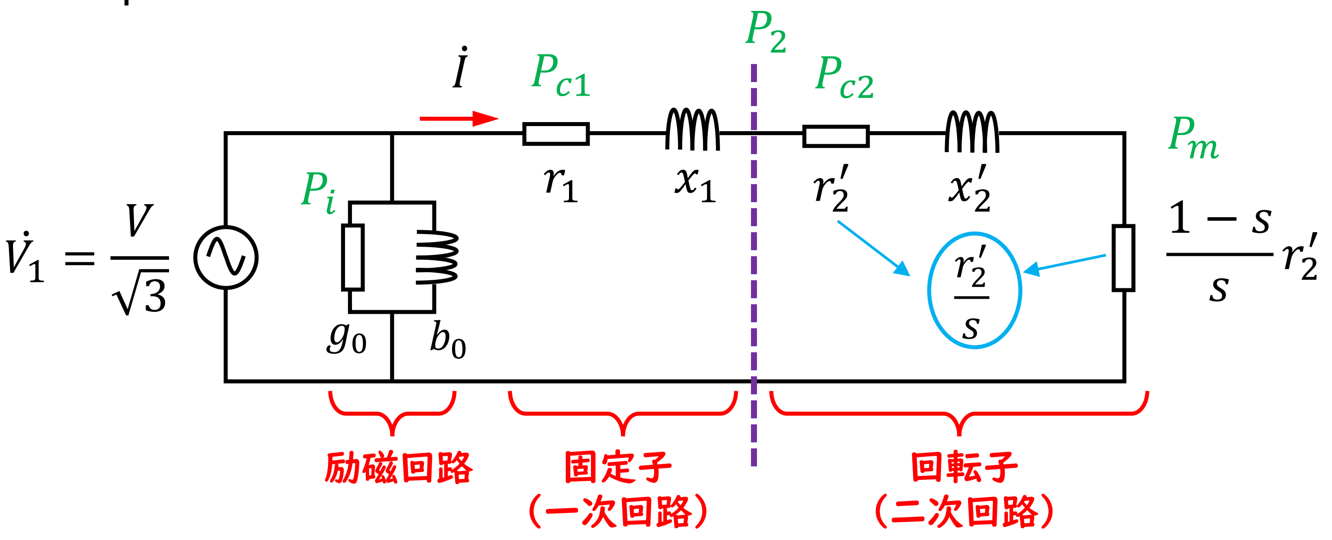
電験どうでしょう管理人
KWG presents

電験オンライン塾

第7回　機械
誘導機（4）

2023.1.29 Sun

誘導機の重要公式（損失と効率）



$N = (1-s)N_s$

$s = \dfrac{N_s - N}{N_s}$

N：回転子の速度 [min^{-1}]
N_s：回転磁界の速度（同期速度） [min^{-1}]
s：すべり

sN_s ：回転子からみた回転磁界の相対速度 [min^{-1}]

すべり	$s = 1$	→	$s = 0$
回転子の回転速度	$N = 0$	→	$N = N_s$
回転磁界の相対速度	$sN_s = N_s$	→	$sN_s = 0$

P_1: 一次入力 $P_1 = P_i + P_{c1} + P_{c2} + P_m$

P_i: 入力鉄損 $P_i = 3g_0V_1^2$

P_{c1}: 一次銅損 $P_{c1} = 3r_1I^2$

P_2: 二次入力 $P_2 = P_{c2} + P_m = 3\dfrac{r_2'}{s}I^2$

P_{c2}: 二次銅損 $P_{c2} = 3r_2'I^2$

P_m: 機械的出力 $P_m = 3\dfrac{1-s}{s}r_2'I^2$

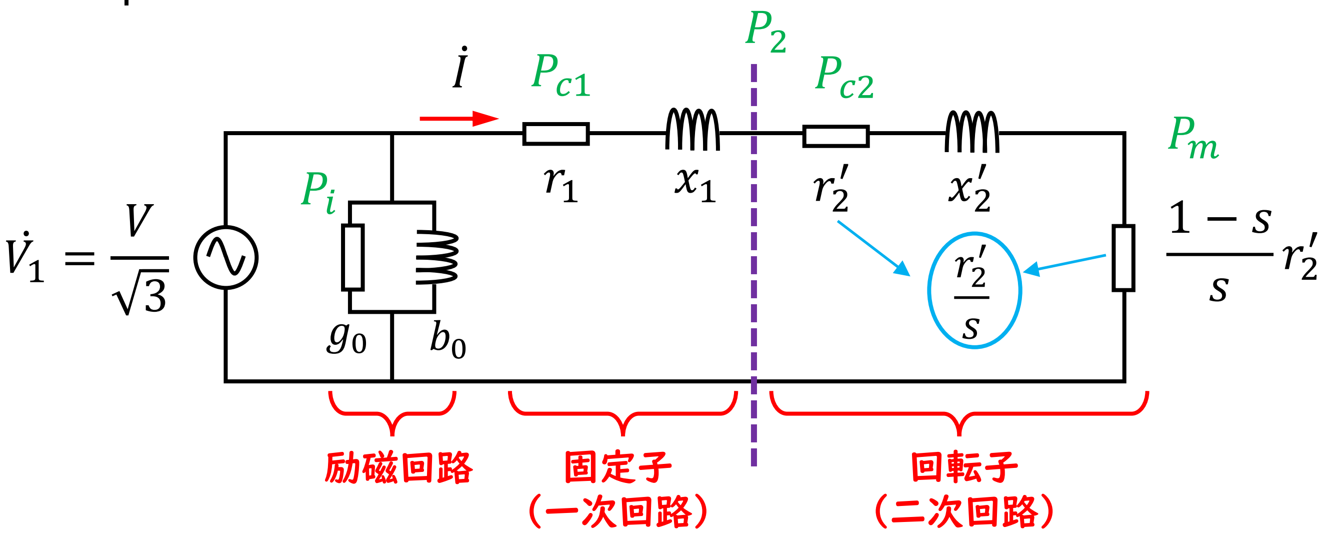
$$P_2 : P_{c2} : P_m = 3\frac{r_2'}{s}I^2 : 3r_2'I^2 : 3\frac{1-s}{s}r_2'I^2 = \frac{1}{s} : 1 : \frac{1-s}{s} = 1 : s : 1-s$$

$$P_2 : P_{c2} : P_m = 1 : s : 1-s$$

効率

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_i + P_{c1} + P_{c2}} \times 100\ [\%] = \frac{P_m}{P_1} \times 100\ [\%]$$

誘導機の重要公式（出力とトルク）



$$N = (1-s)N_s$$

$$s = \frac{N_s - N}{N_s}$$

N：回転子の速度 $[\mathrm{min}^{-1}]$
N_s：回転磁界の速度（同期速度） $[\mathrm{min}^{-1}]$
s：すべり

sN_s ：回転子からみた回転磁界の相対速度 $[\mathrm{min}^{-1}]$

すべり	$s = 1$	→	$s = 0$
回転子の回転速度	$N = 0$	→	$N = N_s$
回転磁界の相対速度	$sN_s = N_s$	→	$sN_s = 0$

$$P_m = \omega T \rightarrow T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{(1-s)P_2}{2\pi \frac{N}{60}} = \frac{(1-s)P_2}{(1-s)2\pi \frac{N_s}{60}} = \frac{P_2}{2\pi \frac{N_s}{60}} = \frac{P_2}{\omega_s}$$

