# 基礎電気回路CH-13

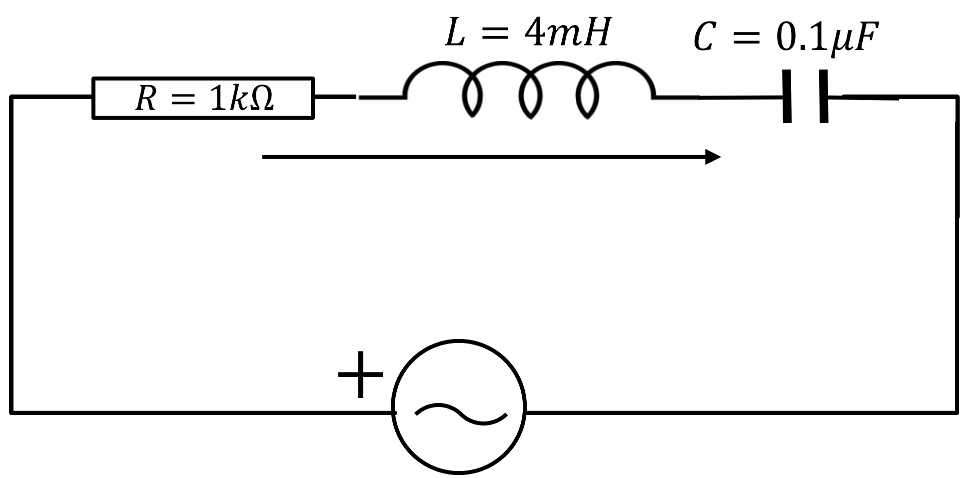
# 基礎電気回路復習

図１の直列回路について以下の各小問に答えよ。なお電圧源の出力は$\mathrm{E} = 100\sin(wt)\,V$である。また、電源出力は＋記号側を正とし、電流は矢印の向きを正とする。

（1）この回路の共振角周波数（電流が最大となる角周波数）$w_r$はいくらか。また共振時の回路の全インピーダンスの全複素数インピーダンス$\mathrm{Z}_r$はいくらか。

（2）電圧源の角周波数が$\mathrm{w} = 10^4 rad/s$の時、回路の全複素数インピーダンスZを求めよ。

（3）共振時に回路に流れる電流値$I_r(t)$と各素子R,L,Cに掛かる電圧$V_R(t), V_L(t), V_C(t)$をそれぞれ答えよ（ $w_r$を用いて良い）。各素子に掛かる電圧は電流を示す矢印の上流側を正とする。



## 当問題、注意すべき箇所:

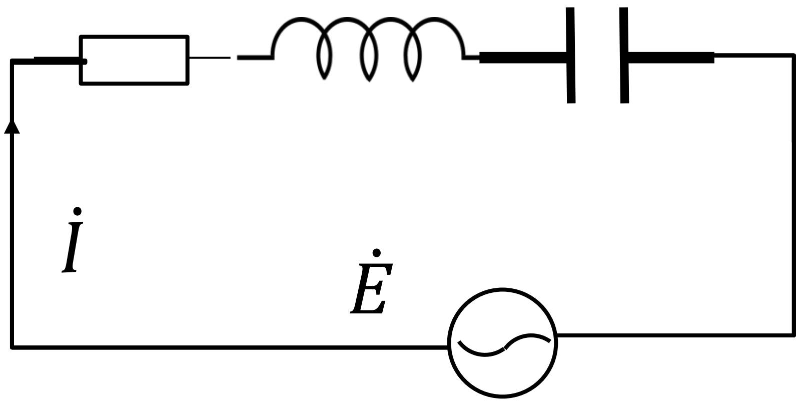
- ◎ 瞬時値→複素数表示→フェーザ表示
- ◎ XXの大きさ　⇔　フェーザ表示の実効値
- ◎ 共振の条件:
- ◎ 共振になった時、各素子の電圧の計算
- ◎ フェーザ表示で電圧を計算する必要性

# R−L-C直列共振回路:

$$\dot{Z} = R + jwL + \frac{1}{jwC}$$

$$= R + jwL - j\frac{1}{wC}$$

$$= R + j(wL - \frac{1}{wC})$$




$$= \sqrt{R^2 + (wL - \frac{1}{wC})^2} \angle tan^{-1}\frac{wL - \frac{1}{wC}}{R} = Z\angle\theta$$

$$\boldsymbol{Z = \sqrt{R^2 + (wL - \frac{1}{wC})^2}} \qquad \boldsymbol{\theta = \tan^{-1}\frac{wL - \frac{1}{wC}}{R}}$$

合成したインピーダンスの大きさと位相角を導けるように

# 解答分析:

（1）電圧源の角周波数が$w = 10^4 rad/s$の時、回路の全複素数インピーダンスZを求めよ。

複素数表示に
注意

$$\dot{Z} = R + jwL + \frac{1}{jwC}$$

$$\dot{Z} = 1000 + j10^4 * 4 * 10^{-3} + \frac{1}{j10^4 * 0.1 * 10^{-6}}$$

$$\dot{Z} = 1000 + j40 + \frac{1000}{j}$$

$$\dot{Z} = 1000 + j40 - 1000j$$

$$\dot{Z} = 1000 - 960j$$

複素数
表示

(2)この回路の共振角周波数(電流が最大となる角周波数)$w_r$はいくらか。また共振時の回路の全インピーダンス$Z_r$はいくらか。

## 分　　析

電流が最大となる⇔電流の大きさを計算する必要がある！！！

電流の大きさを計算するために、$\dot{E}$をフェーザ表示にしたほうがいいかと思います。

$$\dot{E} = E \angle \theta_E$$

実効値　　位相角

$$\dot{Z} = Z \angle \theta_Z$$

実効値　　位相角

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} = \frac{E \angle \theta_E}{Z \angle \theta_Z} = \underbrace{\frac{E}{Z}}_{\text{実効値}} \angle \underbrace{\theta_E - \theta_Z}_{\text{位相角}}$$

$\dot{I}$の大きさ= $\dot{I}$の実効値$= \frac{E}{Z}$

$\dot{I}$の位相角は$\theta_E - \theta_Z$

$$Z = \sqrt{R^2 + (wL - \frac{1}{wC})^2} \qquad \theta_Z = \tan^{-1}\frac{\mathrm{wL} - \frac{1}{\mathrm{wC}}}{\mathrm{R}}$$

$i$の実効値(大きさ)＝$\frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{R^2+(wL-\frac{1}{wC})^2}}$ [A]

$i$の位相角＝$\theta_E - \theta_Z = \theta_E - \tan^{-1}\frac{\mathrm{wL}-\frac{1}{\mathrm{wC}}}{\mathrm{R}}$

$i$の大きさ$\frac{E}{Z}$が最大になるという条件を満たすために、

$wL - \frac{1}{wC}$＝0になる必要がある。すなわち

$$w_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad Z = R$$

値を式に代入して計算すると

$$w_r = \frac{1}{\sqrt{4 * 10^{-3} * 0.1 * 10^{-6}}} = \frac{1}{2 * 10^{-5}}$$
$$= 5 \times 10^4 rad/s$$

$$\dot{Z}_r = R = 1000\Omega$$

(3) 共振時に回路に流れる電流値$I_r(t)$と各素子R,L,Cに掛かる電圧$V_R(t)$, $V_L(t)$, $V_C(t)$をそれぞれ答えよ( $w_r$を用いて良い)。各素子に掛かる電圧は電流を示す矢印の上流側を正とする。

- **瞬時値→複素数表示→フェーザ表示**
- **フェーザ表示で電圧を計算する必要性**
- **フェーザ表示から瞬時値$V_R(t)$, $V_L(t)$, $V_C(t)$に変換する必要がある**

- **瞬時値** $\mathrm{E} = 100 \sin(wt + 0)$

**最大値**

**位相角**

- **複素数表示** $\mathrm{E} = 50\sqrt{2}\ e^{jwt+0}$

**実効値**

**位相角**

- **フェーザ表示** $\mathrm{E} = 50\sqrt{2}\ \angle 0^{o}$

**実効値**

**位相角**

共振時: $\dot{Z}_r = R = 1000\Omega \qquad w_r = 50000rad/s$

◉ **フェーザ表示**

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} = \frac{50\sqrt{2}\angle 0^o}{1000\angle 0^o} = 0.05\sqrt{2}\angle 0^o \text{ [A]}$$

◉ **複素数表示**

$$\dot{I}_r = 0.05\sqrt{2}\ e^{jwt+0}$$

◉ **瞬時値**

$$\dot{I}_r(t) = 0.05\sqrt{2} * \sqrt{2}\ \sin(\mathrm{wt}) = 0.1\sin(\mathrm{wt})$$

# 抵抗における電圧降下：

◉ フェーザ表示

$$\dot{V}_R = R * \dot{I} = 1000\angle 0^o * 0.05\sqrt{2}\angle 0^o$$
$$= 50\sqrt{2} \ \ \angle 0^o$$

