

電験どうでしょう管理人
KWG presents

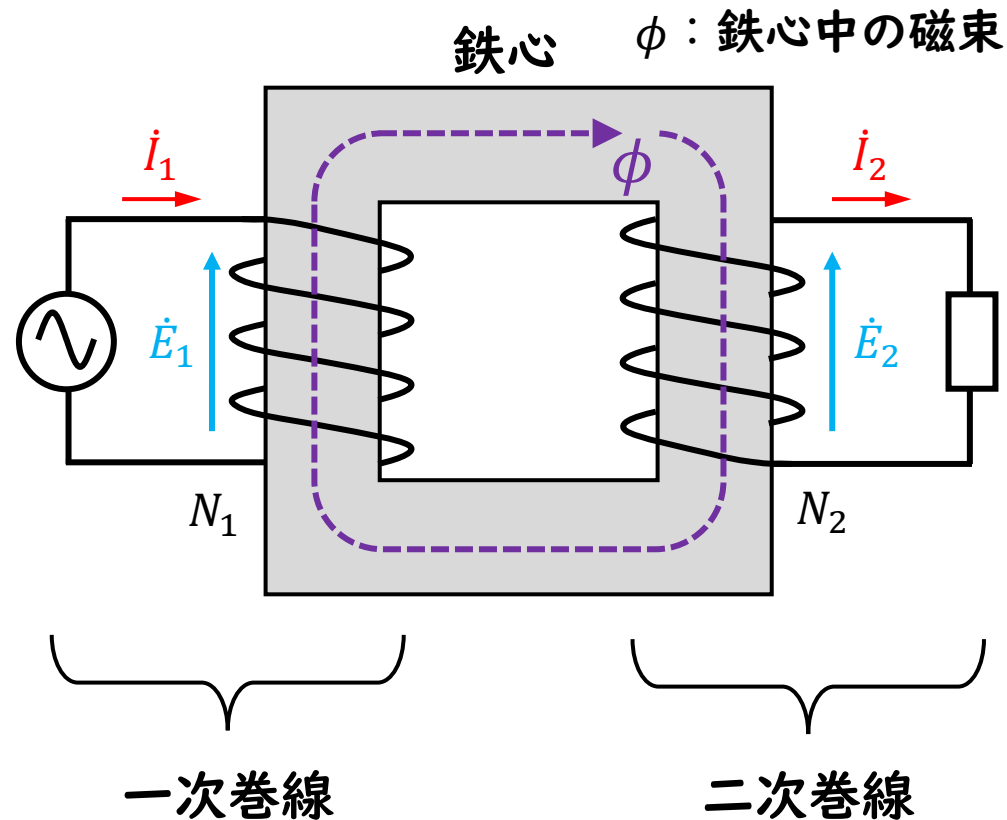
電験オンライン塾

第2回 変圧器

~損失と効率~

2022.01.29 Sat

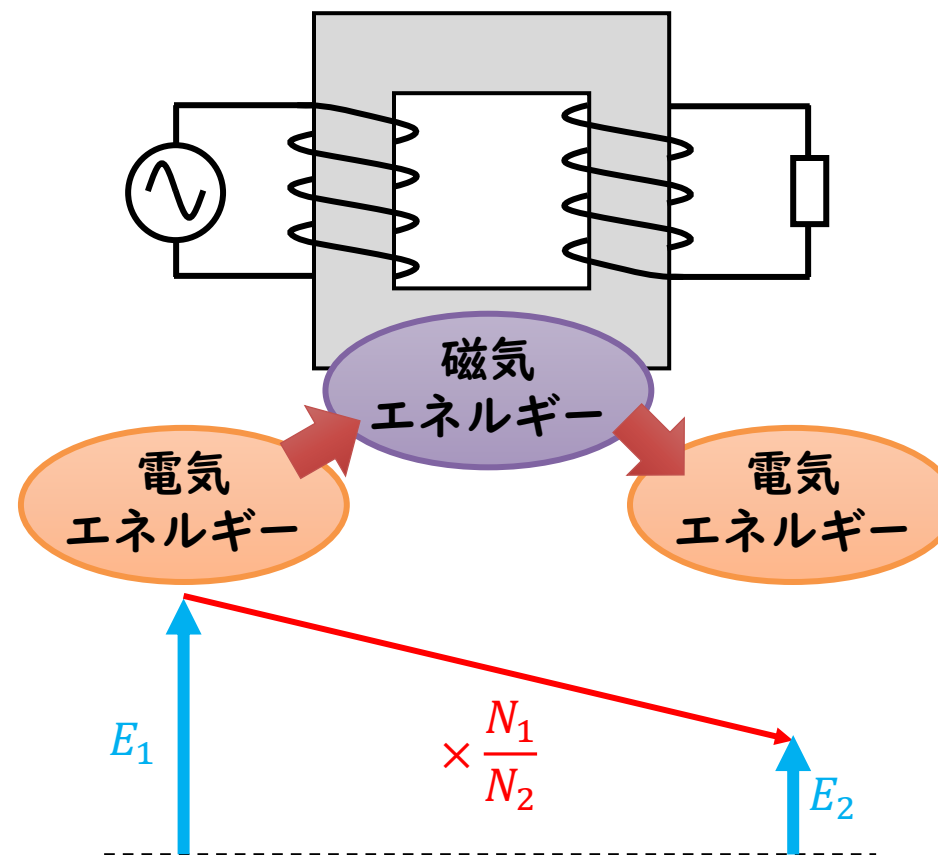
変圧器の基本特性



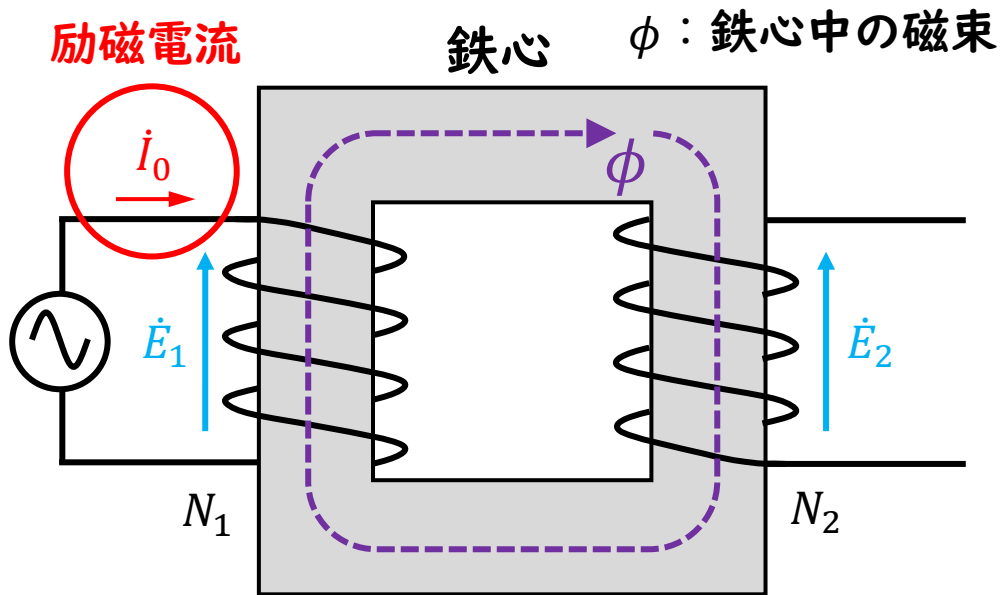
N_1 : 一次巻線の巻数
 E_1 : 一次側電圧
 I_1 : 一次側電流

N_2 : 二次巻線の巻数
 E_2 : 二次側電圧
 I_2 : 二次側電流

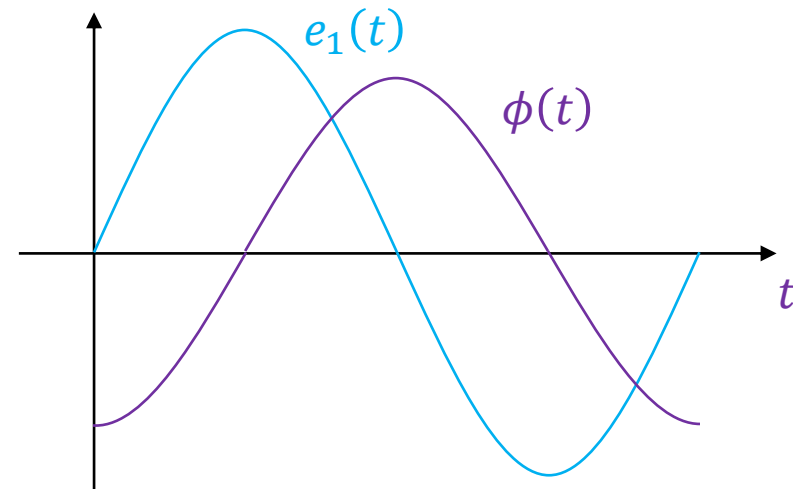