$P_2 = \omega_s T$
この式を満たすことから二次入力のことを
同期ワットともいう

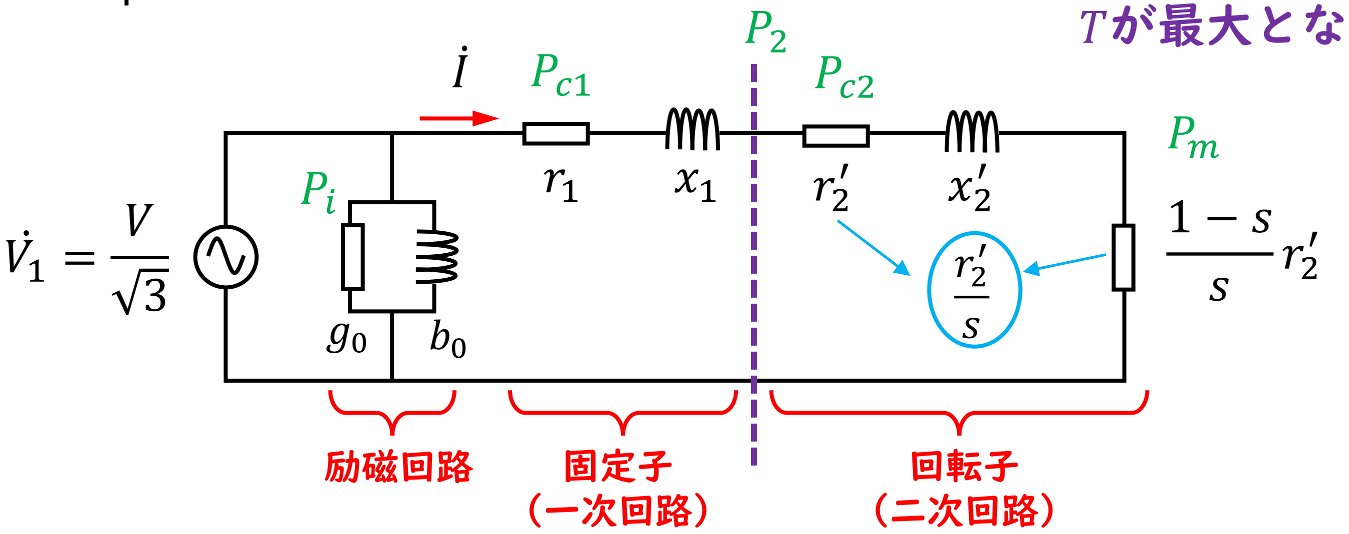
$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_2}{\omega_s}$$

$$\omega = 2\pi \frac{N}{60}$$

$$\omega_s = 2\pi \frac{N_s}{60}$$

T：電動機のトルク $[\mathrm{N \cdot m}]$
N：回転子の速度 $[\mathrm{min}^{-1}]$
N_s：回転磁界の速度（同期速度） $[\mathrm{min}^{-1}]$
s：すべり
ω：回転子の角周波数 $[\mathrm{rad/s}]$
ω_s：同期角周波数 $[\mathrm{rad/s}]$
f：電源周波数 $[\mathrm{Hz}]$
p：極数

すべりとトルク



$$I=\frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1+\dfrac{r_2'}{s}\right)^2+(x_1+x_2')^2}}$$

$$T=\frac{P_2}{\omega_s}=\frac{1}{\omega_s}\left(3\frac{r_2'}{s}I^2\right)=\frac{3}{\omega_s}\frac{\dfrac{r_2'}{s}V_1^2}{\left(r_1+\dfrac{r_2'}{s}\right)^2+(x_1+x_2')^2}$$

Tが最大となるsは

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}s}=\frac{3}{\omega_s}r_2'V_1^2\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\frac{\dfrac{1}{s}}{\left(r_1+\dfrac{r_2'}{s}\right)^2+(x_1+x_2')^2}$$

$$=\frac{3}{\omega_s}r_2'V_1^2\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\frac{1}{s\left(r_1+\dfrac{r_2'}{s}\right)^2+s(x_1+x_2')^2}$$

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}s}=0\rightarrow\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left\{s\left(r_1+\frac{r_2'}{s}\right)^2+s(x_1+x_2')^2\right\}=0$$

$$\left(r_1+\frac{r_2'}{s}\right)^2+2s\left(r_1+\frac{r_2'}{s}\right)\left(-\frac{r_2'}{s^2}\right)+(x_1+x_2')^2=0$$

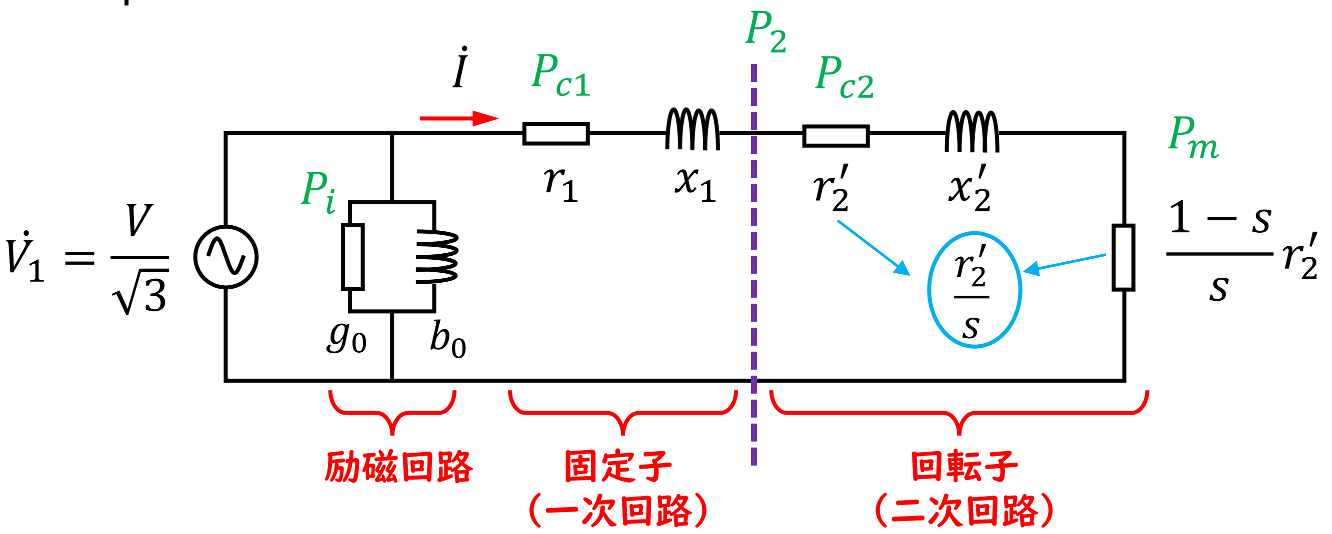
$$\left(r_1+\frac{r_2'}{s}\right)^2-2\frac{r_2'}{s}\left(r_1+\frac{r_2'}{s}\right)+(x_1+x_2')^2=0$$

$$r_1^2+2\frac{r_1r_2'}{s}+\frac{r_2'^2}{s^2}-2\frac{r_1r_2'}{s}-2\frac{r_2'^2}{s^2}+(x_1+x_2')^2=0$$

$$r_1^2-\frac{r_2'^2}{s^2}+(x_1+x_2')^2=0$$

$$\frac{r_2'^2}{s^2}=r_1^2+(x_1+x_2')^2\rightarrow s_m=\frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2+(x_1+x_2')^2}}$$