実効値　位相角

◉ 瞬時値表示

$$V_r(t) = 50\sqrt{2} * \sqrt{2} \ \ \sin(w_r t + 0^o)$$

◉ 瞬時値表示

$$V_r(t) = 100 \ \ \sin(w_r t)$$

# コイルにおける電圧降下：

◉ **フェーザ表示**

$$\dot{V}_L = jwL * \dot{I} = j * 4 * 10^{-3} * 50000 * 0.05\sqrt{2}\angle 0^o$$

$$\dot{V}_L = \angle 90^o * 10\sqrt{2}\angle 0^o = 10\sqrt{2}\angle 90^o$$

◉ **瞬時値表示**

$$V_L(t) = 10\sqrt{2} * \sqrt{2}\sin(w_r t + 90^o)$$

$$V_L(t) = 20\cos(w_r t)$$

# コンデンサにおける電圧降下：

$$\dot{V}_C = \frac{1}{j5 * 0.1 * 10^{-2}} * \dot{I} = -j * 200 * 0.05\sqrt{2}\angle 0^o$$

$$\dot{V}_C = -\angle 90^o * 10\sqrt{2}\angle 0^o = \mathbf{-10\sqrt{2}\angle 90^o} \quad (\text{✗} \odot)$$

$$V_C(t) = -10\sqrt{2} * \sqrt{2}\sin(w_r t + 90^o)$$

◉ **瞬時値表示**

$$V_C(t) = -20\cos(w_r t)$$

$$\dot{V}_C = \angle -90^o * 10\sqrt{2}\angle 0^o = \mathbf{10\sqrt{2}\angle - 90^o} (\odot)$$

$$V_C(t) = 10\sqrt{2} * \sqrt{2}\sin(w_r t - 90^o)$$

◉ **瞬時値表示**

$$V_C(t) = -20\cos(w_r t)$$

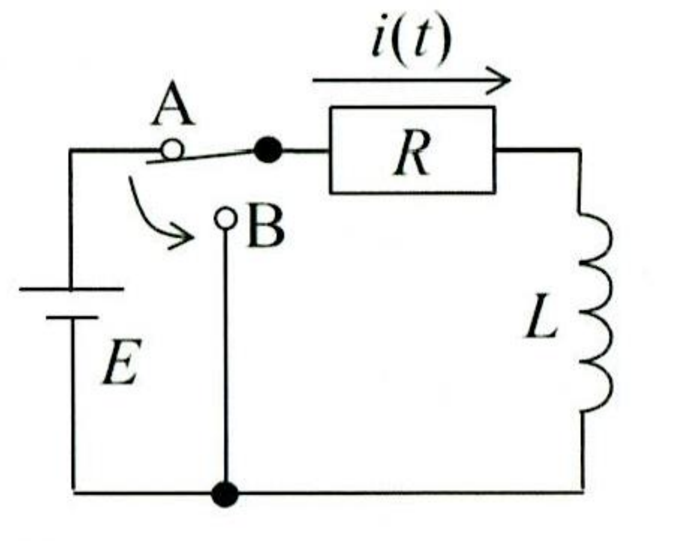
図のように出力電圧$E$の直流電源、抵抗R,インダクタンスLがスイッチを介して接続された回路がある。時刻$t < 0$ではスイッチはAに繋がれて長い時間が経過しており、$t = 0$でAからBに切り替えた。回路に流れる電流i(t)（図の矢印方向を正とする）とした時、次の問に答えよ。

1）　$t < 0$における $i(t)$を求めよ。

2）$t > 0$における $i(t)$を満たす微分方程式を、$t > 0$におけるキルヒホットの電圧則から求めよ。

3）　全問（4−1）と（4−2）より、$t > 0$における電流の式$i(t)$を求めよ。

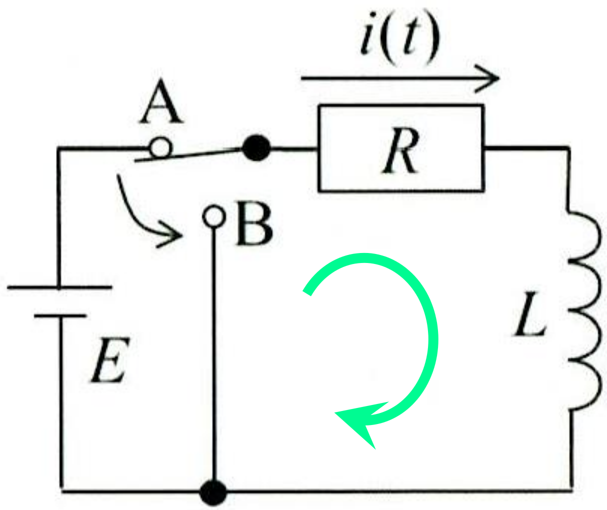
4）　$t = 0$でスイッチを切り替えた時の過渡応答の時定数を求めよ。



1） $t < 0$における $i(t)$を求めよ。

$$i = \frac{E}{R}$$

2）$t > 0$における $i(t)$を満たす微分方程式を、$t > 0$におけるキルヒホットの電圧則から求めよ。




$$i * R + L\frac{di}{dt} = 0$$

３） 全問（４−１）と（４−２）より、$t > 0$における電流の式$i(t)$を求めよ。

$$i * R + L\frac{di}{dt} = 0$$

$$\frac{di}{i} = \frac{-R}{L}dt$$

$$\ln(i) = \frac{-R}{L}t + C$$

$$i = Ce^{\frac{-R}{L}t}$$

t= 0

$$i = \frac{E}{R}$$

$$C = \frac{E}{R}$$

$$i = \frac{E}{R}e^{\frac{-R}{L}t}$$

4）　$t = 0$でスイッチを切り替えた時の過渡応答の時定数を求めよ。

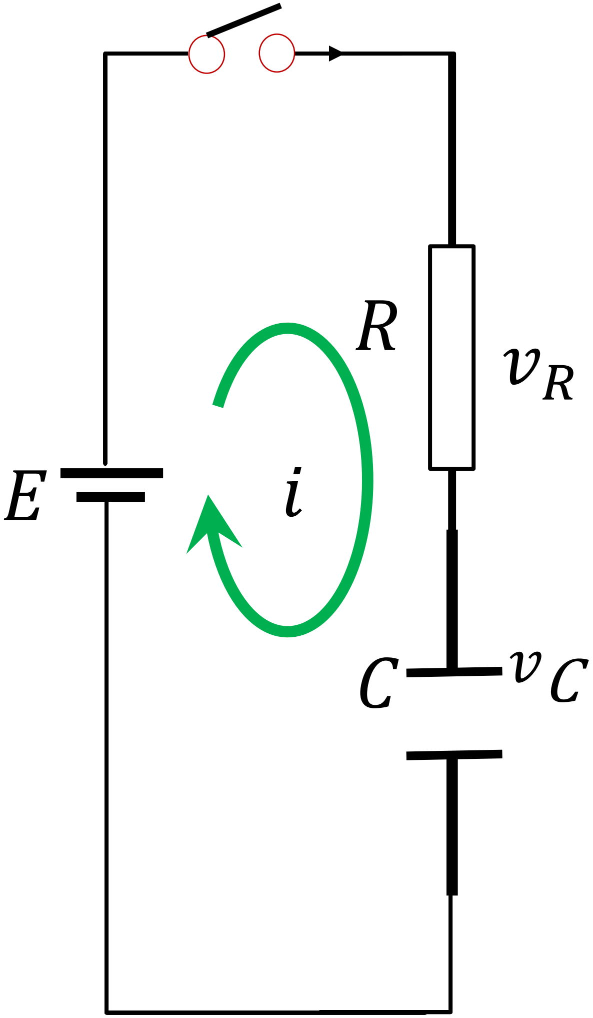
$$i = \frac{E}{R} e^{\frac{-R}{L}t} \Rightarrow i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

指数の部分を変形する:

$$i = \frac{E}{R} e^{\frac{-R}{L}t} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{L/R}}$$

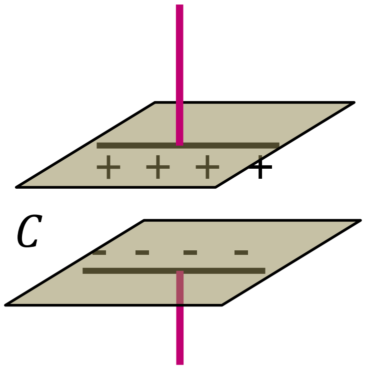
$$\tau = \frac{L}{R}$$

# RC直列回路における過渡応答現象




$$v_R + v_C - E = 0$$

$$v_R + v_C = E$$




$$v_C = \frac{1}{C}\int i\,dt$$

$$i = C\frac{dv_C}{dt}$$

# RC直列回路における過渡応答現象

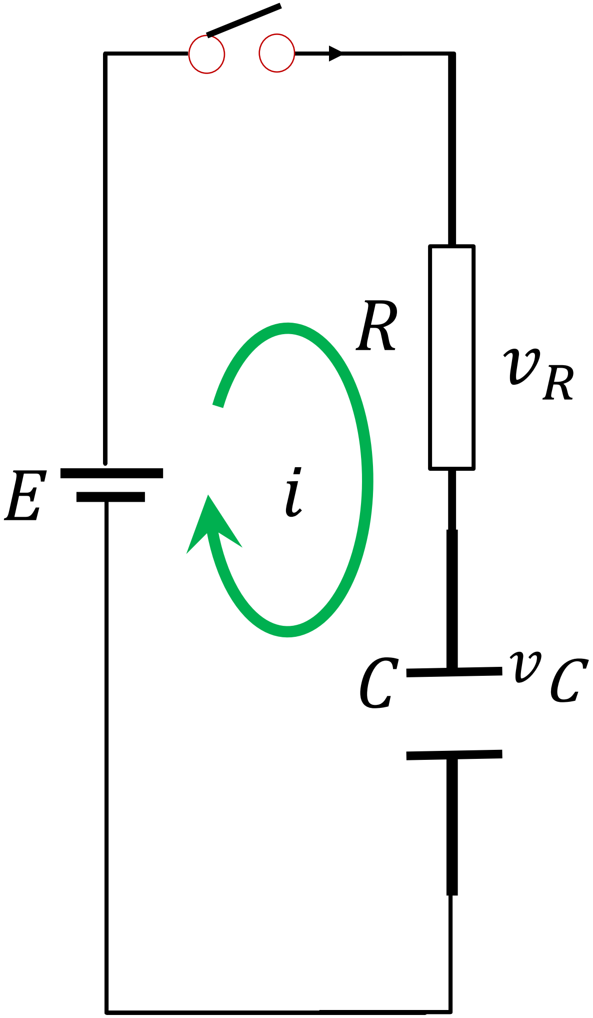
$$Ri + \frac{1}{C}\int i\,dt = \mathrm{E}$$

