

●平成22年度第二種電気主任技術者二次試験標準解答

配点：一題当たり 30 点

電力・管理科目 4 題× 30 点＝ 120 点

機械・制御科目 2 題× 30 点＝ 60 点

<電力・管理科目>

[問 1 の標準解答]

1. 進相運転の目的

電力系統は、超高圧送電線路や地中ケーブル送電線による線路充電容量の増大及び需要家の力率改善用コンデンサの普及などによって、深夜の軽負荷時等には無効電力が余剰となり、系統電圧が上昇する傾向となる。このため、分路リアクトルや同期調相機を設置したり、軽負荷送電線を停止するなどして、無効電力を吸収する対策をとっているが、これらには限界があるため、系統に並列されているタービン発電機を低励磁で進相運転することにより、無効電力を吸収し、系統電圧上昇を抑制することを目的とする。

2. 進相運転時の留意点と対策

(1) 留意点

① 系統安定度の低下

タービン発電機内部誘導起電力が低くなることによって、タービン発電機の同期化力が減少し、定態安定度が低下する。

② 発電機固定子鉄心端部の過熱

進相運転時には、発電機固定子鉄心端部の漏れ磁束の量が著しく増大し、鉄心端部に大きな渦電流が流れ、その部分が過熱する。

③ 所内電圧の低下

進相運転による発電機端子電圧低下に伴い、タービン発電機の出力から直接電源の供給を受ける所内補機については、電源電圧が低下する。

(2) 対策

- ① 定態安定度を向上させるために PSS 付きの超速応励磁制御装置（頂上電圧が高く応答の速い高性能励磁装置）を設置する。
- ② 不足電圧励磁制限装置を使用し，上記留意点が発生しないように励磁電圧の下限值を設定する。

[問2の標準解答]

1. 充電容量

(1) 留意点

地中ケーブルでは架空送電線に比較して作用静電容量が20倍程度となる。このため、ケーブルが長くなると無効電力が増加し、有効電力の送電に限界が生じる。また、ケーブル両端における軽負荷時の電圧上昇(フェランチ効果)も顕著となる。

(2) 対策

- ① ケーブルの両端などに必要に応じて分路リアクトルを挿入し、静電容量による無効電力を補償する。
- ② 絶縁に用いる誘電体に誘電率の小さい物を用いる。

2. 放熱

(1) 留意点

地中ケーブルでは地中に設置されることや、導体周囲を絶縁物で覆うこと等の構造上の問題から、周囲の空気が自由に対流できる架空送電線に比べ、放熱が悪くなる。このため、架空送電線に比べ、温度上昇限界による送電量の制限が厳しい。

(2) 対策

- ① 絶縁物の耐熱性を向上させ、最高許容温度を高くする。
- ② 放熱性を向上させる。(ケーブル冷却用流体による強制冷却, 他)
- ③ 絶縁物の誘電損による温度上昇を低減させる。
- ④ 導体の抵抗を減少させる。

3. 地中ケーブルの絶縁

(1) 留意点

架空送電線の絶縁が大気により保たれているのに対して、地中ケーブルの絶縁は絶縁物によって保たれている。このため、次のような点に留意する必要がある。

① 地中ケーブルでは絶縁破壊による放電は絶縁物の損傷を伴い、ケーブルの交換を伴う。このため、絶縁破壊による故障箇所の除去に時間がかかる。このことは空気中の放電が送電を停止することで取り除ける架空送電線との大きな違いとなる。このため、より厳密なサージ解析の実施などの厳密な過電圧対策が求められる。

また、この際、ケーブルのサージインピーダンスが架空送電線に比較して小さい点を考慮する必要がある。

② 架空送電線の大気は常に入れ替わるが、地中ケーブルの絶縁物はそのようにはならない。このため、絶縁物の劣化に注意する必要がある。

(2) 対策

- ① 過電圧保護装置(避雷器等)の設置。
- ② 絶縁協調における考慮。

[問3の標準解答]

- (1) 基準容量を $P_S=45$ [MV・A] として、各変圧器の短絡インピーダンスを基準容量ベースに換算したものを Z_A , Z_B とすると、

$$Z_A = \frac{P_B}{45} \times 10 = \frac{45}{45} \times 10 = 10 \text{ [\%]}$$

$$Z_B = \frac{P_B}{30} \times 10 = \frac{45}{30} \times 10 = 15 \text{ [\%]}$$

したがって、 P_A , P_B は以下のとおりとなる。

$$P_A = \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \times P = \frac{15}{10 + 15} \times P = 0.6P \text{ [MW]}$$

$$P_B = \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \times P = \frac{10}{10 + 15} \times P = 0.4P \text{ [MW]}$$