すべりとトルク



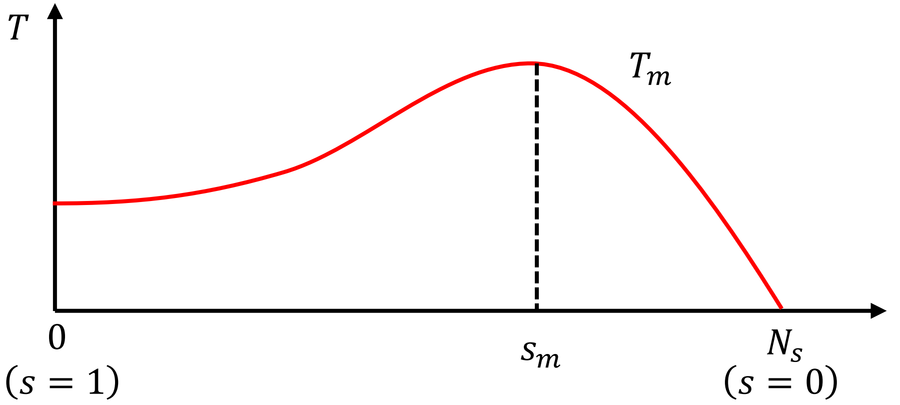
$$I = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

$$T = \frac{P_2}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s}\left(3\frac{r_2'}{s}I^2\right) = \frac{3}{\omega_s}\frac{\frac{r_2'}{s}V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

Tが最大となるsは

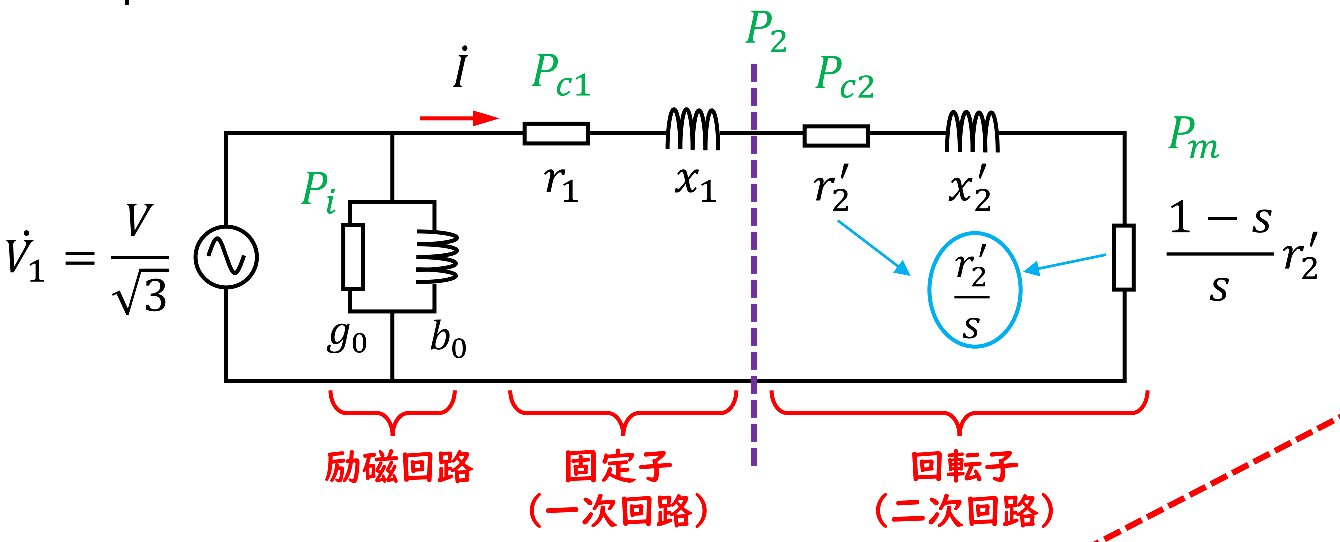
$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

滑りsとトルクT
の関係のグラフ



トルクTは電圧の2乗に比例する
電圧が2倍→トルクは4倍
電圧が半分→トルクは4分の1

すべりとトルク



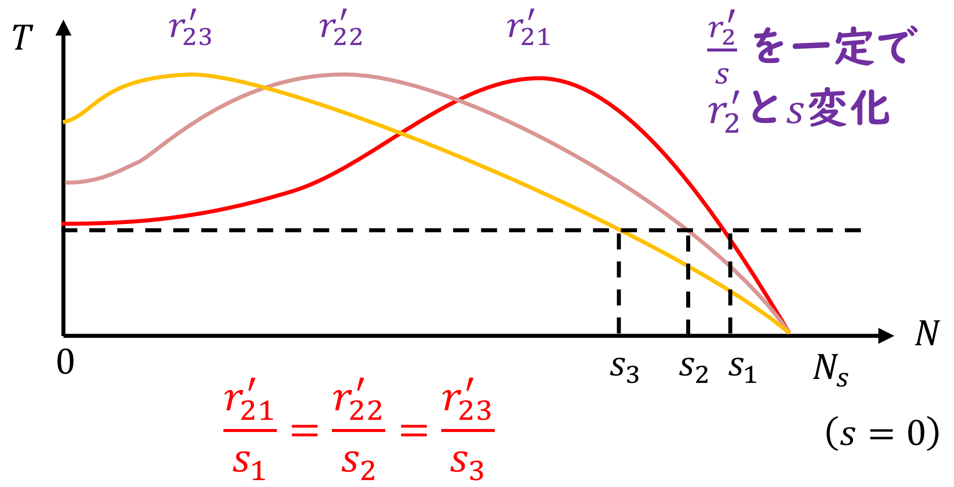
$$I = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

$$T = \frac{P_2}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s}\left(3\frac{r_2'}{s}I^2\right) = \frac{3}{\omega_s}\frac{\frac{r_2'}{s}V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} = \frac{3}{2\pi\frac{1}{60}\frac{120}{p}}\frac{\frac{r_2'}{s}\frac{V_1^2}{f}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

Tが最大となるsは

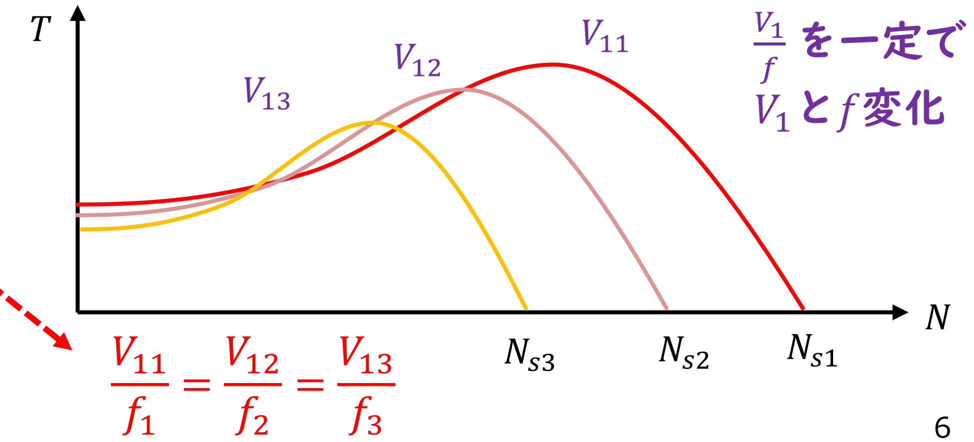
$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