変圧器とは、
 電磁誘導を利用して交流電圧の電圧の大きさを
 変換する電気機器



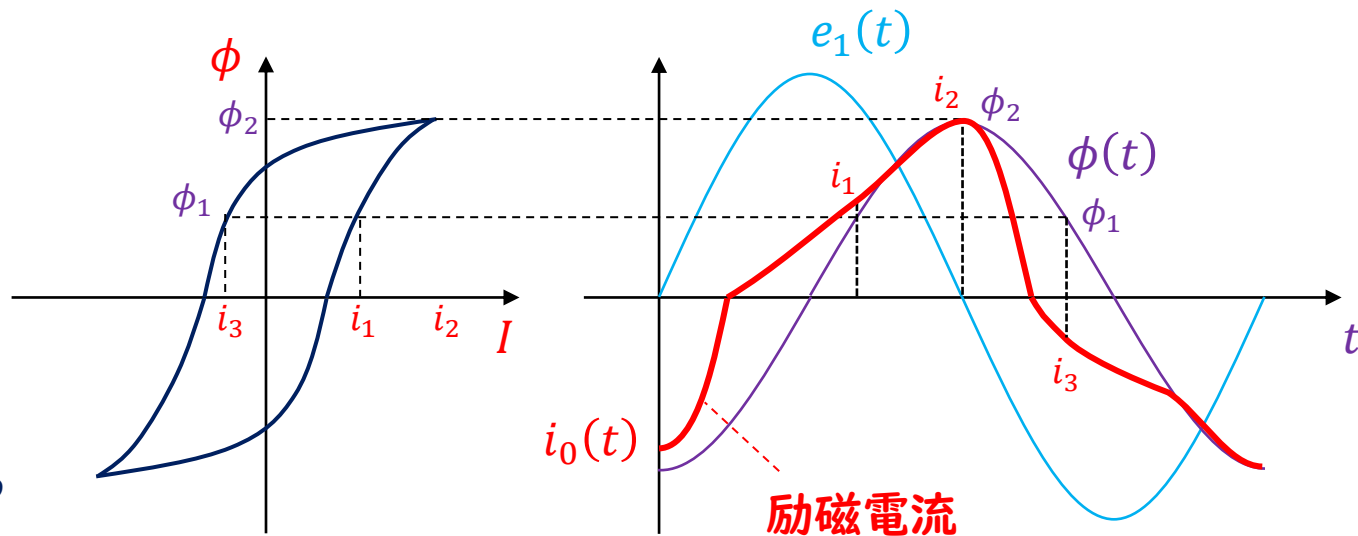
変圧器の無負荷特性



<一次側電圧と磁束の関係>



<磁束と電流の関係>
 $B-H$ 曲線 \rightarrow $\phi-I$ 曲線



二次側の負荷を開放しても一次側に電流が流れる

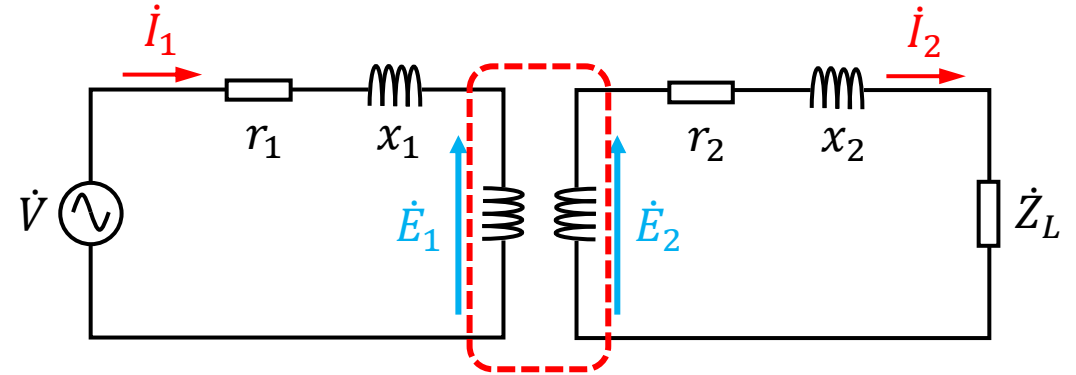
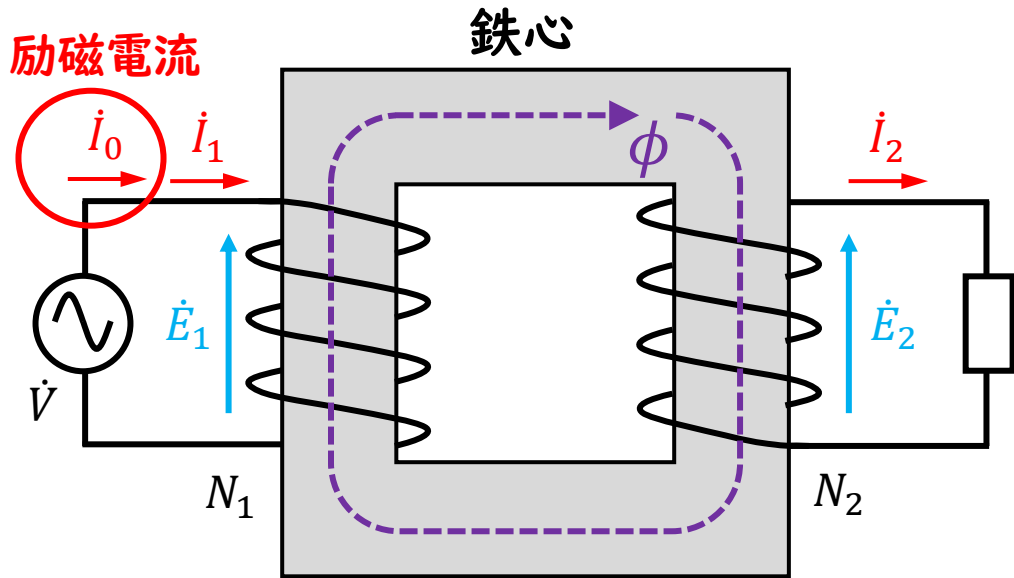
\rightarrow 励磁電流 (無負荷電流)