$$q = \int_0^t i\,dt \qquad i = \frac{dq}{dt} \qquad q = Cv_C$$

$$R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = \mathrm{E}$$

$$RC\frac{dv_C}{dt} + v_C = \mathrm{E}$$

# ❑ 定常解

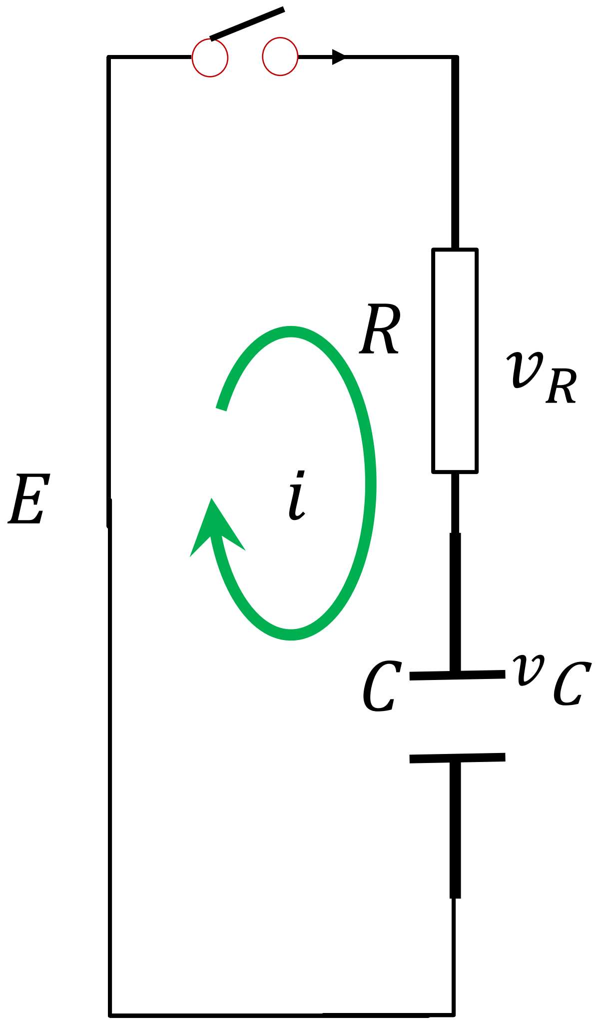



$$RC\frac{dv_C}{dt} + v_C = \mathrm{E}$$

$$\frac{dv_C}{dt} = 0$$

$$\boxed{v_C = \mathrm{E}}$$

## ❑ 過渡解




$$RC\frac{dv_C}{dt} + v_C = 0$$

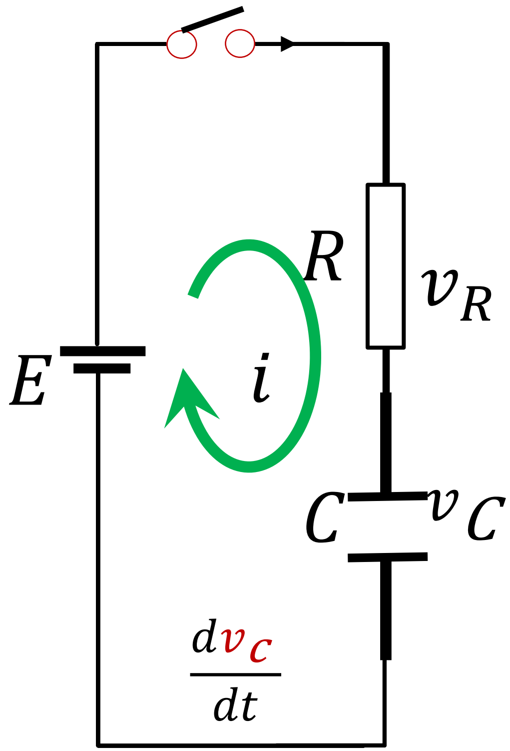
$$\frac{dv_C}{v_C} = -\frac{1}{CR}dt$$

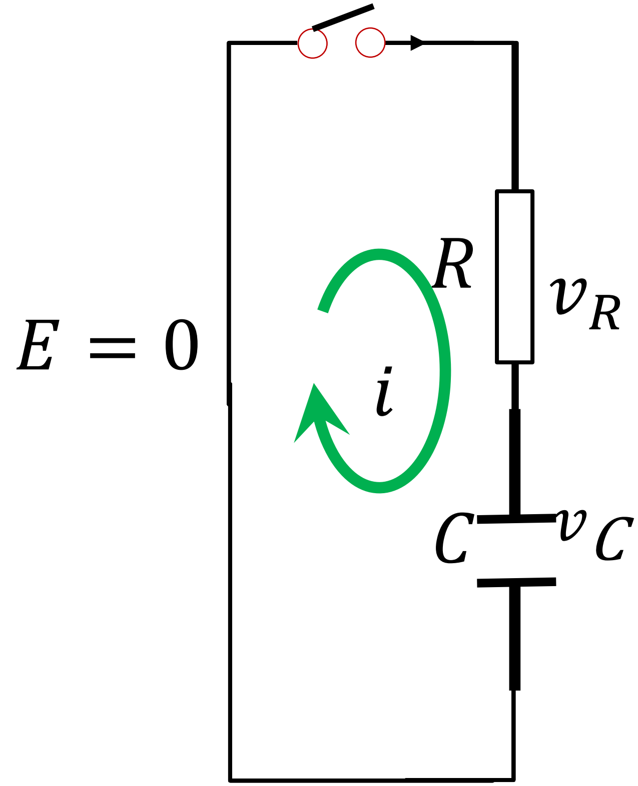
$$\boxed{v_C = Ae^{-\frac{1}{CR}t}}$$

## □ 一般解 ＝過渡解＋定常解

$v_C = \mathrm{E}$

$v_C = Ae^{-\frac{1}{CR}t}$

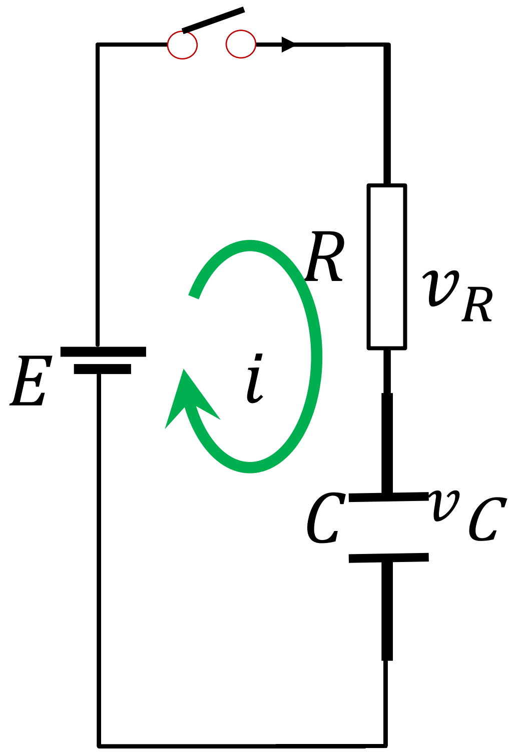



$$v_C = E + Ae^{-\frac{1}{CR}t}$$

## ❑ 初期条件から定数Aを決める:

$$v_C = E + Ae^{-\frac{1}{CR}t}$$



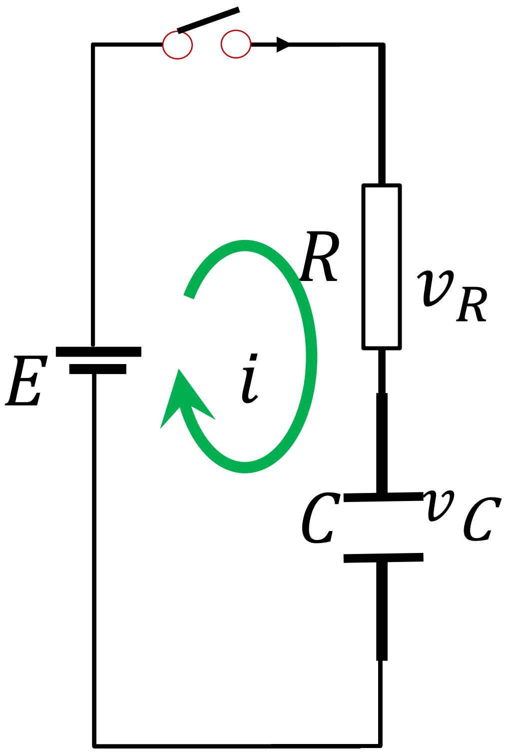

初期条件: $t = 0^-$

キャパシタンスCの初期電荷

$$q = 0$$

$$v_C = \frac{q}{C} = 0\ (t = 0^-)$$

## ❑ 完全解:

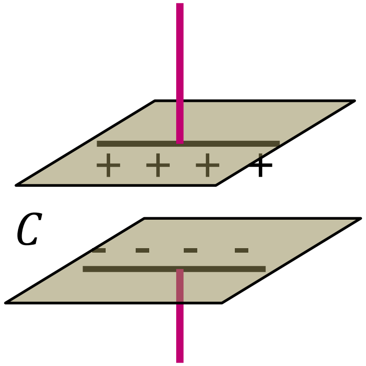



$$0 = E + A \Rightarrow A = -E$$

$$v_C = E + Ae^{-\frac{1}{CR}t}$$

$$v_C = E - Ee^{-\frac{1}{CR}t}$$

# 電流$i$を決める:




$$V = \frac{1}{C}\int i\,dt \quad \Rightarrow \quad i = C\frac{dv_C}{dt}$$

$$v_C = E - Ee^{-\frac{1}{CR}t}$$

$$i = C\frac{dv_C}{dt} = -EC * \frac{-1}{CR}e^{-\frac{1}{CR}t}$$

$$i = \frac{E}{R}e^{-\frac{1}{CR}t}$$

類似の問題で、もしコイルではなくコンデンサになったらどうなるか？

## 教科書の136ページ目の例題を参考にしてください


136ページ

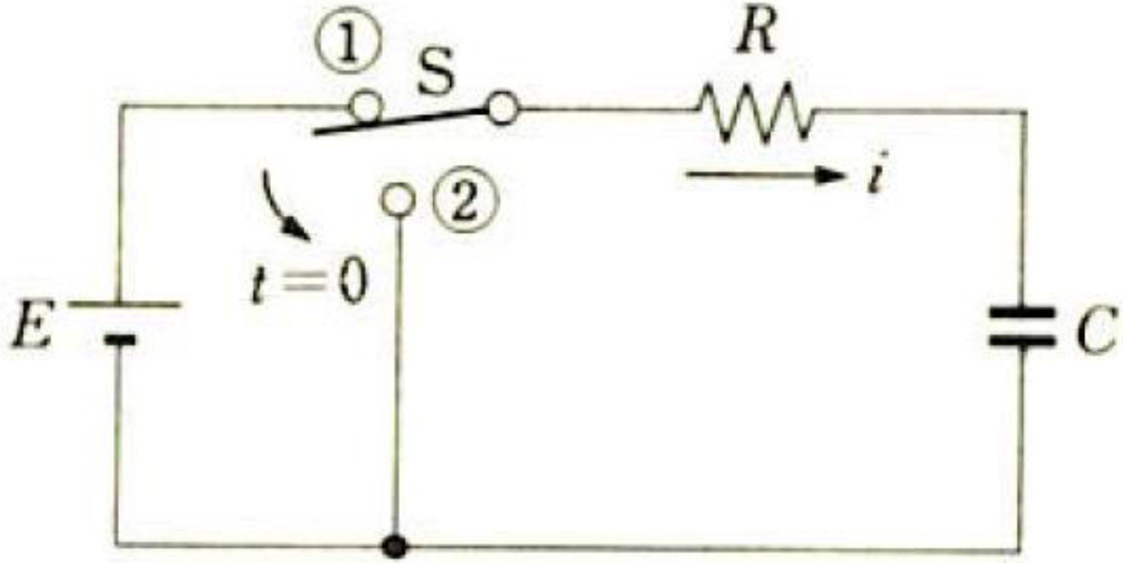



図7・8　R-C直列回路の短絡

〔2〕 **コンデンサの放電**