比例推移

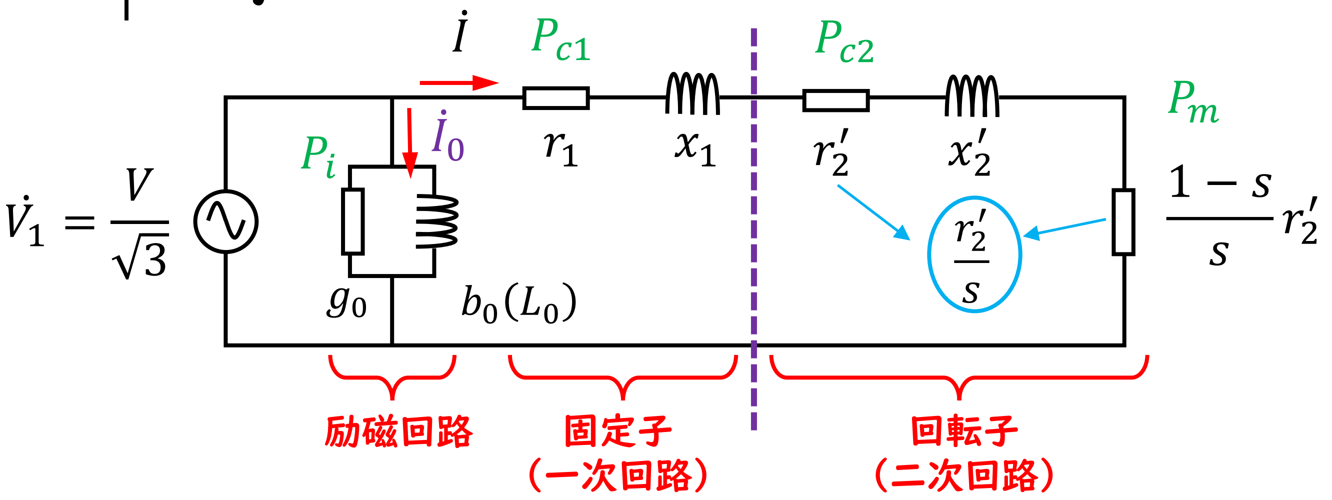


V/f 制御

$V_1 \cdot \frac{V_1}{f_1}$



V/f制御



$$T = \frac{P_2}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s}\left(3\frac{r_2'}{s}I^2\right) = \frac{3}{2\pi\frac{1}{60}\frac{120}{p}} \frac{\frac{r_2'}{s}\frac{V_1^2}{f}}{\left(r_1+\frac{r_2'}{s}\right)^2+(x_1+x_2')^2}$$

$V_1 \cdot \frac{V_1}{f_1}$

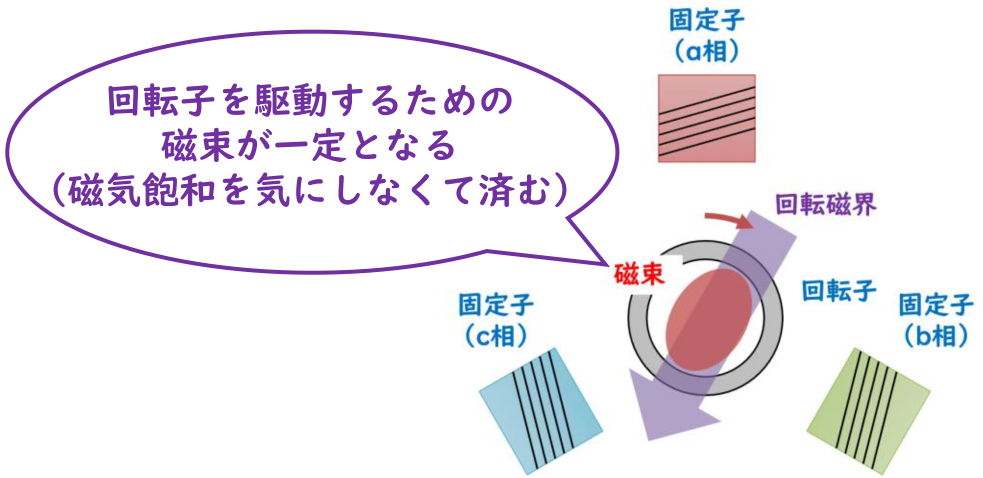
$\frac{V_1}{f}$ を一定で
V_1 と f 変化

$$\frac{V_{11}}{f_1} = \frac{V_{12}}{f_2} = \frac{V_{13}}{f_3}$$

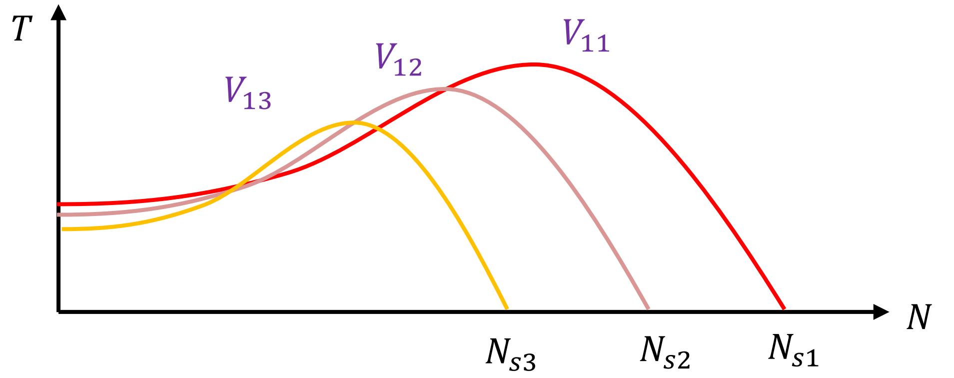
励磁回路で生じる界磁磁束は

$$\phi = K_f I_0 \rightarrow \phi = K_f \frac{V_1}{2\pi f L_0} = K_f' \frac{V_1}{f}$$

V/f を一定に保つと、
界磁磁束が一定となる



V/f 制御



H24 問3

問３　誘導電動機に関する記述として，誤っているものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし，誘導電動機の滑りを s とする。

(1) 誘導電動機の一次回路には同期速度の回転磁界，二次回路には同期速度の s 倍の回転磁界が加わる。したがって，一次回路と二次回路の巻数比を 1 とした場合，二次誘導起電力の周波数及び電圧は一次誘導起電力の s 倍になる。

(2) s が小さくなると，二次誘導起電力の周波数及び電圧が小さくなるので，二次回路に流れる電流が小さくなる。この変化を電気回路に表現するため，誘導電動機の等価回路では，二次回路の抵抗の値を $\dfrac{1}{s}$ 倍にして表現する。

(3) 誘導電動機の等価回路では，一次巻線の漏れリアクタンス，一次巻線の抵抗，二次巻線の漏れリアクタンス，二次巻線の抵抗，及び電動機出力を示す抵抗が直列回路で表されるので，電動機の力率は 1 にはならない。

(4) 誘導電動機の等価回路を構成するリアクタンス値及び抵抗値は，電圧が変化しても s が一定ならば変わらない。s 一定で駆動電圧を半分にすれば，等価回路に流れる電流が半分になり，電動機トルクは半分になる。

(5) 同期速度と電動機トルクとで計算される同期ワット(二次入力)は，二次銅損と電動機出力との和となる。

H24　問3

問３　誘導電動機に関する記述として，誤っているものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし，誘導電動機の滑りを s とする。