\rightarrow 磁荷電流: 磁束を作るための電流

\rightarrow 損失電流: 鉄心中で熱 (鉄損) になる電流

$$H = \frac{I}{2\pi r} \rightarrow H \propto I, B = \frac{\phi}{S} \rightarrow B \propto \phi$$

励磁電流を含む変圧器の等価回路



<変圧器の簡易等価回路>

負荷を接続すると、一次側に以下の電流が流れる

- 一次電流 i_1 : 負荷に電力を供給するため
- 励磁電流 i_0 : 鉄心に磁気エネルギーを蓄えるため

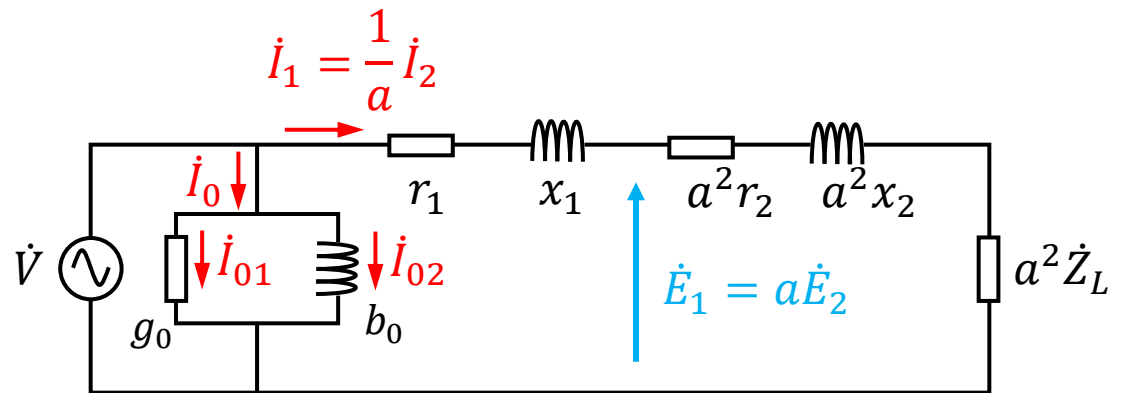
励磁電流は

- 鉄損電流 i_{01} : 電気から磁気の変換で熱になる電流

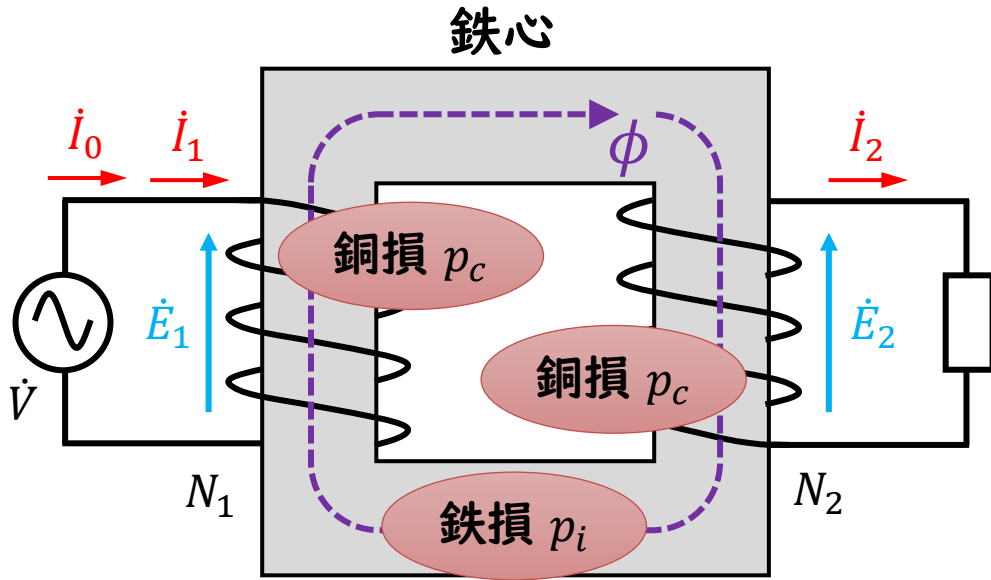
$$i_{01} = g_0 \dot{V}$$

- 磁化電流 i_{02} : 磁束を作るための電流

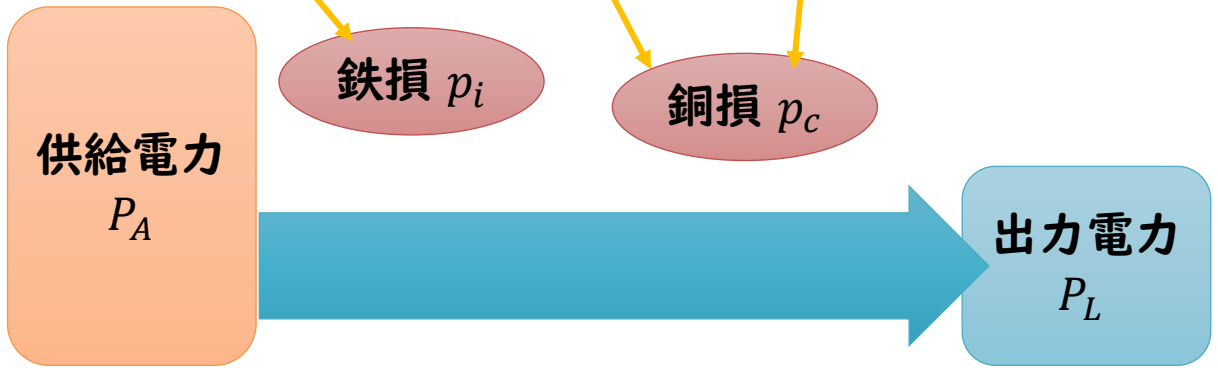
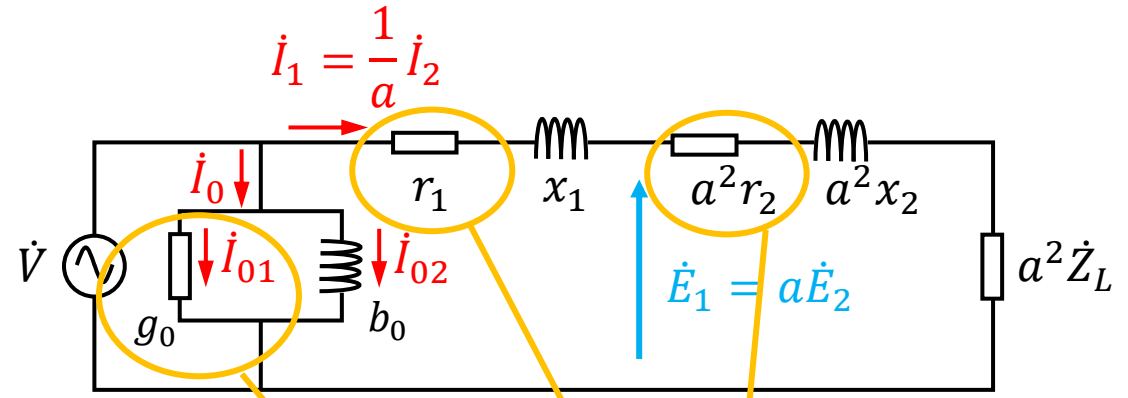
$$i_{02} = -jb_0 \dot{V}$$