図7·8に示すように，$R$-$C$ 直列回路がある．スイッチSを初め①に入れておき，定常状態になった後，②側に投入したとすると次式が成立する．

$$0 = Ri + \frac{1}{C}\int i dt \tag{7・20}$$

$i$ の方向は充電であるから $i = dq/dt$ となり，式（7·20）は

$$0 = R\frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q \tag{7・21}$$

式（7·21）は式（7·8）と同形であるので

$$q = Ke^{-(1/RC)t} \tag{7・22}$$

となる．次に初期条件を考える．$t = 0-$ でコンデンサ $C$ のの端子電圧 $V_C$ は $E$，したがって，コンデンサ $C$ の電荷 $q_0$ は $t = 0-$ と $t = 0+$ では変化がないから，$t = 0$ で $q = CE$ となる．この初期条件を式（7·22）に入れて

$$K = CE \tag{7・23}$$

となるので，式（7·22）は

$$q = CEe^{-(1/RC)t} \tag{7・24}$$

となる．電荷 $q$ の時間的変化を図7·9に示す．

電流 $i$ の時間的変化は

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}\left(CEe^{-(1/RC)t}\right)$$

$$= CE\cdot\left(-\frac{1}{RC}\right)e^{-(1/RC)t} = -\frac{E}{R}e^{-(1/RC)t} \tag{7・25}$$

となる．放電電流 $i$ の符号が－になっているのは，充電時の電流の方向と逆向きになっているからである．放電電流 $i$ の時間的変化を図7·10に示す．

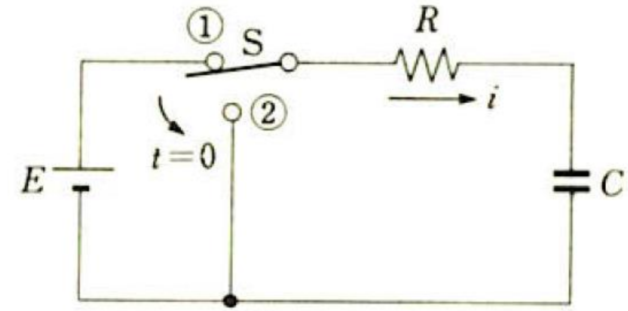
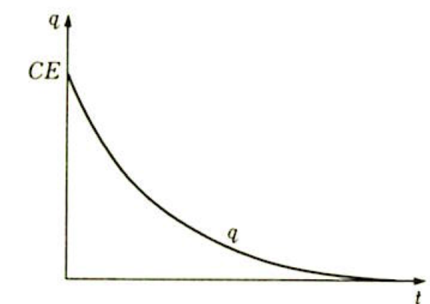
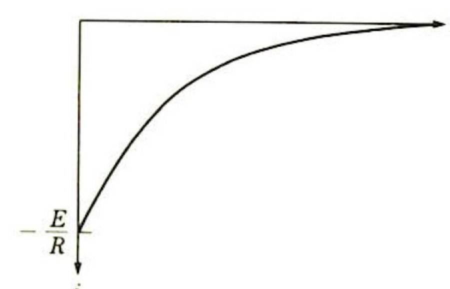



図7・8　$R$-$C$ 直列回路の短絡



**問題** 起電力 $E$ (実効値)、内部抵抗 $r$ の交流電源がある。以下の問いに答えよ。

(1) 図1のようにこの電源に負荷抵抗 $R$ を接続して最大の電力を取り出す（負荷抵抗で消費される電力を最大にする）には $R$ の値はいくらであればよいか。

（2）上問(1）の条件に合う負荷抵抗がなかったため、理想トランスを図2のように接続して最大の電力を取り出すことにした。トランスの巻線比 $N_2$ / $N_1$を $r$ および $R$ を用いて表せ。

(3) 上問(2)の条件のとき、負荷抵抗 R に流れる電流の実効値$I_e$を E 、R 、r を用いて表せ。

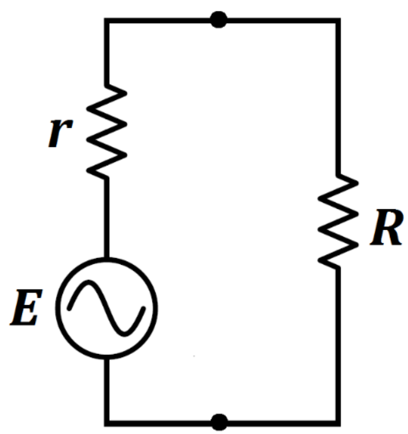


図1

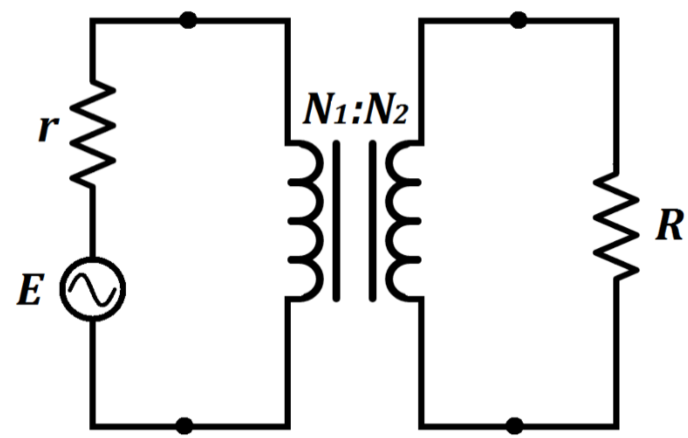


図2

電力が最大値になる条件を満たすために

$$P = VI = \frac{RE^2}{(r+R)^2} = \frac{E^2}{\left(\frac{r}{\sqrt{R}} + \sqrt{R}\right)^2}$$

