) 이득 $g = 20 \times (n)$
- (2) 위상차 $\phi = 90^\circ \times (n)$



4) 적분요소 $G(s) = \frac{1}{s} = \frac{1}{(jw)^n} = (jw)^{-n}$

- (1) 이득 $g = 20 \times (-n)$

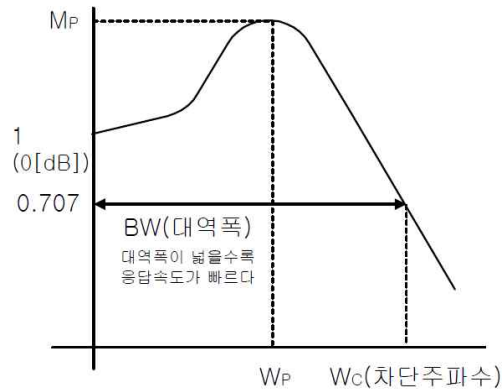
(2) 위상차 $\phi = 90^\circ \times (-n)$

5) 1차 지연요소 $G(s) = \frac{1}{1+sT} = \frac{1}{1+jwT}$

(1) 이득 $g = 20\log_{10}\left(\frac{1}{\sqrt{1+(wT)^2}}\right)$

(2) 위상차 $\phi = -\tan^{-1}\frac{wT}{1} = -\tan^{-1}wT$

3. 주파수 특성



1) 대역폭

- (1) 크기가 $0.707 M_0$ 에서의 주파수
- (2) 대역폭이 넓을수록 응답속도가 빠르다.

2) 영주파수에서의 이득 M_0

$1 - M_0$: 정상오차

3) 공진정점 M_p

- (1) 최대값으로 정의, 계의 안정도의 척도
- (2) 공진정점이 크면 과도응답시 오버슈트가 증가
- (3) 최적의 공진정점 : 1.1~1.5

(4) $M_p = \frac{1}{2\delta\sqrt{1-\delta^2}}$

4) 분리도

- (1) 신호와 외란을 분리하는 제어계의 특성
- (2) 분리도가 예리할수록 공진정점이 커져 불안정해진다.

5) 공진 주파수

- (1) 공진 정점이 일어나는 주파수
- (2) 공진 주파수가 클수록 주기는 작다.

제19장. 제어계의 안정도 해석

1. 루드-홀비쯔의 안정도 판별법

1) 안정도 판별의 기준

- (1) 특성 방정식의 모든 계수의 부호가 (+)일 것
- (2) 계수 중 어느 하나라도 0이어서는 안 된다.
- (3) 루드-홀비쯔표 제1열의 부호가 모두 (+)일 것(안정하다)
- (4) 특성방정식의 최고 차부터 상수항까지 모두 존재할 것
- (5) 제1열의 부호가 변화 : s 평면 우반면에 존재하는 근의 수를 말하며, 제어계가 불안정해진다. 부호변화 수만큼 근의 수가 존재한다.

2) 루드 수열에 의한 안정도 판별법

$$F(s) = as^6 + bs^5 + cs^4 + ds^3 + es^2 + fs + g = 0$$

s^6	a	c	e	g
s^5	b	d	f	0
s^4	$\frac{bc-ad}{b} = A$	$\frac{be-af}{b} = B$	g	
s^3	$\frac{Ad-Bb}{A} = C$	$\frac{Af-bg}{A} = D$	0	
s^2	$\frac{BC-AD}{C} = E$	g		
s^1	$\frac{ED-Cg}{E}$	0		
s^0	g			
	<u>제1열</u>			

3) 안정도 판정

$$(1) 2s^3 + 5s^2 + 3s + 1 = 0$$

s^3	2	3
s^2	5	1
s^1	$\frac{5 \times 3 - 2 \times 1}{5} = \frac{13}{5}$	
s^0	1	0

- ① 제1열의 계수가 (+)이고 부호변화가 없으므로 안정하다.
 ② s평면의 우반평면에 존재하는 근의 수 : 0개
 ③ s평면의 좌반평면에 존재하는 근의 수 : 3개

(2) $s^4 + 2s^3 + s^2 + 4s + 2 = 0$

s^4	1	1	2
s^3	2	4	0
s^2	$\frac{2 \times 1 - 1 \times 4}{2} = -1$		2
s^1	$\frac{-1 \times 4 - 2 \times 2}{-1} = 8$		0
s^0	2		

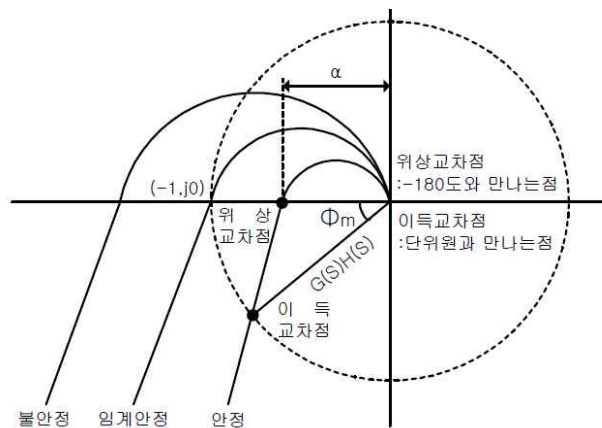
- ① 제1열의 부호변화가 있으므로 불안정하다.
 ② s평면의 우반평면에 존재하는 근의 수 : 2개
 ③ s평면의 좌반평면에 존재하는 근의 수 : 2개

2. 나이퀴스트(Nyquist) 안정도 판별법

1) 주요특징

- (1) 시스템의 주파수 영역 응답에 대한 정보를 제공
- (2) 시스템의 안정도를 개선할 수 있는 방법을 제시
- (3) 절대 안정도에 대한 정보를 제공
- (4) 절대안정과 상대안정을 동시에 판별

2) 나이퀴스트 선도



(1) 이득여유

$$GM = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{G(j\omega)H(j\omega)} \right|_{\omega = \omega_c} = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{\alpha} \right|_{\omega = \omega_c} \text{ [dB]}$$

문제1. $G(s)H(s) = \frac{2}{(s+1)(s+2)}$ 의 이득여유는?