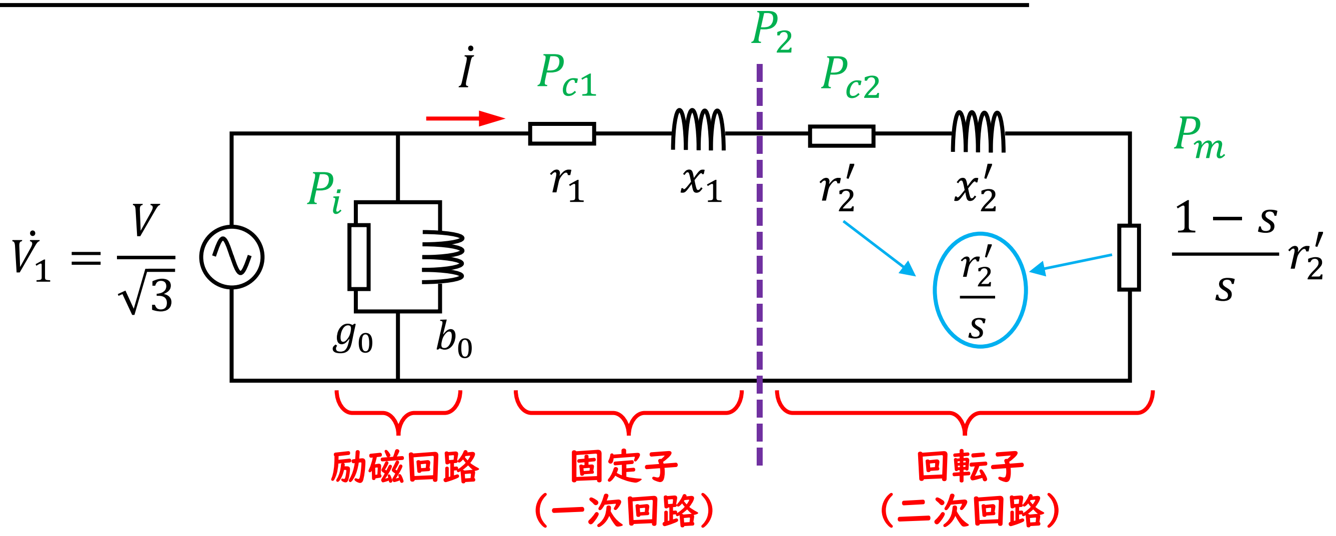
(1)　誘導電動機の一次回路には同期速度の回転磁界，二次回路には同期速度の s 倍の回転磁界が加わる。したがって，一次回路と二次回路の巻数比を１とした場合，二次誘導起電力の周波数及び電圧は一次誘導起電力の s 倍になる。

(2)　s が小さくなると，二次誘導起電力の周波数及び電圧が小さくなるので，二次回路に流れる電流が小さくなる。この変化を電気回路に表現するため，誘導電動機の等価回路では，二次回路の抵抗の値を $\frac{1}{s}$ 倍にして表現する。

(3)　誘導電動機の等価回路では，一次巻線の漏れリアクタンス，一次巻線の抵抗，二次巻線の漏れリアクタンス，二次巻線の抵抗，及び電動機出力を示す抵抗が直列回路で表されるので，電動機の力率は１にはならない。

(4)　誘導電動機の等価回路を構成するリアクタンス値及び抵抗値は，電圧が変化しても s が一定ならば変わらない。s 一定で駆動電圧を半分にすれば，等価回路に流れる電流が半分になり，電動機トルクは半分になる。

(5)　同期速度と電動機トルクとで計算される同期ワット（二次入力）は，二次銅損と電動機出力との和となる。

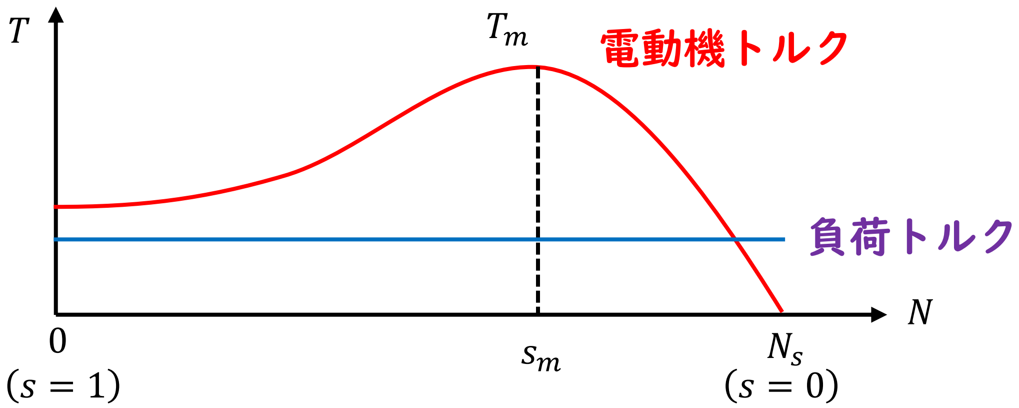


$$I = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

$$T = \frac{P_2}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s}\left(3\frac{r_2'}{s}I^2\right) = \frac{3}{\omega_s}\frac{\frac{r_2'}{s}V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

トルクは電圧（又は電流）の二乗に比例するため、
電圧が半分になると、トルクは4分の１になる。

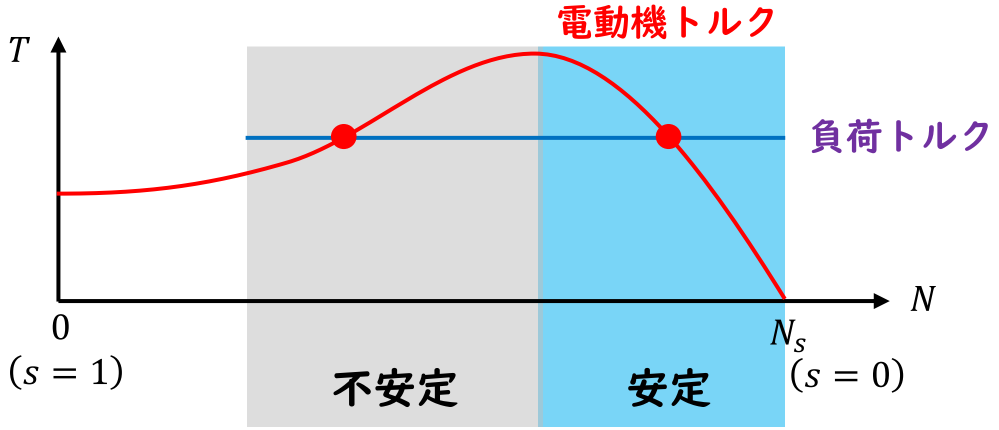
電動機トルクと負荷トルク



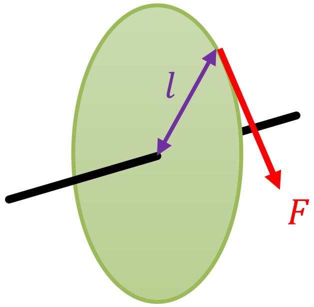
電動機トルク　＞　負荷トルク
→負荷が軽いため、回転速度が上昇する

電動機トルク　＜　負荷トルク
→負荷が重いため、回転速度が減少する
（始動時であれば、回転しない）

電動機トルク　＝　負荷トルク
→定速で回転する



トルクとは『回転に必要な力』



$$T = F \cdot l \ [\mathrm{N \cdot m}]$$

力と回転対象の回転軸から長さで
トルク（回転に必要な力）が決まる

電動機トルク：回転子を回そうとする力
負荷トルク：回転時に電動機が感じる重さ
（電験三種では回転速度によらず一定）

不安定	安定
回転速度が上がる 電動機トルク＞負荷トルクとなり 速度が上昇し続ける（暴走）	回転速度が上がる 電動機トルク＜負荷トルクとなり 速度が下がる（元に戻る）
回転速度が下がる 電動機トルク＜負荷トルクとなり 速度が減少し続ける（停止）	回転速度が下がる 電動機トルク＞負荷トルクとなり 速度が上がる（元に戻る）