$E$は実効値です

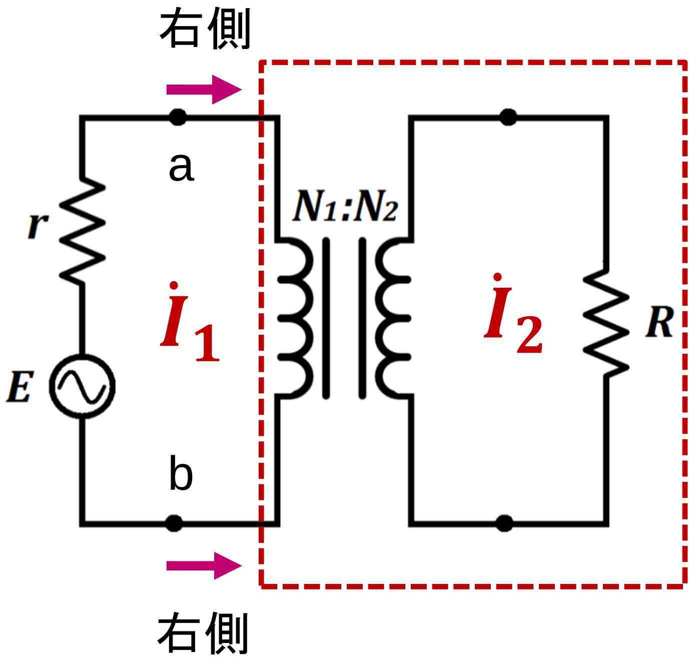
$P_{max}$になるというのは $T = \frac{r}{\sqrt{R}} + \sqrt{R}$ が最小になると等しいです

$$T = a + b \geq 2\sqrt{ab}$$

$T_{min} = 2\sqrt{r}$ から $R = r$になることがわかる

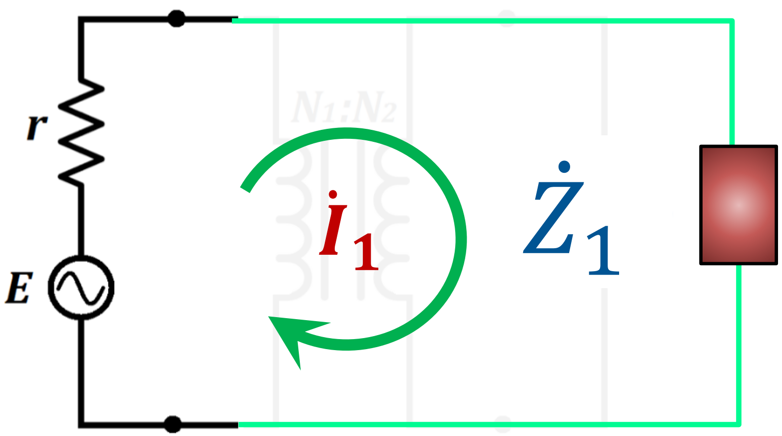
$$P_{max} = \frac{E^2}{4r}$$

# 1次側のab から見た右側の等価回路



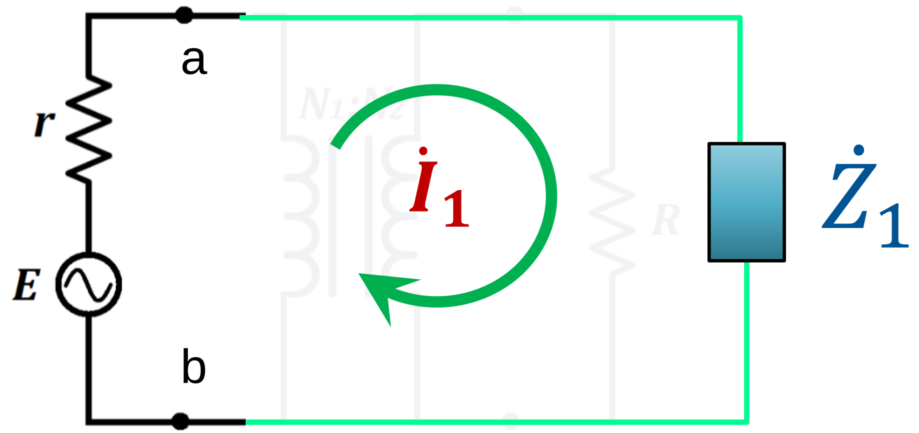

**最重要ポイント**

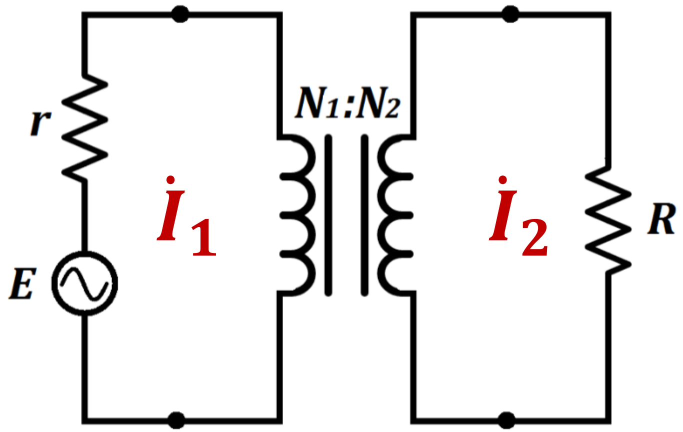
**等価回路を使って計算した電流$\dot{I}_1$は1次側の電流になる。**

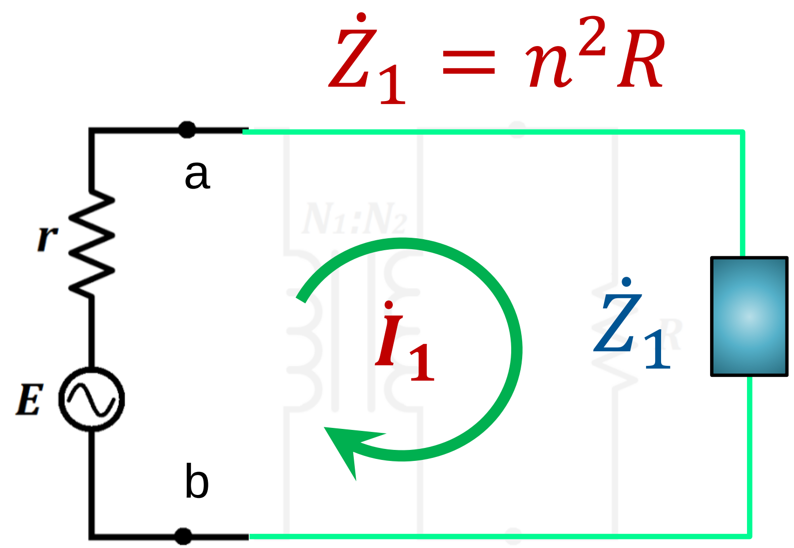



$\dot{Z}_1$ : 等価インピーダンス

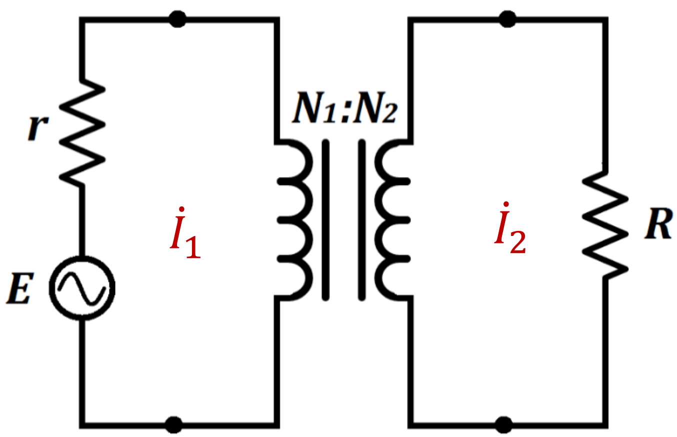
# 理想トランス等価回路における抵抗の関係式

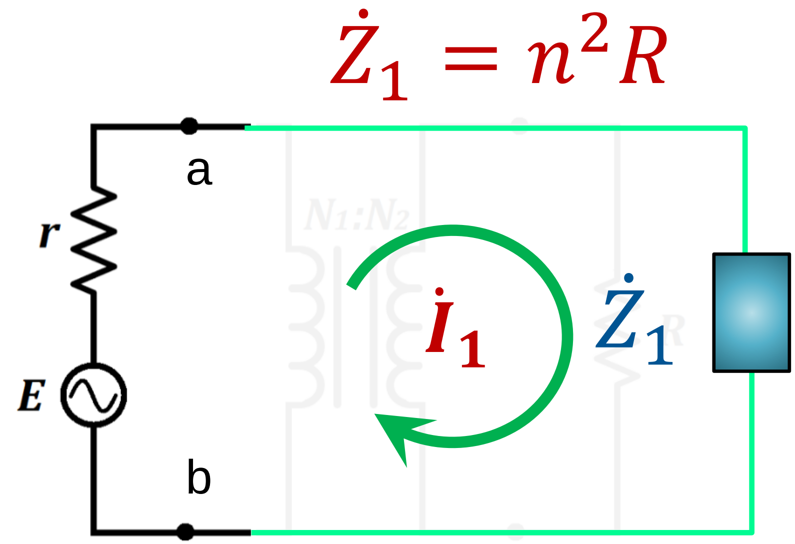


負荷Rにおける電力の計算：




$$\dot{I}_1 = \frac{E}{r + n^2 R}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{E}{r + n^2 R} * n$$

$$\dot{I}_2 = \frac{E}{r + \boldsymbol{n^2 R}} * n$$

$$P = \dot{I}_2{}^2 * R$$

$$P = \left(\frac{E}{r + \boldsymbol{n^2 R}} * n\right)^2 * R$$

$$P = \frac{n^2 R}{(r + \boldsymbol{n^2 R})^2} * E^2$$

$n^2 R$をS仮定すると

$$P = \frac{S}{(r+\boldsymbol{S})^2} * E^2 \Rightarrow P = \frac{S}{(\frac{r}{\sqrt{s}} + \sqrt{s})^2} * E^2$$