変圧器の電力と効率



<変圧器の簡易等価回路>



電気回路の要素	一次側	二次側
電力	1	1
電圧	a	1
電流	$1/a$	1
一次側からみた二次側負荷	a^2	1

電源から負荷へ全ての電力が伝わらず一部の電力が損失となる
 鉄損：鉄心部分で発生する損失（電流によらず無負荷でも発生）
 銅損：巻線部分で発生する損失（巻線電流の2乗に比例）

変圧器の電力と効率

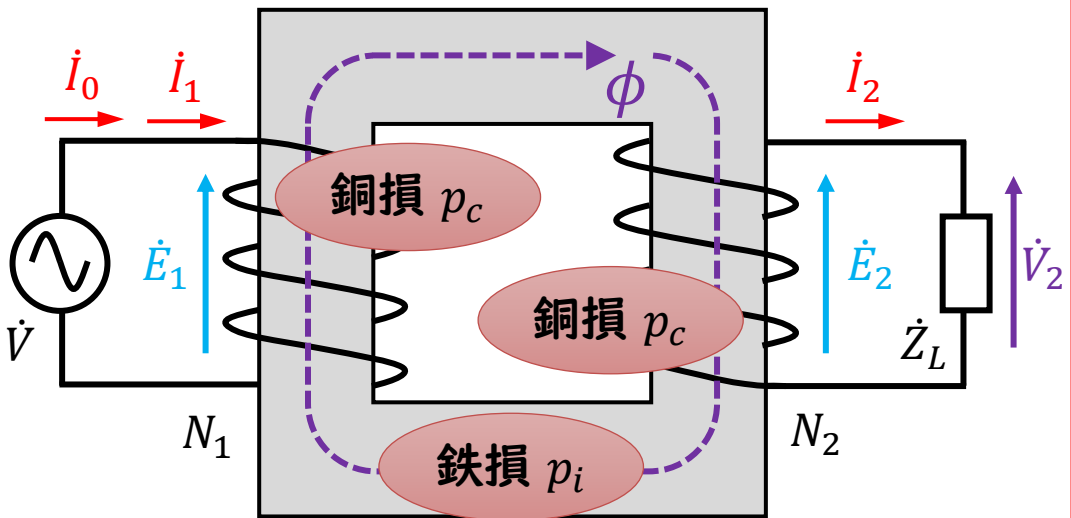
供給電力

$$P_A \text{ [VA]}$$

出力電力

$$P_L \text{ [VA]}$$

鉄心



<変圧器の効率>

$$\eta [\%] = \frac{P_L}{P_A} \times 100 = \frac{P_n \cos\theta}{P_n \cos\theta + p_i + p_{cn}} \times 100$$

\$P_n\$: 定格出力 [kVA]
 \$\cos\theta\$: 負荷の力率
 \$p_i\$: 鉄損 (無負荷損)
 \$p_{cn}\$: 定格時の銅損

出力が定格の \$\alpha\$ 倍のとき (\$\alpha\$: 負荷率)

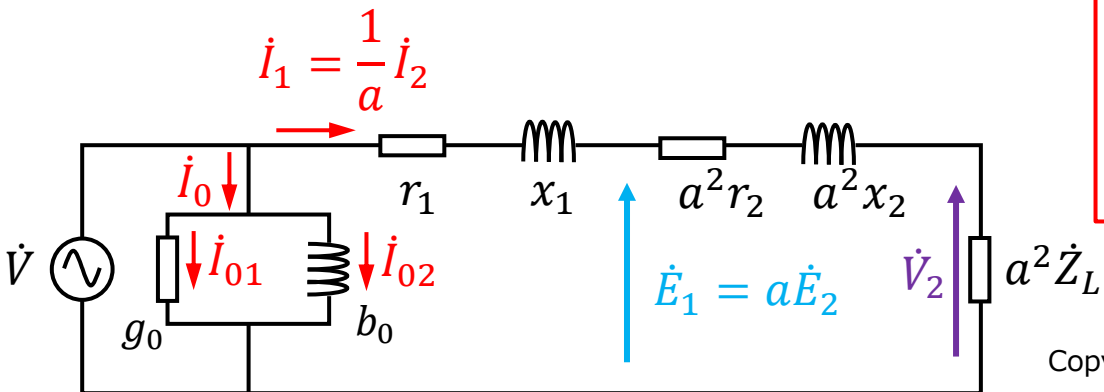
$$\eta [\%] = \frac{\alpha P_n \cos\theta}{\alpha P_n \cos\theta + p_i + \alpha^2 p_{cn}} \times 100$$

$$\begin{aligned} P_B &= V_2 I_2 = V_2 (\alpha I_n) = \alpha P_n \\ p_c &= (r_1 + a^2 r_2) I_2^2 \\ &= (r_1 + a^2 r_2) (\alpha I_n)^2 \\ &= \alpha (r_1 + a^2 r_2) I_n^2 = \alpha^2 p_{cn} \end{aligned}$$