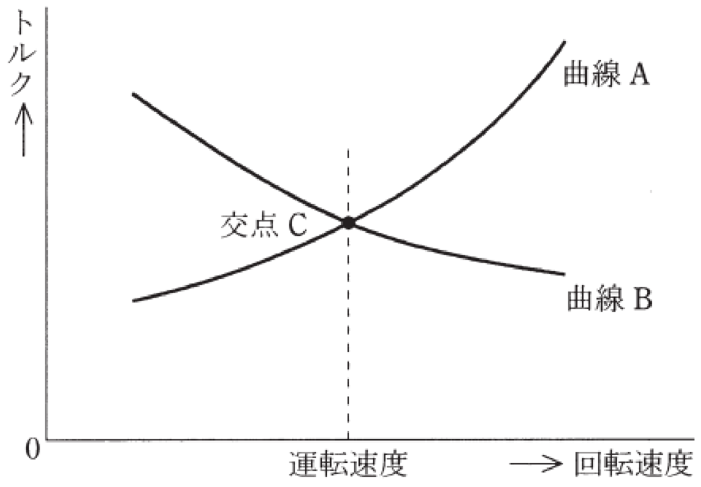
H24 問5

問５　次の文章は，電動機と負荷のトルク特性の関係について述べたものである。

横軸が回転速度，縦軸がトルクを示す図において２本の曲線Ａ，Ｂは，一方が電動機トルク特性，他方が負荷トルク特性を示している。

いま，曲線Ａが $\boxed{(ア)}$ 特性，曲線Ｂが $\boxed{(イ)}$ 特性のときは，２本の曲線の交点Ｃは不安定な運転点である。これは，何らかの原因で電動機の回転速度がこの点から下降すると，電動機トルクと負荷トルクとの差により電動機が $\boxed{(ウ)}$ されるためである。具体的に，電動機が誘導電動機であり，回転速度に対してトルクが変化しない定トルク特性の負荷のトルクの大きさが，誘導電動機の始動トルクと最大トルクとの間にある場合を考える。このとき，電動機トルクと負荷トルクとの交点は，回転速度零と最大トルクの回転速度との間，及び最大トルクの回転速度と同期速度との間の２箇所にある。交点Ｃは，$\boxed{(エ)}$ との間の交点に相当する。

上記の記述中の空白箇所(ア)，(イ)，(ウ)及び(エ)に当てはまる組合せとして，正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。



	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
(1)	電動機トルク	負荷トルク	減　速	回転速度零と最大トルクの回転速度
(2)	電動機トルク	負荷トルク	減　速	最大トルクの回転速度と同期速度
(3)	負荷トルク	電動機トルク	減　速	回転速度零と最大トルクの回転速度
(4)	負荷トルク	電動機トルク	加　速	回転速度零と最大トルクの回転速度
(5)	負荷トルク	電動機トルク	加　速	最大トルクの回転速度と同期速度

H24 問5

問５　次の文章は，電動機と負荷のトルク特性の関係について述べたものである。

横軸が回転速度，縦軸がトルクを示す図において２本の曲線 A，B は，一方が電動機トルク特性，他方が負荷トルク特性を示している。

電動機トルク　負荷トルク

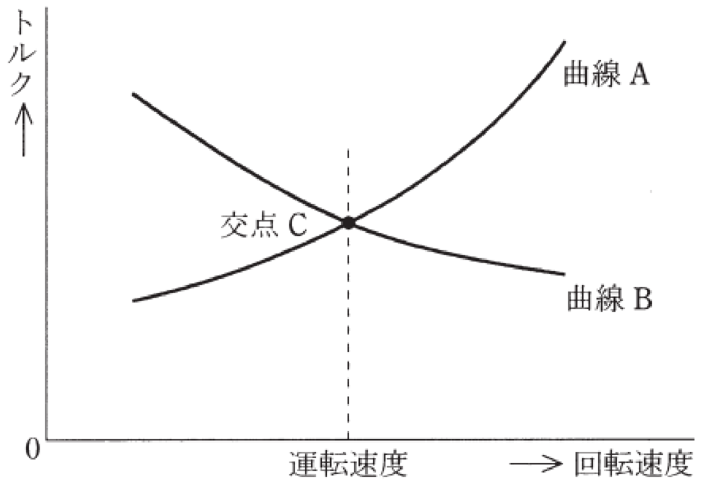
いま，曲線 A が $\boxed{（ア）}$ 特性，曲線 B が $\boxed{（イ）}$ 特性のときは，２本の曲線の交点 C は不安定な運転点である。これは，何らかの原因で電動機の回転速度がこの点から下降すると，電動機トルクと負荷トルクとの差により電動機が

減速

$\boxed{（ウ）}$ されるためである。具体的に，電動機が誘導電動機であり，回転速度に対してトルクが変化しない定トルク特性の負荷のトルクの大きさが，誘導電動機の始動トルクと最大トルクとの間にある場合を考える。このとき，電動機トルクと負荷トルクとの交点は，回転速度零と最大トルクの回転速度との間，及び最大トルクの回転速度と同期速度との間の２箇所にある。交点 C は，$\boxed{（エ）}$ との間の交点に相当する。

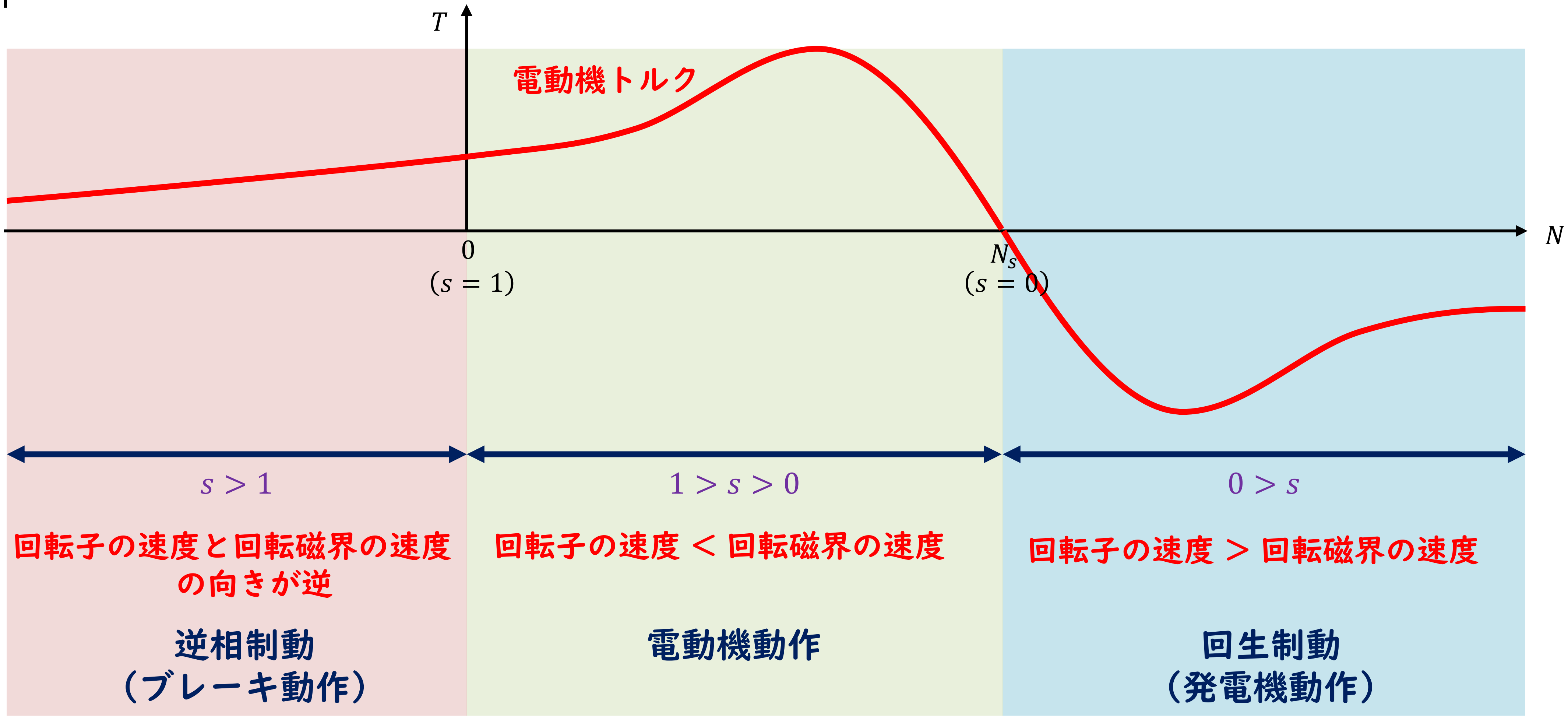
回転速度零と最大トルクの回転速度

上記の記述中の空白箇所(ア)，(イ)，(ウ)及び(エ)に当てはまる組合せとして，正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。