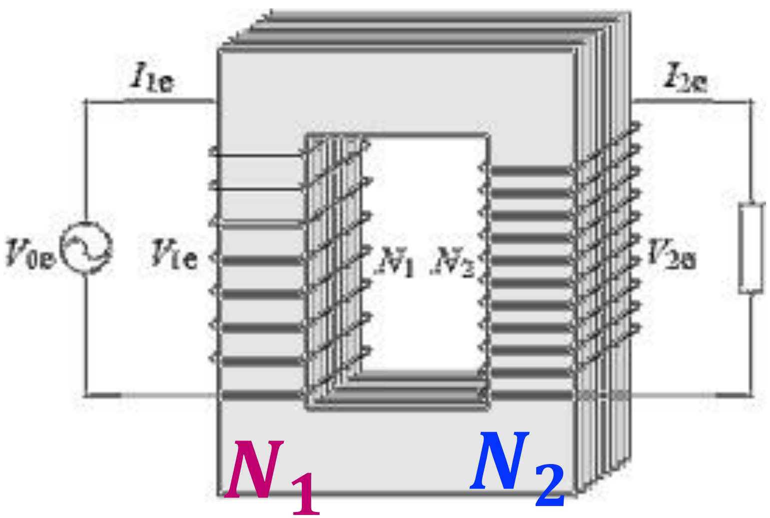
$P_{max}$になるというのは $T = \frac{r}{\sqrt{s}} + \sqrt{s}$ が最小になると等しいです

不等式定理:　$a + b \geq 2\sqrt{ab}$

$T_{min} = 2\sqrt{r}$ から　　$s = r$になることがわかる

$$n^2 R = r \qquad n = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

## 理想トランスにおける電流、電圧と巻数の関係式：



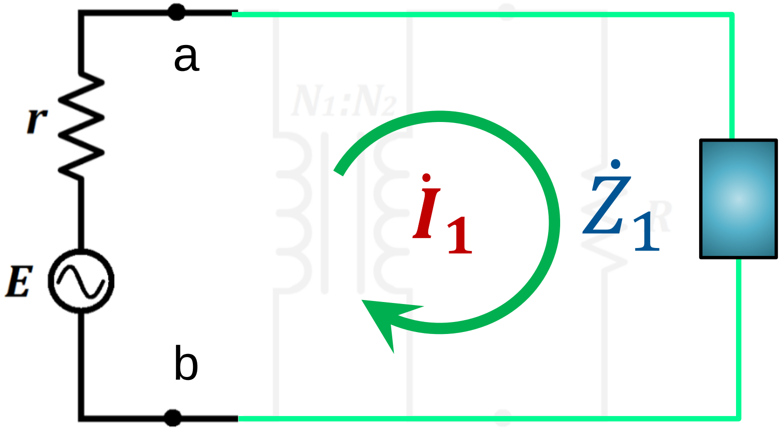

1 次側　　2次側

$$\frac{N_1}{N_2} = n$$

$$i_2 = n\, i_1$$

$$\dot{V}_1 = n\, \dot{V}_2$$

$$\dot{Z}_1 = n^2 R$$

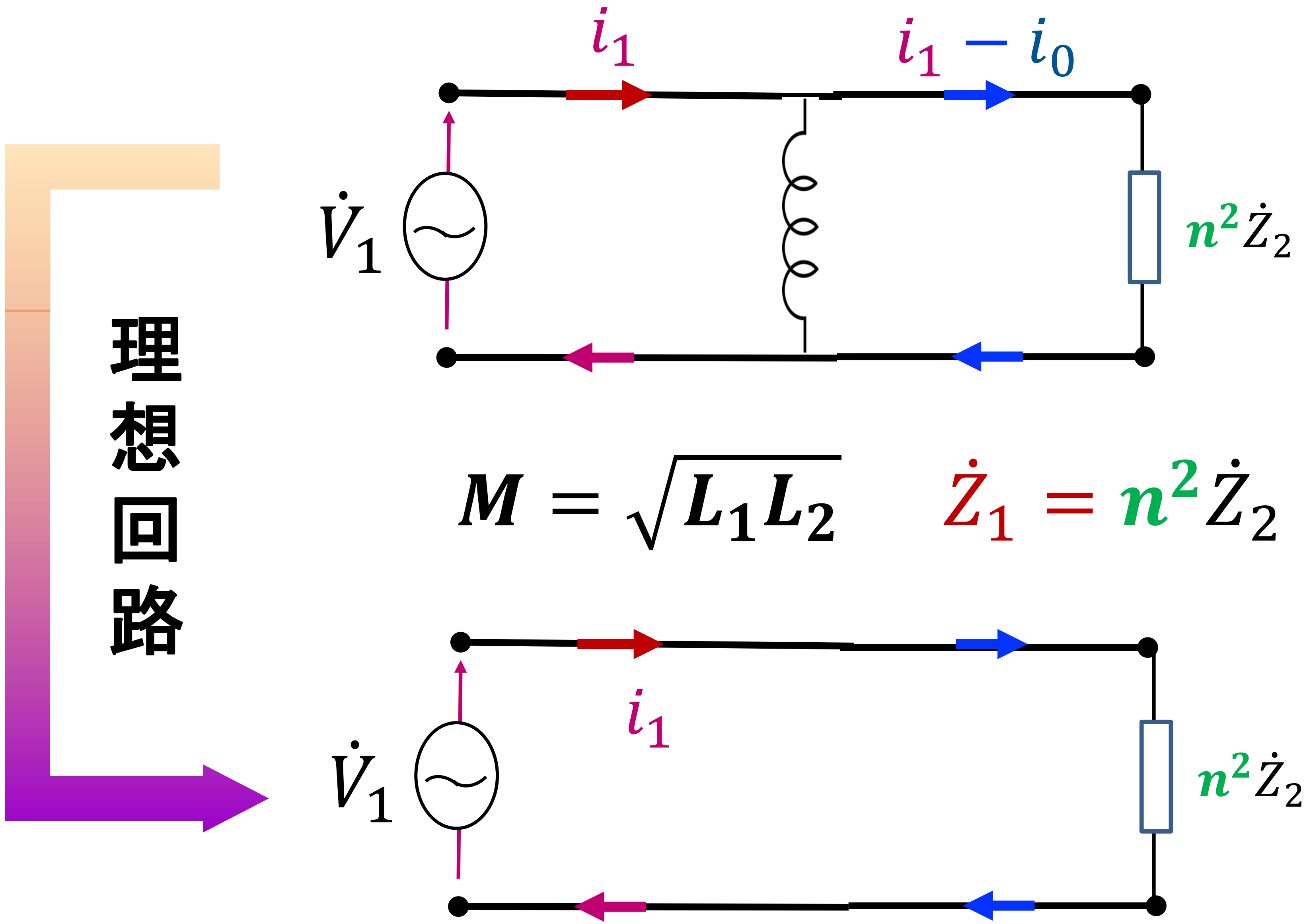



$$I_1 = \frac{E}{r + r} = \frac{E}{2r}$$

$$I_2 = nI_1$$

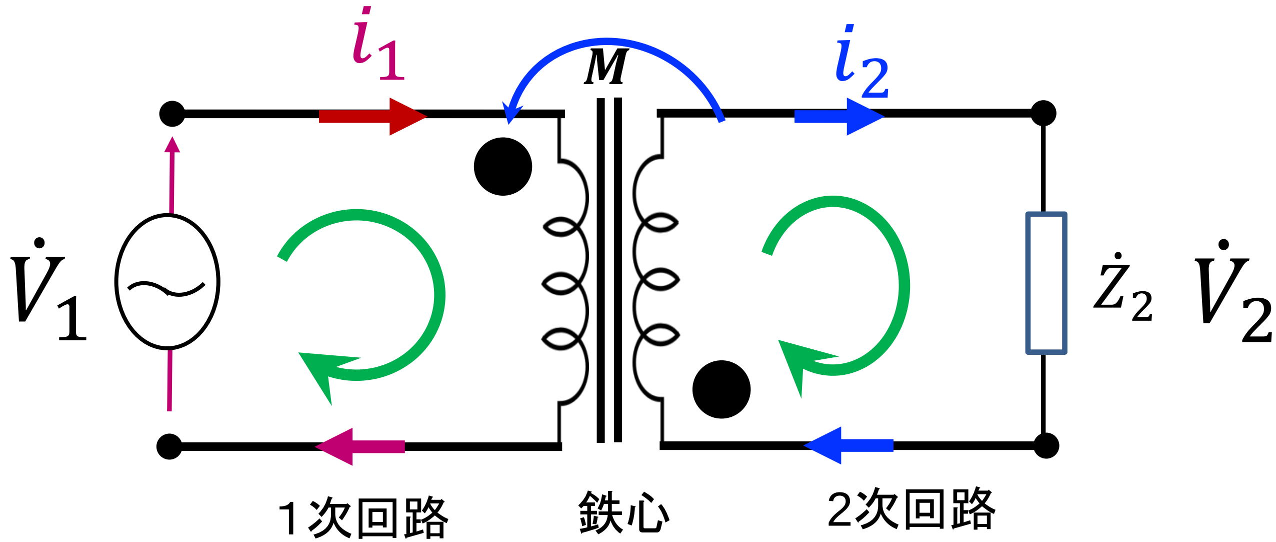
$$I_2 = \sqrt{\frac{\boldsymbol{r}}{\boldsymbol{R}}} * \frac{E}{2r} = \frac{E}{2}\sqrt{\frac{1}{\boldsymbol{Rr}}}$$