- (2) P_{LA} , P_{LB} , P_{LAB} は以下のとおりとなる。

$$P_{LA} = 40 + \left(\frac{P \times 10^3}{45 \times 10^3 \times 0.8} \right)^2 \times 216 = 40 + \frac{P^2 \times 216}{36^2} = 40 + \frac{P^2}{6} \text{ [kW]}$$

$$P_{LB} = 30 + \left(\frac{P \times 10^3}{30 \times 10^3 \times 0.8} \right)^2 \times 144 = 30 + \frac{P^2 \times 144}{24^2} = 30 + \frac{P^2}{4} \text{ [kW]}$$

$$\begin{aligned} P_{LAB} &= 40 + 30 + \left(\frac{P_A \times 10^3}{45 \times 10^3 \times 0.8} \right)^2 \times 216 + \left(\frac{P_B \times 10^3}{30 \times 10^3 \times 0.8} \right)^2 \times 144 \\ &= 70 + \frac{(0.6P)^2}{6} + \frac{(0.4P)^2}{4} = 70 + \frac{3P^2}{50} + \frac{P^2}{25} \\ &= 70 + \frac{P^2}{10} \text{ [kW]} \end{aligned}$$

- (3) 時間帯①の場合、 $P=12$ [MW] より、

$$P_{LA} = 40 + \frac{12^2}{6} = 64 \text{ [kW]}$$

$$P_{LB} = 30 + \frac{12^2}{4} = 66 \text{ [kW]}$$

$$P_{LAB} = 70 + \frac{12^2}{10} = 84.4 \text{ [kW]}$$

となり、 P_{LA} が最小となる。

時間帯②の場合、 $P=18$ [MW] より、

$$P_{LA} = 40 + \frac{18^2}{6} = 94 \text{ [kW]}$$

$$P_{LB} = 30 + \frac{18^2}{4} = 111 \text{ [kW]}$$

$$P_{LAB} = 70 + \frac{18^2}{10} = 102.4 \text{ [kW]}$$

となり、 P_{LA} が最小となる。

時間帯③の場合、 $P=25$ [MW] より、

$$P_{LA} = 40 + \frac{25^2}{6} = 144.167 \text{ [kW]}$$

$$P_{LB} = 30 + \frac{25^2}{4} = 186.25 \text{ [kW]}$$

(参考：この場合、変圧器 B は過負荷となるので、通常、変圧器 B 1 台運転は行わない。)

$$P_{LAB} = 70 + \frac{25^2}{10} = 132.5 \text{ [kW]}$$

となり、 P_{LAB} が最小となる。

時間帯④の場合、 $P=10$ [MW] より、

$$P_{LA} = 40 + \frac{10^2}{6} = 56.667 \text{ [kW]}$$

$$P_{LB} = 30 + \frac{10^2}{4} = 55 \text{ [kW]}$$

$$P_{LAB} = 70 + \frac{10^2}{10} = 80 \text{ [kW]}$$

となり、 P_{LB} が最小となる。

したがって、

時間帯① (0時から8時) は変圧器 A の 1 台運転

時間帯② (8時から12時) は変圧器 A の 1 台運転

時間帯③ (12時から20時) は 2 台並行運転

時間帯④ (20時から24時) は変圧器 B の 1 台運転

(4) 変電所の全日効率 η_d [%] は,

$$\begin{aligned}\eta_d &= \frac{12000 \times 8 + 18000 \times 4 + 25000 \times 8 + 10000 \times 4}{12000 \times 8 + 18000 \times 4 + 25000 \times 8 + 10000 \times 4 + 64 \times 8 + 94 \times 4 + 132.5 \times 8 + 55 \times 4} \times 100 \\ &= \frac{408000}{408000 + 512 + 376 + 1060 + 220} \times 100 = 99.471 \rightarrow 99.5 \text{ [%]}\end{aligned}$$

[問4の標準解答]

(1) 基準容量 10 [MV・A] にてインピーダンスを求めると

- a. 配電用変電所変圧器より上位側 j2.5 [%]
 - b. 配電用変電所変圧器 j7.5 [%]
 - c. 高圧配電線 アルミ 240 [mm²] × 1.5 [km] 4.35+j10.65 [%]
 - d. 高圧配電線 アルミ 120 [mm²] × 2.0 [km] 11.8+j15.8 [%]
- 発電設備設置点から系統側の全インピーダンスは a ~ d の総和であり

$$R_0 + jX_0 = 16.15 + j36.45$$

すなわち $R_0 = 16.2$ [%] $X_0 = 36.5$ [%]

(2) 誘導発電機の拘束リアクタンス X は

$$X = 20 \times \frac{10\,000}{\frac{400}{0.8}} = 400 [\%]$$

(3) 上位系統インピーダンスの背後電圧を \dot{V}_s , 誘導発電機連系前の端子点の電圧を \dot{V}_r , 連系後の端子点の電圧を \dot{V}_r' , 誘導発電機並列時の瞬時電圧変動分を ΔV , 連系後に系統に流れる電流を \dot{I} , 誘導発電機の端子点からの系統側の全インピーダンスを $R_0 + jX_0$ [%] とし, 誘導発電機の拘束リアクタンスを X [%] とする。