- ① 3[dB] ② 7[dB] ③ 0[dB] ④ 1[dB]

[해설]

$$GM = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{G(jw)H(jw)} \right|_{w=0} = 20 \log_{10} \left| \frac{2}{(0+1)(0+2)} \right|_{w=0} = 0$$

(2) 위상여유(ϕ_m)

단위원과 나이퀴스트 선도와 교점이 -실수축과 이루는 각

(3) 안정조건

① 이득여유 : 4~12[dB]

② 위상여유 : 30~60°

(4) 2차 제어계의 나이퀴스트 선도 특징

① 부의 실수축과 교차하지 않는다.

② 이득여유 = ∞

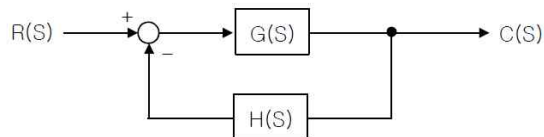
③ $|GH| = 0$

제20장. 근궤적법

1. 근궤적의 특성

1) 근궤적의 성질

- (1) 주파수 응답에 대한 정보제공, 시간영역 해석
- (2) s평면에서 개루프 전달함수의 절댓값이 1인 점들의 집합
 $|G(s)H(s)| = 1$



2) 근궤적의 작도법

- (1) 근궤적은 극점(p)에서 출발→영점(z)에서 종료
- (2) 실수축에 대칭
- (3) 근궤적의 수(N)
 - ① $N = \text{영점과 극점의 수 중 큰 값과 같다.}$
 - ② 특성방정식의 최고차수와 같다.
- (4) 점근선의 각도

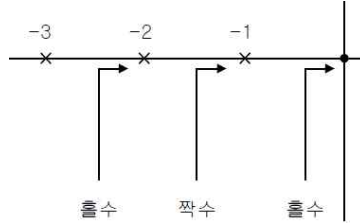
$\alpha = \frac{(2k+1)\pi}{p-z}$	$k=0, 1, 2, 3, \dots$ p : 극점수 z : 영점수
----------------------------------	---

(5) 점근선의 교차점

① 점근선은 실수축 상에서 교차

② 점근선 교차점 = $\frac{\sum \text{극점} - \sum \text{영점}}{\text{극점수} - \text{영점수}}$

(6) 실수축상 근궤적이 존재하는 구간 : 홀수



(7) 근궤적의 분지점(이탈점)

$$\frac{dK}{ds} = 0 \text{인 } s \text{의 값}$$

제21장. 상태방정식

1. 상태방정식

1) 상태방정식

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$\dot{y}(t) = Cx(t)$$

A : 시스템 행렬, B : 제어행렬, C : 출력행렬

2) 특성방정식

(1) $|sI - A| = 0$ 방정식

(2) 단위행렬(I)

① $\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$ ② $\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$

3) 천이행렬

(1) 천이행렬

$$\phi(t) = \mathcal{L}^{-1}[(sI - A)^{-1}]$$

역행렬의 계산

$$\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{vmatrix} d & -b \\ -c & a \end{vmatrix}$$

(2) 천이행렬의 성질

① $\phi(0) = I$

$$\textcircled{2} \phi^{-1}(t) = \phi(-t) = e^{-At}$$

$$\textcircled{3} \phi(t_2 - t_1)\phi(t_1 - t_0) = \phi(t_2 - t_0)$$

$$\textcircled{4} \phi(t)^K = \phi(Kt) \quad K \text{는 정수}$$

4) 시스템 행렬 찾는 방법

$$(1) \frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 5 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + \frac{dc(t)}{dt} + 2c(t) = r(t) \text{에서 최고차에 대해 정리하면}$$

$$\frac{d^3 c(t)}{dt^3} = -2c(t) - \frac{dc(t)}{dt} - 5 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + r(t)$$

$$\text{시스템 행렬 } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & -5 \end{bmatrix}$$

$$(2) \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 3 \frac{dc(t)}{dt} + 2c(t) = r(t) \quad \frac{d^2 c(t)}{dt^2} = -2c(t) - 3 \frac{dc(t)}{dt} + r(t)$$

$$\text{시스템 행렬 } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix}$$

2. z 변환

1) z 변환의 개념

- (1) 차분방정식이나 이산시스템과 같은 불연속 시스템을 해석하는데 적용
- (2) s 변환과 z 변환의 상호 관계

$$s = \frac{1}{T} \ln Z \quad T : \text{샘플링 시간}$$

2) z 변환의 초기값 정리와 최종값 정리

구분	초기값 정리	최종값 정리
z 변환	$f(0) = \lim_{z \rightarrow \infty} F(z)$	$f(\infty) = \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1})F(z)$
라플라스 변환	$f(0) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$	$f(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$

3) 주요함수의 z 변환과 라플라스 변환 비교

$f(t)$	$F(s)$	$F(z)$
$\delta(t)$	1	1
$u(t)$	$\frac{1}{s}$	$\frac{z}{z-1}$
$tu(t)$	$\frac{1}{s^2}$	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$	$\frac{z}{z-e^{-aT}}$

3. z 평면의 해석