	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
(1)	電動機トルク	負荷トルク	減　速	回転速度零と最大トルクの回転速度
(2)	電動機トルク	負荷トルク	減　速	最大トルクの回転速度と同期速度
(3)	負荷トルク	電動機トルク	減　速	回転速度零と最大トルクの回転速度
(4)	負荷トルク	電動機トルク	加　速	回転速度零と最大トルクの回転速度
(5)	負荷トルク	電動機トルク	加　速	最大トルクの回転速度と同期速度

すべりとトルク　その2



$s = 1.5$
$N = (1 - s)N_s \rightarrow N = -0.5N_s$

$\rightarrow$ NとN_Sの向きが逆

$s = 0.5$
$N = (1 - s)N_s \rightarrow N = 0.5N_s$

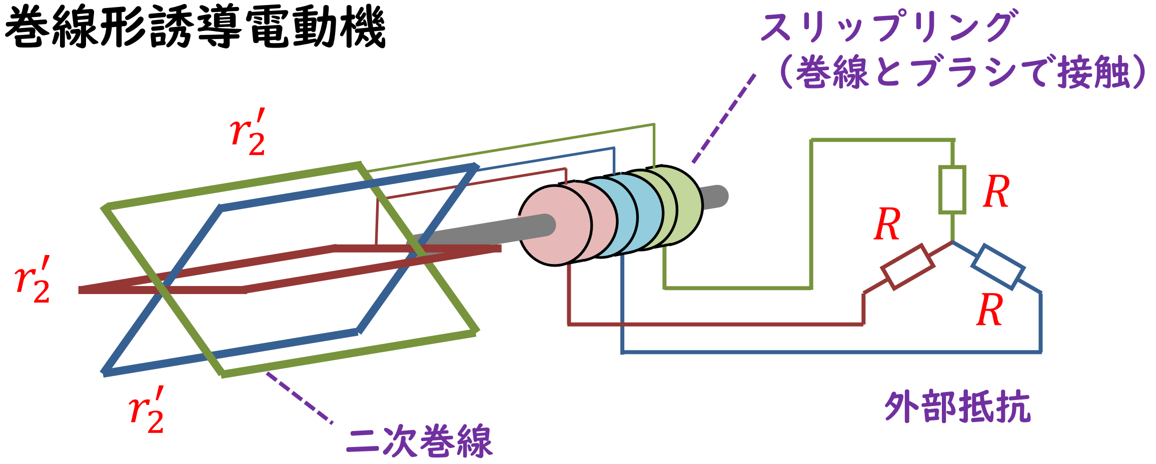
$\rightarrow N < N_S$

$s = -0.1$
$N = (1 - s)N_s \rightarrow N = 1.1N_s$

$\rightarrow N > N_S$

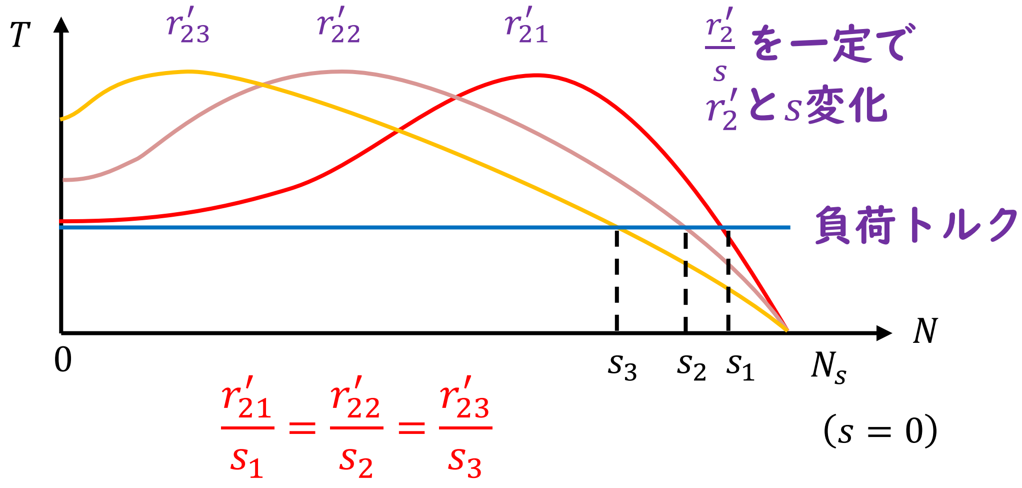
比例推移による速度制御

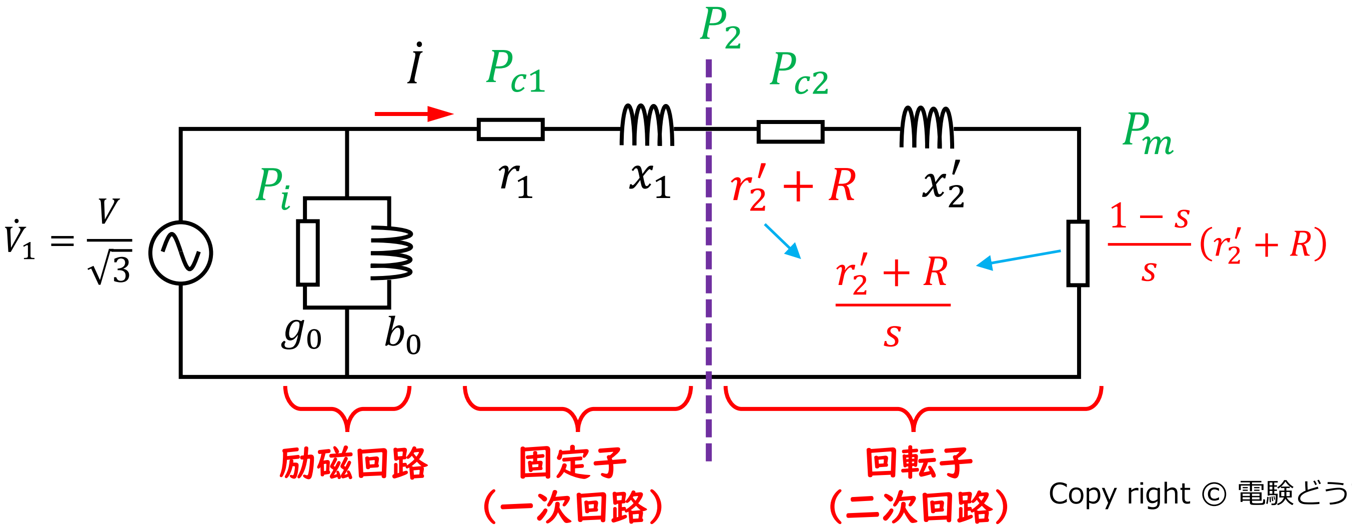
巻線形誘導電動機



- スリップリングを介して外部抵抗を接続できる
  →始動特性の改善、速度制御が可能（比例推移）

比例推移





$$\frac{r_2'}{s_1}=\frac{r_2'+R}{s_2}=\text{一定}$$

外部抵抗を変化することで
負荷トルクに合わせて滑りが変化し、
速度制御ができる

H29 問15

問 15　定格出力 15 kW，定格電圧 400 V，定格周波数 60 Hz，極数 4 の三相誘導電動機がある。この誘導電動機が定格電圧，定格周波数で運転されているとき，次の(a)及び(b)の問に答えよ。