最大効率時は \$p_i = p_c\$ が成り立つ

銅損は負荷率の2乗に比例

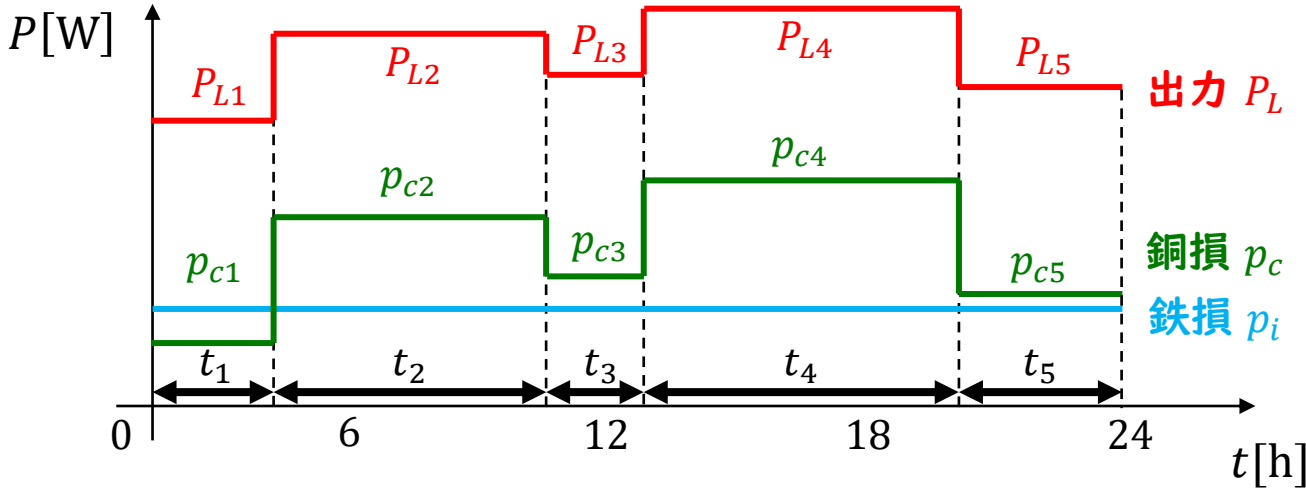
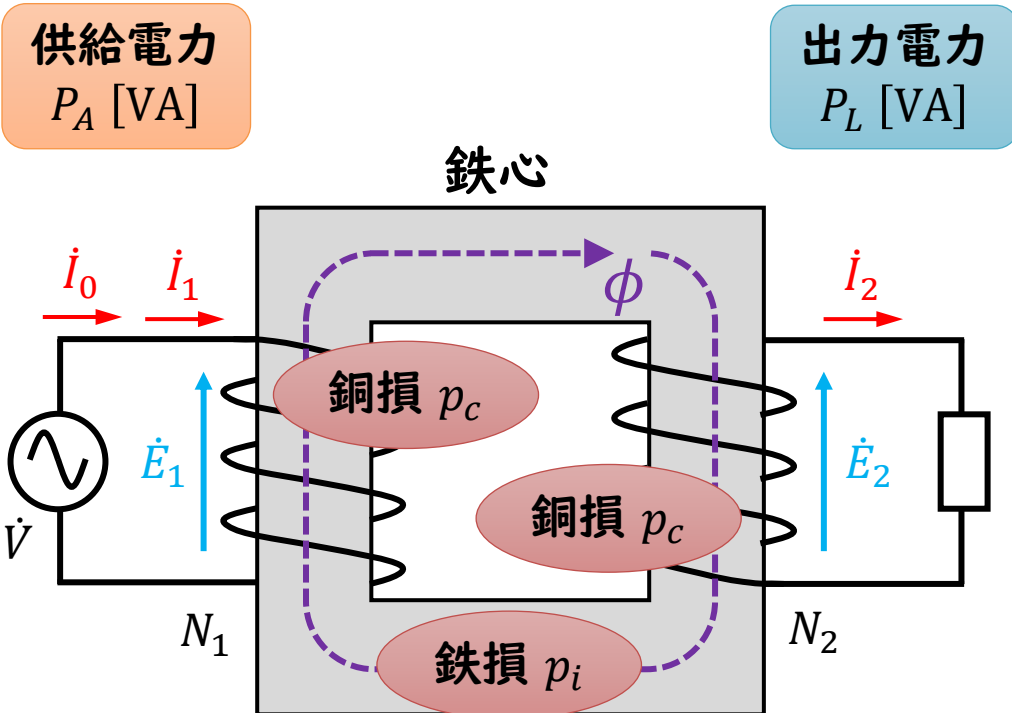
<変圧器の簡易等価回路>



$$p_i = p_c = \alpha'^2 p_{cn} \rightarrow \alpha' = \sqrt{\frac{p_i}{p_{cn}}}$$

$$\eta' [\%] = \frac{\alpha' P_n \cos\theta}{\alpha' P_n \cos\theta + 2p_i} \times 100 = \frac{P_n \cos\theta}{P_n \cos\theta + \frac{p_i}{\alpha'} + \alpha' p_{cn}} \times 100$$

変圧器の電力と負荷率



鉄損：鉄心部分で発生する損失
(電流によらず無負荷でも発生)

銅損：巻線部分で発生する損失
(巻線電流の2乗に比例)

<全日負荷率>

$$\eta_d [\%] = \frac{\text{1日中の出力電力量}}{\text{1日中の入力電力量}} \times 100$$

$$= \frac{P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots}{P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots + P_{c1}t_1 + P_{c2}t_2 + \dots + p_i \times 24} \times 100$$

<日負荷率>

$$\eta_{ave} [\%] = \frac{\text{1日の平均出力電力}}{\text{1日の最大出力(需要)電力}} \times 100$$

$$= \frac{(P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots) / 24}{P_{Lmax}} \times 100$$

機械 H29 問8

問8 定格容量 $50 \text{ kV}\cdot\text{A}$ の単相変圧器において、力率1の負荷で全負荷運転したときに、銅損が 1000 W 、鉄損が 250 W となった。力率1を維持したまま負荷を調整し、最大効率となる条件で運転した。銅損と鉄損以外の損失は無視できるものとし、この最大効率となる条件での効率の値[%]として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 95.2 (2) 96.0 (3) 97.6 (4) 98.0 (5) 99.0

導出のポイント

問 8 定格容量 50 kV・A の単相変圧器において、力率 1 の負荷で全負荷運転したときに、銅損が 1000 W、鉄損が 250 W となった。力率 1 を維持したまま負荷を調整し、最大効率となる条件で運転した。銅損と鉄損以外の損失は無視できるものとし、この最大効率となる条件での効率の値[%]として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

定格出力： $P_n = 50 \text{ kVA}$

負荷の力率： $\cos\theta = 1$

鉄損（無負荷損）： $p_i = 250 \text{ W}$

定格時の銅損： $p_{cn} = 1000 \text{ W}$

最大効率時は $p_i = p_c$ が成り立つ

$$p_i = p_c = \alpha'^2 p_{cn} \rightarrow \alpha' = \sqrt{\frac{p_i}{p_{cn}}} = \sqrt{\frac{250}{1000}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = 0.5$$

$$\eta' [\%] = \frac{\alpha' P_n \cos\theta}{\alpha' P_n \cos\theta + 2p_i} \times 100 = \frac{0.5 \times 50000 \times 1}{0.5 \times 50000 \times 1 + 2 \times 250} \times 100 = 98.0 \%$$

機械 H29 問8

問8 定格容量 $50 \text{ kV}\cdot\text{A}$ の単相変圧器において、力率1の負荷で全負荷運転したときに、銅損が 1000 W 、鉄損が 250 W となった。力率1を維持したまま負荷を調整し、最大効率となる条件で運転した。銅損と鉄損以外の損失は無視できるものとし、この最大効率となる条件での効率の値[%]として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 95.2 (2) 96.0 (3) 97.6 (4) 98.0 (5) 99.0

機械 H23 問7

問7 次の文章は、変圧器の損失と効率に関する記述である。

電圧一定で出力を変化させても、出力一定で電圧を変化させても、変圧器の効率の最大は鉄損と銅損とが等しいときに生じる。ただし、変圧器の損失は鉄損と銅損だけとし、負荷の力率は一定とする。

- a. 出力 1 000 [W] で運転している単相変圧器において鉄損が 40.0 [W] , 銅損が 40.0 [W] 発生している場合、変圧器の効率は [%] である。
- b. 出力電圧一定で出力を 500 [W] に下げた場合の鉄損は 40.0 [W] , 銅損は [W] , 効率は [%] となる。
- c. 出力電圧が 20 [%] 低下した状態で、出力 1 000 [W] の運転をしたとすると鉄損は 25.6 [W] , 銅損は [W] , 効率は [%] となる。ただし、鉄損は電圧の 2 乗に比例するものとする。

上記の記述中の空白箇所(ア), (イ), (ウ), (エ)及び(オ)に当てはまる最も近い数値の組合せを、次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1)	94	20.0	89	61.5	91
(2)	93	10.0	91	62.5	92
(3)	94	20.0	89	63.5	91
(4)	93	10.0	91	50.0	93
(5)	92	20.0	89	61.5	91

導出のポイント

- a. 出力 1000 [W] で運転している単相変圧器において鉄損が 40.0 [W] , 銅損が 40.0 [W] 発生している場合, 変圧器の効率は [%] である。

$$\eta [\%] = \frac{P_n \cos\theta}{P_n \cos\theta + p_i + p_{cn}} \times 100 = \frac{1000}{1000 + 40 + 40} \times 100 = 92.6 \sim 93 \%$$