# 理想変圧器:




$$M = \sqrt{L_1 L_2} \qquad \dot{Z}_1 = n^2 \dot{Z}_2$$

# 変圧器結合回路：電流関係　　理想変圧器




$$\dot{Z}_1 = n^2 \dot{Z}_2$$

$$i_2 = \frac{\dot{V}_2}{\dot{Z}_2} = \frac{\frac{1}{n}\dot{V}_1}{\dot{Z}_2} = \frac{\frac{1}{n}\dot{V}_1}{\frac{1}{n^2}\dot{Z}_1} = n\, i_1$$

**図に示す理想変成器を含む回路について以下の**問いに答えよ。ただし、$r = 4[\Omega]$、$R = 4[\Omega]$, 交流電圧源 $E = 200e^{j0}[\mathrm{V}]$、巻数比$\mathrm{N_1}:\mathrm{N_2} = 2:1$とする。

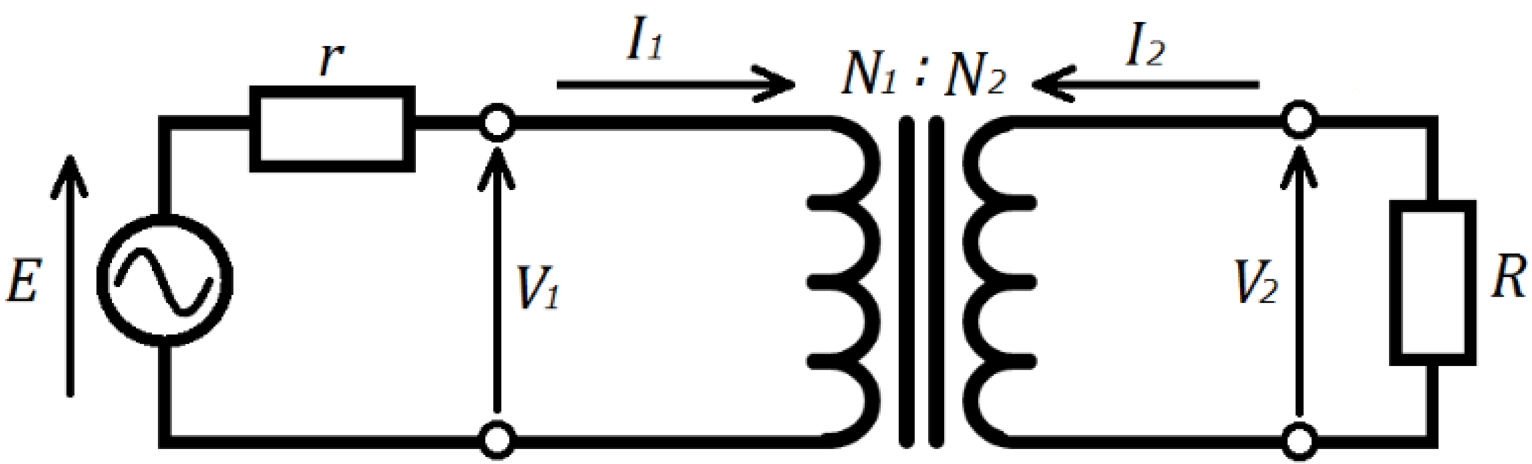
(1) 変成器１次側から見たインピーダンス $Z_1$ を求めよ。

(2) 電源から見たインピーダンス $Z_E$ を求めよ。

(3) １次側電流 $I_1$ と２次側電流 $I_2$ をそれぞれ求めよ。

(4) １次側電圧 $V_1$ と２次側電圧 $V_2$ をそれぞれ求めよ。

(5) 抵抗 $r$ および $R$ で消費される電力 $P_r$ および $P_R$ をそれぞれ求めよ。



# 解答

(1) １次側と2次側の電圧と電流の関係は以下の通りである。

ここで、巻数比 $N_1 : N_2 = 2 : 1$ より$1 : n = 2 : 1$ つまり $n = \dfrac{1}{2}$ となる。

したがって、１次側から見たインピーダンス $Z_1 = \dfrac{V_1}{I_1} = -\dfrac{1}{n^2}\dfrac{V_2}{I_2} = \dfrac{R}{n^2} = 4R$

$= 16$ [Ω]となる。

(2) 電源から見たインピーダンス $Z_E = r + Z_1 = 4 + 16 = 20$ [Ω]となる。

(3) 1次電流 $I_1 = {}^{E}/_{Z_E} = {}^{200}/_{20} = 10$ [Ω]、2次電流 $I_2 = -{}^{I_1}/_{n} = -2 \times 10$

$= -20$ [A]となる。

(4) １次電圧 $V_1 = Z_1 I_1 = 16 \times 10 = 160$ [V]、2次電流 $V_2 = nV_1 = {}^{1}/_{2} \times 160$

$= 80$ [V]となる。

(5) 抵抗 $r$ で消費される電力 $P_r = r|I_1|^2 = 4 \times 10^2 = 400$ [W]

また、抵抗 $R$ で消費される電力 $P_R = R|I_2|^2 = 4 \times 20^2 = 1600$ [W]となる。

問6：図の回路について以下の問いに答えよ。交流電源の起電力は＋記号がある方を正とする。また、$\mathrm{V_1} = 5\angle 0°$ [V]

$\mathrm{V_2} = 8\angle 90°$ [V]、$\mathrm{E} = \mathrm{E_0}\angle\alpha$ [V]であり、$\mathrm{Z_1} = 10$ [Ω]、$\mathrm{Z_2} = 15$ [Ω]、$\mathrm{Z_3} = 2$ [Ω]、$\mathrm{Z_4} = 2$ [Ω]とする。

(1) $C$点に対する$A$点の電位$V_{AC}$をフェーザ表示で答えよ。

(2) $B$点に対する$C$点の電位$V_{CB}$をフェーザ表示で答えよ。

(3) 図1の回路の等価回路を図2とするとき、Eおよび$\mathrm{Z_0}$を求めよ。また$\tan(\alpha)$の値も求めよ。

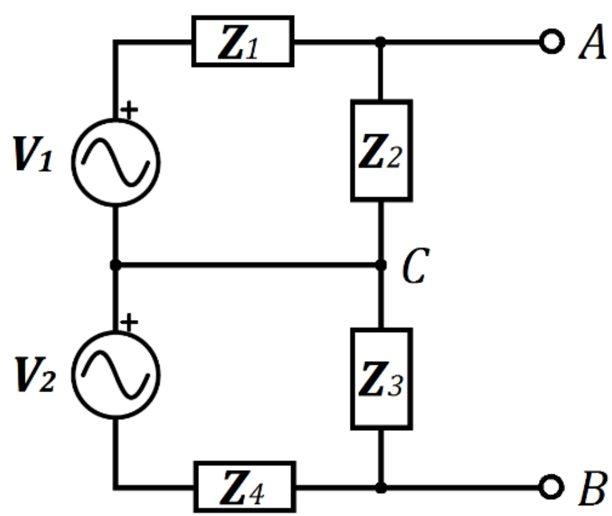



図1

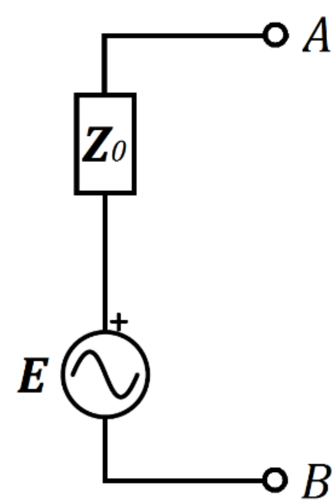
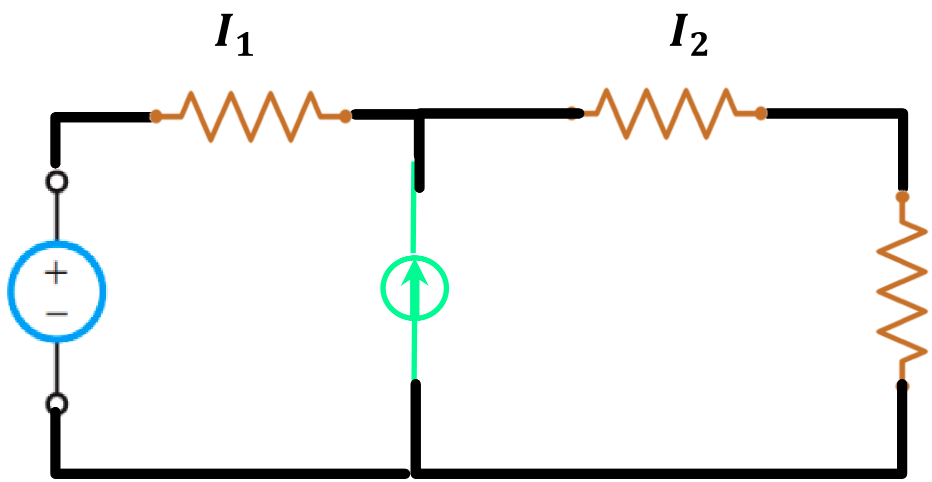