(a) 軸出力が 15 kW，効率と力率がそれぞれ 90 % で運転されているときの一次電流の値[A]として，最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

(1) 22　(2) 24　(3) 27　(4) 33　(5) 46

(b) この誘導電動機が巻線形であり，全負荷時の回転速度が 1746 min^{-1} であるものとする。二次回路の各相に抵抗を追加して挿入したところ，全負荷時の回転速度が 1455 min^{-1} となった。ただし，負荷トルクは回転速度によらず一定とする。挿入した抵抗の値は元の二次回路の抵抗の値の何倍であるか。最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

(1) 1.2　(2) 2.2　(3) 5.4　(4) 6.4　(5) 7.4

H29 問15

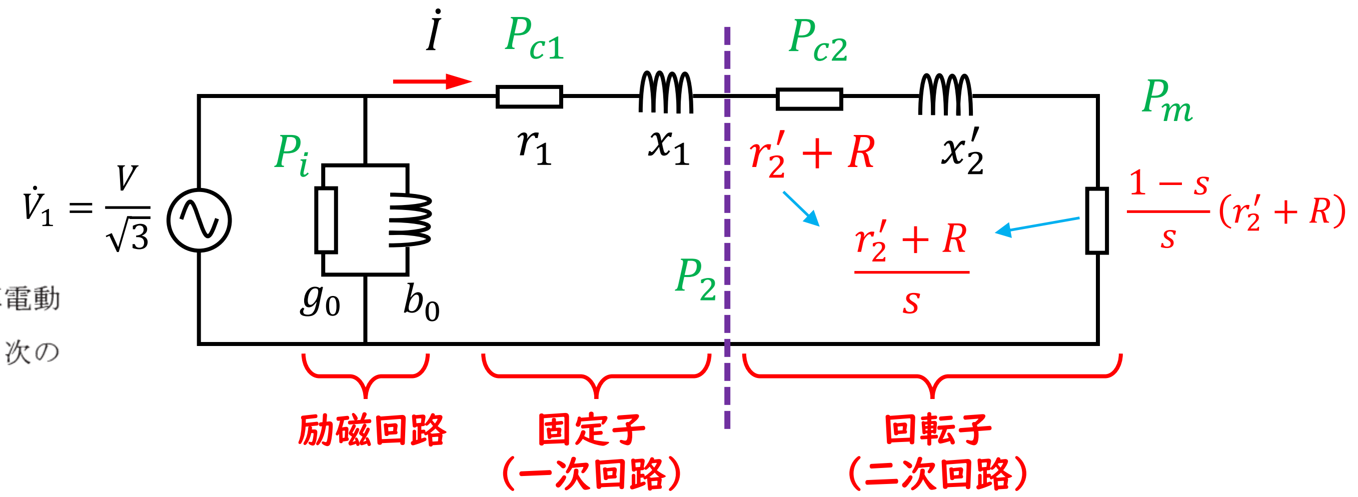
問 15　定格出力 15 kW，定格電圧 400 V，定格周波数 60 Hz，極数 4 の三相誘導電動機がある。この誘導電動機が定格電圧，定格周波数で運転されているとき，次の (a) 及び (b) の問に答えよ。

(a) 軸出力が 15 kW，効率と力率がそれぞれ 90 % で運転されているときの一次電流の値 [A] として，最も近いものを次の (1)～(5) のうちから一つ選べ。

(1) 22　(2) 24　(3) 27　(4) 33　(5) 46

(b) この誘導電動機が巻線形であり，全負荷時の回転速度が 1746 $\mathrm{min^{-1}}$ であるものとする。二次回路の各相に抵抗を追加して挿入したところ，全負荷時の回転速度が 1455 $\mathrm{min^{-1}}$ となった。ただし，負荷トルクは回転速度によらず一定とする。挿入した抵抗の値は元の二次回路の抵抗の値の何倍であるか。最も近いものを次の (1)～(5) のうちから一つ選べ。

(1) 1.2　(2) 2.2　(3) 5.4　(4) 6.4　(5) 7.4



P_1: 一次入力

P_i: 入力鉄損

P_{c1}: 一次銅損

P_2: 二次入力

P_{c2}: 二次銅損

P_m: 機械的出力

$$P_2 : P_{c2} : P_m = 1 : s : 1 - s$$

$$N_s = \frac{120f}{p}\ [\mathrm{min^{-1}}]$$

$$N = (1-s)N_s$$

$$s = \frac{N_s - N}{N_s}$$

N：回転子の速度 $[\mathrm{min^{-1}}]$
N_s：回転磁界の速度（同期速度） $[\mathrm{min^{-1}}]$
s：すべり
f：電源周波数 [Hz]
p：極数

効率

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_i + P_{c1} + P_{c2}} \times 100\ [\%] = \frac{P_m}{P_1} \times 100\ [\%]$$

$$\frac{r_2'}{s_1} = \frac{r_2' + R}{s_2} = \text{一定}$$

H29 問15

問 15　定格出力 15 kW，定格電圧 400 V，定格周波数 60 Hz，極数 4 の三相誘導電動機がある。この誘導電動機が定格電圧，定格周波数で運転されているとき，次の(a)及び(b)の問に答えよ。

(a) 軸出力が 15 kW，効率と力率がそれぞれ 90 %で運転されているときの一次電流の値[A]として，最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

(1) 22　(2) 24　(3) 27　(4) 33　(5) 46

(b) この誘導電動機が巻線形であり，全負荷時の回転速度が 1746 $\mathrm{min^{-1}}$ であるものとする。二次回路の各相に抵抗を追加して挿入したところ，全負荷時の回転速度が 1455 $\mathrm{min^{-1}}$ となった。ただし，負荷トルクは回転速度によらず一定とする。挿入した抵抗の値は元の二次回路の抵抗の値の何倍であるか。最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

(1) 1.2　(2) 2.2　(3) 5.4　(4) 6.4　(5) 7.4

$$\frac{P_m}{P_1}=\eta\ \rightarrow P_1=\frac{1}{\eta}P_m$$

$$P_1=S_1\cos\theta\ \rightarrow S_1=\frac{P_1}{\cos\theta}=\frac{1}{\cos\theta}\times\frac{1}{\eta}\times P_m=\frac{1}{0.9}\times\frac{1}{0.9}\times 15$$
$$=18.52\ \mathrm{kVA}$$

$$S_1=\sqrt{3}VI\ \rightarrow I=\frac{S_1}{\sqrt{3}V}=\frac{18.52\times10^3}{\sqrt{3}\times400}=26.7\ \mathrm{A}$$

$$N_s=\frac{120f}{p}=\frac{120\times60}{4}=1800\ \mathrm{min^{-1}}$$

$$s=\frac{N_s-N}{N_s}=\frac{1800-1746}{1800}=0.03$$

$$s'=\frac{N_s-N'}{N_s}=\frac{1800-1455}{1800}=0.192$$

$$\frac{r}{s}=\frac{r+ar}{s'}=\frac{(1+a)r}{s'}\ \rightarrow 1+a=\frac{s'}{s}=\frac{0.192}{0.03}=6.4\ \rightarrow a=5.4$$

ご聴講ありがとうございました!!