- b. 出力電圧一定で出力を 500 [W] に下げた場合の鉄損は 40.0 [W] , 銅損は [W], 効率は [%] となる。

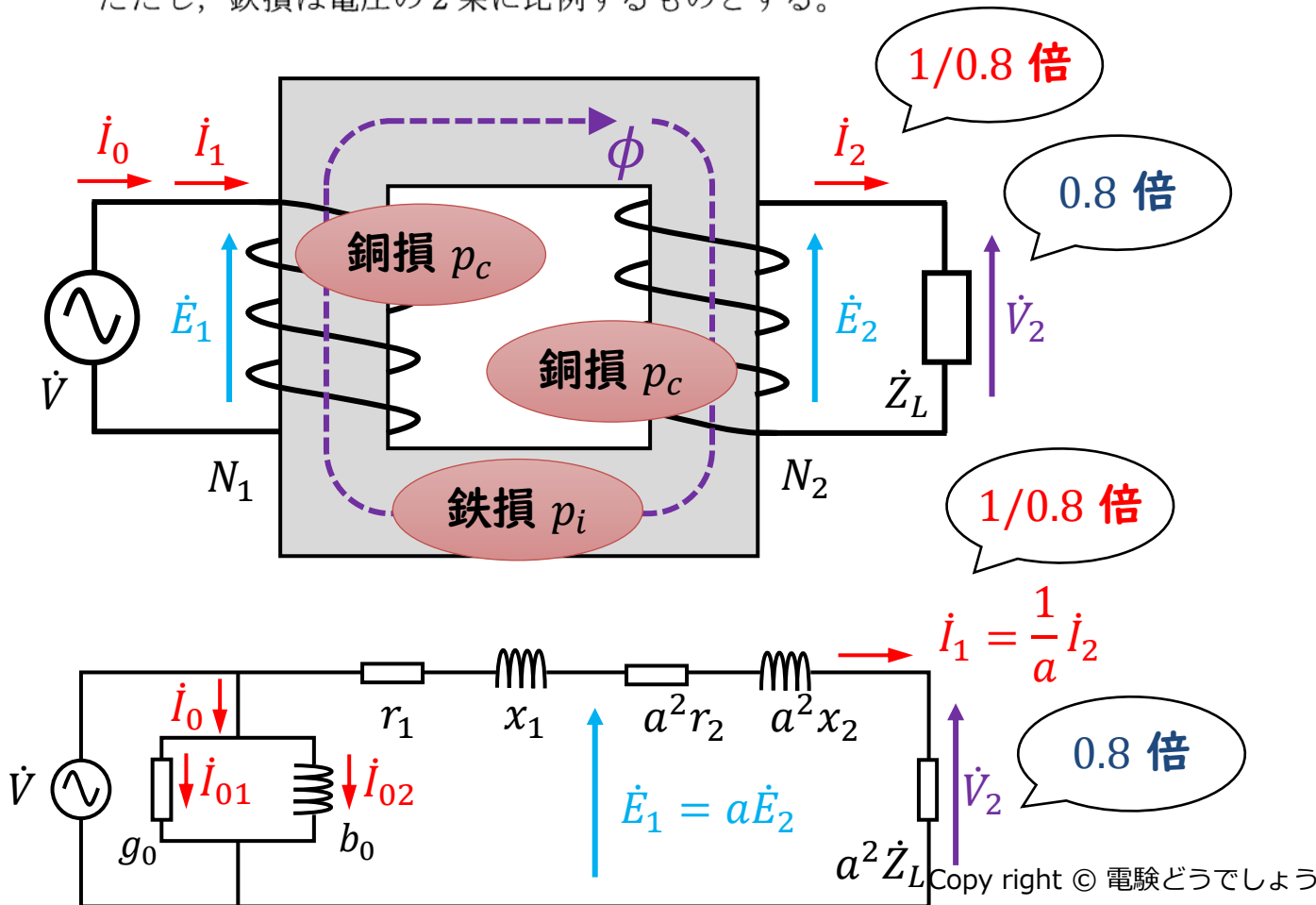
負荷率 α を求める

$$\alpha P_n = 500 \text{ W} \rightarrow \alpha = \frac{500}{1000} = 0.5$$

$$\eta [\%] = \frac{\alpha P_n \cos\theta}{\alpha P_n \cos\theta + p_i + \alpha^2 p_{cn}} \times 100 = \frac{500}{500 + 40 + 0.5^2 \times 40} \times 100 = 90.9 \sim 91 \%$$

導出のポイント

c. 出力電圧が 20 [%] 低下した状態で、出力 1000 [W] の運転をしたとすると鉄損は 25.6 [W]、銅損は [W]、効率は [%] となる。ただし、鉄損は電圧の 2 乗に比例するものとする。



出力電圧 V_2 が 20 % 低下 $\rightarrow 0.8$ 倍

$$P_L = V_2 I_2 \text{ より出力電流 } I_2 \text{ は } \frac{1}{0.8} = 1.25 \text{ 倍}$$

銅損は電流の 2 乗に比例

$$p'_c = 1.25^2 p_c = 1.25^2 \times 40 = 62.5 \text{ W}$$

鉄損は電圧の 2 乗に比例 (問題文より)

$$p'_i = 0.8^2 p_i = 0.8^2 \times 40 = 25.6 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \eta [\%] &= \frac{P_n \cos \theta}{P_n \cos \theta + p'_i + p'_{cn}} \times 100 \\ &= \frac{1000}{1000 + 25.6 + 62.5} \times 100 \\ &= 91.9 \sim 92 \% \end{aligned}$$

機械 H23 問7

問7 次の文章は、変圧器の損失と効率に関する記述である。

電圧一定で出力を変化させても、出力一定で電圧を変化させても、変圧器の効率の最大は鉄損と銅損とが等しいときに生じる。ただし、変圧器の損失は鉄損と銅損だけとし、負荷の力率は一定とする。

- a. 出力 1 000 [W] で運転している単相変圧器において鉄損が 40.0 [W] , 銅損が 40.0 [W] 発生している場合、変圧器の効率は [%] である。
- b. 出力電圧一定で出力を 500 [W] に下げた場合の鉄損は 40.0 [W] , 銅損は [W] , 効率は [%] となる。
- c. 出力電圧が 20 [%] 低下した状態で、出力 1 000 [W] の運転をしたとすると鉄損は 25.6 [W] , 銅損は [W] , 効率は [%] となる。
ただし、鉄損は電圧の 2 乗に比例するものとする。

上記の記述中の空白箇所(ア), (イ), (ウ), (エ)及び(オ)に当てはまる最も近い数値の組合せを、次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1)	94	20.0	89	61.5	91
(2)	93	10.0	91	62.5	92
(3)	94	20.0	89	63.5	91
(4)	93	10.0	91	50.0	93
(5)	92	20.0	89	61.5	91

機械 R03 問15

問 15 定格容量が $10 \text{ kV}\cdot\text{A}$ で、全負荷における銅損と鉄損の比が $2 : 1$ の単相変圧器がある。力率 1.0 の全負荷における効率が 97% であるとき、次の(a)及び(b)の問に答えよ。ただし、定格容量とは出力側で見る値であり、鉄損と銅損以外の損失は全て無視するものとする。

(a) 全負荷における銅損は何[W]になるか、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 357 (2) 206 (3) 200 (4) 119 (5) 115