図2

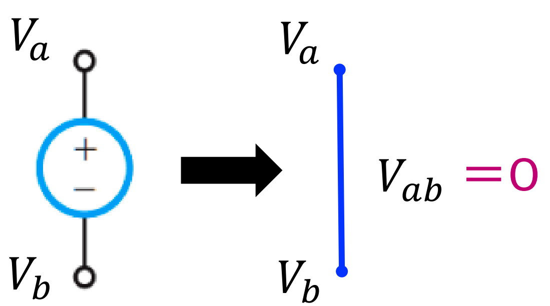
# 重ねの理(superposition theorem):

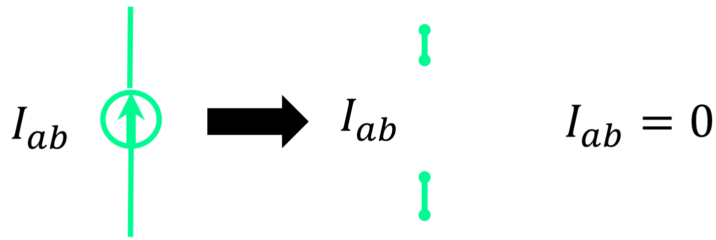



**電圧源 → 短絡状態**　　**電流源 → 開放状態**

電圧源を外す ➡ 電圧$V_{ab}$ ＝0

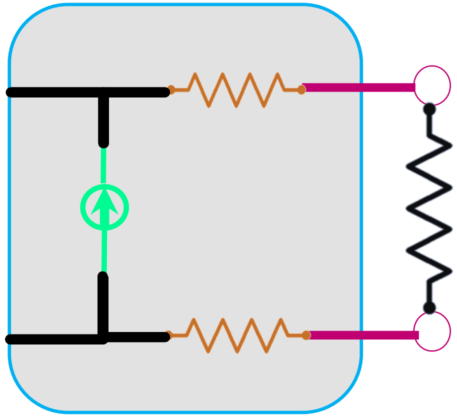
電流源を外す ➡ 電流$I_{ab}$ ＝0



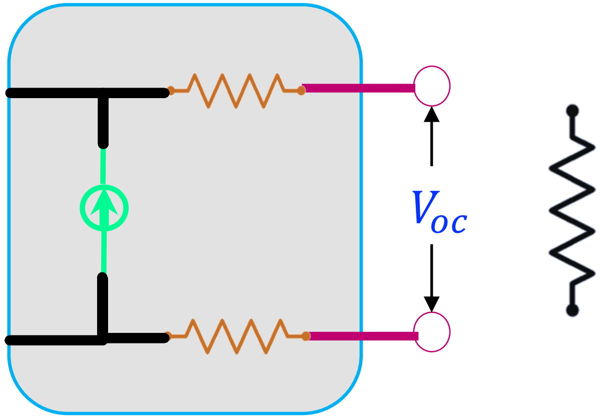
# テブナン等価回路:

## テブナン等価回路の$V_0$、$R_0$を求めるために



- 抵抗を回路から外す(もしあれば)、電源も回路から外す！外し方は重ねの理と同じです。

**等価抵抗$R_0$を計算する**

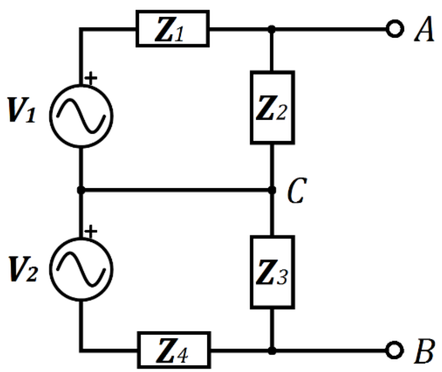


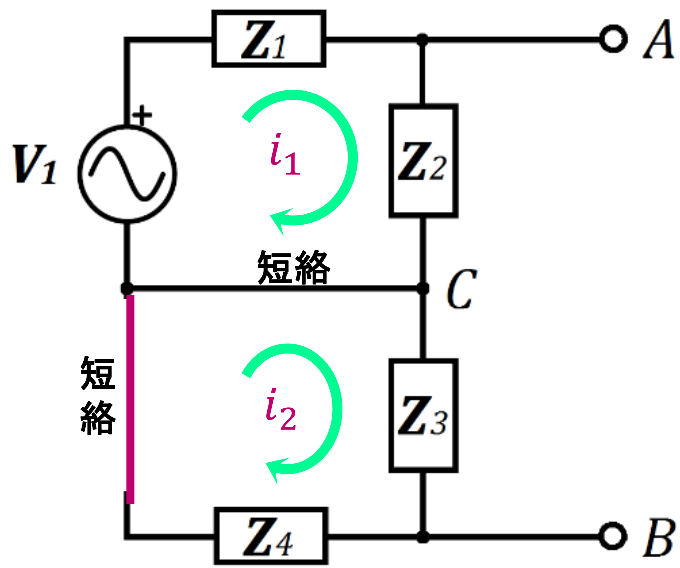

- 回路の出力端子間の電圧を計算する:

**等価電圧$V_0$を計算する**

計算方法はなんでもいい;節点解析、ループ解析、分圧、分流と電源変換等

(1) $V_2$ を短絡させ、$V_1$ だけを考える。閉回路に対するキルヒホッフの法則より、流れる電流を $i_1$ とすると、




Loop2において、$i_2 = 0$

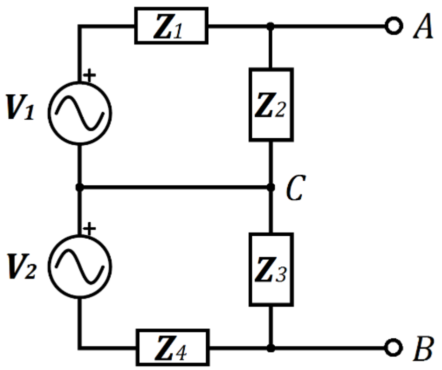
Loop1において、KVL法則

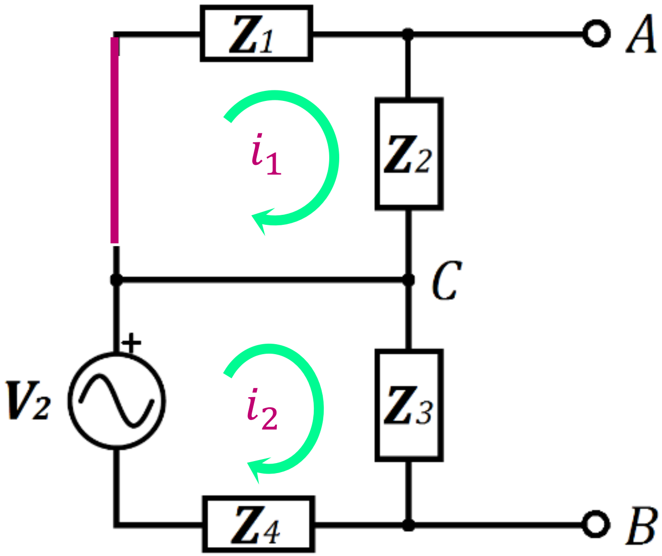
$$V_1 = (\,Z_1 + Z_2\,)\,i_1$$

$$i_1 = \frac{V_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{5\angle 0^\circ}{10 + 15} = \frac{1}{5}\angle 0^\circ$$

$$V_{AC} = Z_2\,i_1 = 3\angle 0^\circ$$

(1) $V_1$ を短絡させ、$V_1$ だけを考える。閉回路に対するキルヒホッフの法則より、流れる電流を $i_1$ とすると、



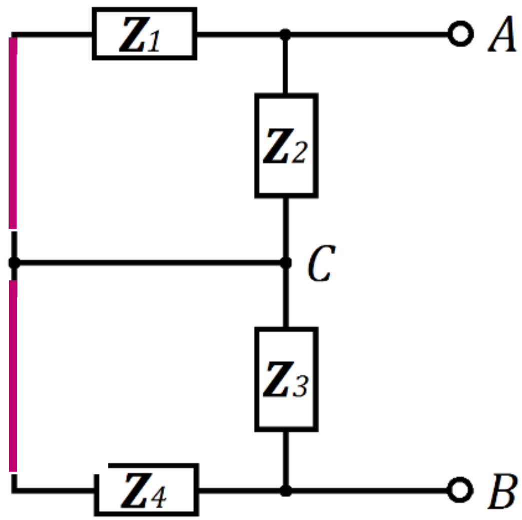

Loop1において、$i_2 = 0$

Loop2において、KVL法則

$$V_2 = (\,Z_3 + Z_4\,)\,i_2$$

$$i_2 = \frac{V_2}{Z_3 + Z_4} = \frac{8\angle 90°}{2+2} = 2\angle 90°$$

$$V_{CB} = Z_3\,i_2 = 4\angle 90°$$




$$V_{AB} = V_{AC} + V_{CB} = 3\angle 0° + 4\angle 90°$$

$$V_{AB} = 3 + j4 = 5\angle\alpha[\mathrm{V}]$$

ただし $\tan(\alpha) = \dfrac{4}{3}$

AB端子間の合成抵抗を考える。２つの電圧源を短絡させると、$Z_1$ と $Z_2$ の並列と $Z_3$ と $Z_4$ の並列の直列回路となる。したがって、AB端子間の合成抵抗 $Z_0$ は、

$$Z_0 = \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}\right)^{-1} + \left(\frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}\right)^{-1} = 7[\Omega]$$