(b) 負荷の電圧と力率が一定のまま負荷を変化させた。このとき、変圧器の効率が最大となる負荷は全負荷の何[%]か、最も近いものを(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 25.0 (2) 50.0 (3) 70.7 (4) 100 (5) 141

導出のポイント

問 15 定格容量が $10 \text{ kV}\cdot\text{A}$ で、全負荷における銅損と鉄損の比が $2 : 1$ の単相変圧器がある。力率 1.0 の全負荷における効率が 97% であるとき、次の(a)及び(b)の問に答えよ。ただし、定格容量とは出力側で見る値であり、鉄損と銅損以外の損失は全て無視するものとする。

(a) 全負荷における銅損は何[W]になるか、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

銅損 p_{cn} と鉄損 p_i の関係

$$p_{cn} : p_i = 2 : 1 \rightarrow p_{cn} = 2p_i$$

$$\begin{aligned} \eta [\%] &= \frac{P_n \cos\theta}{P_n \cos\theta + p_i + p_{cn}} \times 100 \\ &= \frac{10000 \times 1}{10000 \times 1 + p_i + 2p_i} \times 100 = 97 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{10000}{10000 + 3p_i} \times 100 &= 97 \\ \frac{10000}{10000 + 3p_i} &= 0.97 \\ \frac{10000}{0.97} &= 10000 + 3p_i \\ p_i &= \frac{1}{3} \left(\frac{10000}{0.97} - 10000 \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_i &= 103 \text{ W} \\ p_{cn} &= 2p_i = 206 \text{ W} \end{aligned}$$

導出のポイント

問 15 定格容量が $10 \text{ kV}\cdot\text{A}$ で、全負荷における銅損と鉄損の比が $2 : 1$ の単相変圧器がある。力率 1.0 の全負荷における効率が 97% であるとき、次の (a) 及び (b) の間に答えよ。ただし、定格容量とは出力側で見る値であり、鉄損と銅損以外の損失は全て無視するものとする。

(b) 負荷の電圧と力率が一定のまま負荷を変化させた。このとき、変圧器の効率が最大となる負荷は全負荷の何[%]か、最も近いものを (1) ~ (5) のうちから一つ選べ。

銅損 p_{cn} と鉄損 p_i の関係

$$p_{cn} : p_i = 2 : 1 \rightarrow p_{cn} = 2p_i$$

$$p_i = 103 \text{ W}$$

$$p_{cn} = 2p_i = 206 \text{ W}$$

最大効率時は $p_i = p_c$ が成り立つ

$$p_i = p_c = \alpha'^2 p_{cn} \rightarrow \alpha' = \sqrt{\frac{p_i}{p_{cn}}} = \sqrt{\frac{103}{206}} = \sqrt{\frac{1}{2}} = 0.707 \rightarrow 70.7\%$$

機械 R03 問15

問 15 定格容量が $10 \text{ kV}\cdot\text{A}$ で、全負荷における銅損と鉄損の比が $2 : 1$ の単相変圧器がある。力率 1.0 の全負荷における効率が 97% であるとき、次の (a) 及び (b) の間に答えよ。ただし、定格容量とは出力側で見る値であり、鉄損と銅損以外の損失は全て無視するものとする。

(a) 全負荷における銅損は何 [W] になるか、最も近いものを次の (1) ~ (5) のうちから一つ選べ。

- (1) 357 (2) 206 (3) 200 (4) 119 (5) 115

(b) 負荷の電圧と力率が一定のまま負荷を変化させた。このとき、変圧器の効率が最大となる負荷は全負荷の何 [%] か、最も近いものを (1) ~ (5) のうちから一つ選べ。

- (1) 25.0 (2) 50.0 (3) 70.7 (4) 100 (5) 141

法規 H23 問11

問11 ある需要家設備において定格容量 30 [kV·A] , 鉄損 90 [W] 及び全負荷銅損 550 [W] の単相変圧器が設置してある。ある 1 日の負荷は、

24 [kW], 力率 80 [%] で 4 時間

15 [kW], 力率 90 [%] で 8 時間

10 [kW], 力率 100 [%] で 6 時間

無負荷で 6 時間

であった。この日の変圧器に関して、次の(a)及び(b)の間に答えよ。

(a) この変圧器の全日効率 [%] の値として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

(1) 97.4 (2) 97.6 (3) 97.8 (4) 98.0 (5) 98.2

(b) この変圧器の日負荷率 [%] の値として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

(1) 38 (2) 48 (3) 61 (4) 69 (5) 77

導出のポイント

問11 ある需要家設備において定格容量 30 [kV・A] , 鉄損 90 [W] 及び全負荷

銅損 550 [W] の単相変圧器が設置してある。ある 1 日の負荷は,

24 [kW], 力率 80 [%] で 4 時間

15 [kW], 力率 90 [%] で 8 時間

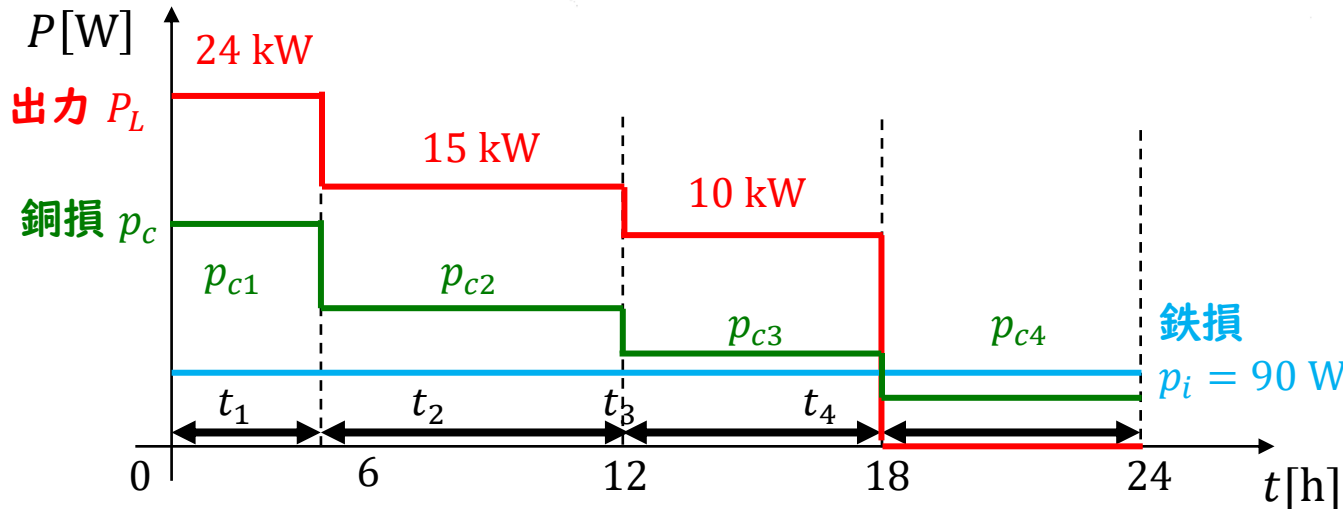
10 [kW], 力率 100 [%] で 6 時間

無負荷で 6 時間

であった。この日の変圧器に関して、次の (a) 及び (b) の間に答えよ。

	$t_1 = 4\text{h}$	$t_2 = 8\text{h}$	$t_3 = 6\text{h}$	$t_4 = 6\text{h}$
出力電力 (有効電力)	24 kW	15 kW	10 kW	0 kW
力率 $\cos\theta$	0.8	0.9	1.0	—
出力電力 (皮相電力)	S_1	S_2	S_3	0
負荷率 α	α_1	α_2	α_3	0
銅損 p_c	p_{c1}	p_{c2}	p_{c3}	0
鉄損 p_i	0.09 kW	0.09 kW	0.09 kW	0.09 kW

(a) この変圧器の全日効率 [%] の値として、最も近いものを次の (1) ~ (5) のうちから一つ選べ。



$$S_i = \frac{P_i}{\cos\theta_i}$$

$$S_1 = \frac{24}{0.8} = 30\text{ kVA}$$

$$S_2 = \frac{15}{0.9} = 16.67\text{ kVA}$$

$$S_3 = \frac{10}{1.0} = 10\text{ kVA}$$

$$\alpha_i = \frac{S_i}{P_n[\text{kVA}]}$$

$$\alpha_1 = \frac{30}{30} = 1.0$$

$$\alpha_2 = \frac{16.67}{30} = 0.556$$

$$\alpha_3 = \frac{10}{30} = 0.333$$

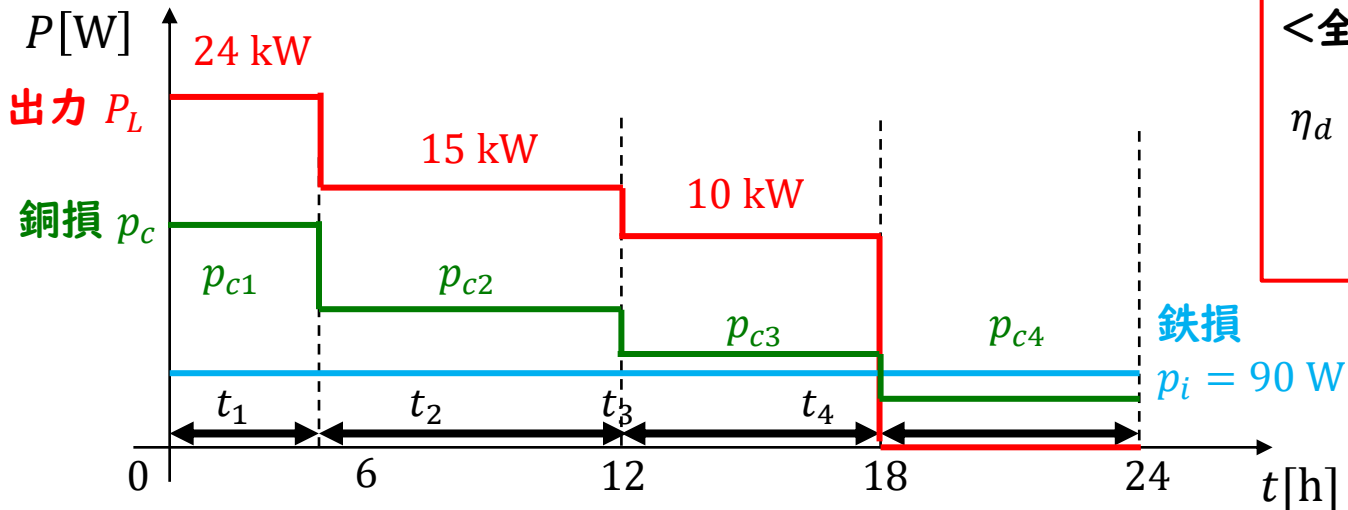
$$p_i = \alpha_i^2 p_{cn}$$

$$p_1 = 1.0^2 \times 0.55 = 0.55\text{ kW}$$

$$p_2 = 0.556^2 \times 0.55 = 0.170\text{ kW}$$

$$p_3 = 0.333^2 \times 0.55 = 0.061\text{ kW}$$

導出のポイント



<全日負荷率>

$$\eta_d [\%] = \frac{\text{1日中の出力電力量}}{\text{1日中の入力電力量}} \times 100$$

$$= \frac{P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots}{P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots + P_{c1}t_1 + P_{c2}t_2 + \dots + p_i \times 24} \times 100$$

	$t_1 = 4\text{h}$	$t_2 = 8\text{h}$	$t_3 = 6\text{h}$	$t_4 = 6\text{h}$
出力電力 (有効電力)	24 kW	15 kW	10 kW	0 kW
力率 $\cos\theta$	0.8	0.9	1.0	—
出力電力 (皮相電力)	30 kVA	16.67 kVA	10 kVA	0 kVA
負荷率 α	1	0.556	0.333	0
銅損 p_c	0.550 kW	0.170 kW	0.061 kW	0
鉄損 p_i	0.09 kW	0.09 kW	0.09 kW	0.09 kW

$$\eta_d [\%] = \frac{P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots}{P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots + P_{c1}t_1 + P_{c2}t_2 + \dots + p_i \times 24} \times 100$$

$$P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots = 24 \times 4 + 15 \times 8 + 10 \times 6 = 276 \text{ kWh}$$

$$P_{c1}t_1 + P_{c2}t_2 + \dots = 0.550 \times 4 + 0.170 \times 8 + 0.061 \times 6 = 3.926 \text{ kWh}$$

$$\eta_d [\%] = \frac{276}{276 + 3.926 + 0.09 \times 24} \times 100 = 97.8 \%$$

導出のポイント

(b) この変圧器の日負荷率 [%] の値として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	$t_1 = 4\text{h}$	$t_2 = 8\text{h}$	$t_3 = 6\text{h}$	$t_4 = 6\text{h}$
出力電力 (有効電力)	24 kW	15 kW	10 kW	0 kW
力率 $\cos\theta$	0.8	0.9	1.0	—
出力電力 (皮相電力)	30 kVA	16.67 kVA	10 kVA	0 kVA
負荷率 α	1	0.556	0.333	0
銅損 p_c	0.550 kW	0.170 kW	0.061 kW	0
鉄損 p_i	0.09 kW	0.09 kW	0.09 kW	0.09 kW

<日負荷率>

$$\eta_{ave} [\%] = \frac{\text{1日の平均出力電力}}{\text{1日の最大出力(需要)電力}} \times 100$$

$$= \frac{(P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots)/24}{P_{Lmax}} \times 100$$

$$\eta_{ave} [\%] = \frac{(P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots)/24}{P_{Lmax}} \times 100$$

$$P_{L1}t_1 + P_{L2}t_2 + \dots = 24 \times 4 + 15 \times 8 + 10 \times 6 = 276 \text{ kWh}$$

$$P_{Lmax} = 24 \text{ kW}$$

$$\eta_d [\%] = \frac{276/24}{24} \times 100 = 47.9 \sim 48 \%$$

法規 H23 問11

問11 ある需要家設備において定格容量 30 [kV·A] , 鉄損 90 [W] 及び全負荷銅損 550 [W] の単相変圧器が設置してある。ある1日の負荷は、

24 [kW], 力率 80 [%] で4時間

15 [kW], 力率 90 [%] で8時間

10 [kW], 力率 100 [%] で6時間

無負荷で6時間

であった。この日の変圧器に関して、次の(a)及び(b)の間に答えよ。

(a) この変圧器の全日効率 [%] の値として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 97.4 (2) 97.6 (3) 97.8 (4) 98.0 (5) 98.2

(b) この変圧器の日負荷率 [%] の値として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 38 (2) 48 (3) 61 (4) 69 (5) 77

ご聴講ありがとうございました
ございました!!