以下の計算は記号はそのまま p.u. 値に置き換えて行う。

連系後の送り出し点の電圧 \dot{V}_s は次式で表される。

$$\dot{V}_s = \dot{I}(R_0 + jX_0) + \dot{I}jX$$

よって,

$$|\dot{V}_s| = |\dot{I}| \sqrt{R_0^2 + (X_0 + X)^2}$$

連系による電圧変動分 ΔV は

$$\Delta V = |\dot{V}_r| - |\dot{V}_r'| \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで連系前は

$$|\dot{V}_r| = |\dot{V}_s| \quad \dots \textcircled{2}$$

連系後は

$$|\dot{V}_r| = |\dot{I}|X \quad \dots \textcircled{3}$$

発電機並列時の発電設備設置点の電圧低下率 ε は、①，②，③式より

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\Delta V}{|\dot{V}_r|} \times 100 = \frac{|\dot{V}_s| - |\dot{V}_r|}{|\dot{V}_s|} \times 100 \\ &= \frac{|\dot{I}| \sqrt{R_0^2 + (X_0 + X)^2} - |\dot{I}|X}{|\dot{I}| \sqrt{R_0^2 + (X_0 + X)^2}} \times 100 \\ &= \frac{\sqrt{R_0^2 + (X_0 + X)^2} - X}{\sqrt{R_0^2 + (X_0 + X)^2}} \times 100 \\ &= \frac{\sqrt{0.1615^2 + (0.3645 + 4)^2} - 4}{\sqrt{0.1615^2 + (0.3645 + 4)^2}} \times 100 \\ &= 8.414 \rightarrow 8.41 [\%]\end{aligned}$$

[問5の標準解答]

A：系統の自動復旧（系統復旧の自動化）

B：電線振動

C：系統（過渡）安定度の向上

D：消アークイオン（アーク及びイオン消滅）

E：一相地絡（一線地絡）

F：2回線にわたる一相以上の故障に対し故障相

[問6の標準解答]

(1) A 組織

B 保安教育

C 検査

D 運転

E 記録

(2) 1) 災害時の社内体制の確立（指揮命令系統・情報伝達経路の確立）

2) 災害時の外部機関との協力体制の確立

3) 保全要員，応急資材の調達，確保

4) 事業用電気工作物の予防強化策

5) 事業用電気工作物の運転又は停止手順

6) 災害後の臨時点検の実施

< 機械・制御科目 >

[問 1 の標準解答]

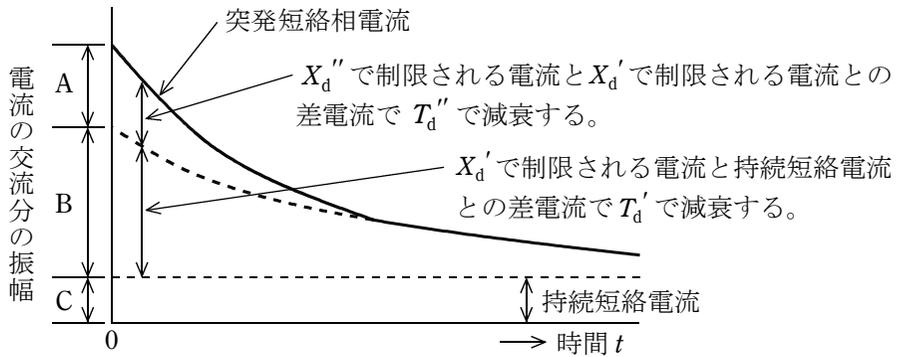
- (1) 突発短絡相電流 i_{ph} の交流分に関して，振幅の第 1 項，第 2 項に相当する部分は過渡交流分を表し， $T_d'' \ll T_d'$ であるから短絡瞬時の値は X_d'' によって制限され，時定数 T_d'' で急速に減衰し，ついで， X_d' によって制限され，時定数 T_d' で次第に減衰する。第 3 項に相当する部分は持続短絡電流で X_d で制限され最後にこの値に落ちつく。したがって，突発短絡相電流 i_{ph} の交流分の振幅の A，B 及び C は次の式で表される。

$$A = \frac{E_0}{X_d''} - \frac{E_0}{X_d'}$$

$$B = \frac{E_0}{X_d'} - \frac{E_0}{X_d}$$

$$C = \frac{E_0}{X_d}$$

(2) 突発短絡相電流 i_{ph} の交流分の振幅の減衰曲線を示す。



(1) の A, B 及び C から

$$\frac{E_0}{X_d''} = A + B + C \text{ となり,}$$

$$X_d'' = \frac{E_0}{A + B + C}$$

$$\frac{E_0}{X_d'} = B + C \text{ から}$$

$$X_d' = \frac{E_0}{B + C}$$

[問2の標準解答]

$$(1) 6600 \times 0.483 \times 0.325 = 1036.0 \rightarrow 1040 \text{ [W]}$$

$$(2) \frac{0.3P_2}{0.3P_2 + P_i + (0.3)^2 P_c} = \frac{0.7P_2}{0.7P_2 + P_i + (0.7)^2 P_c}$$

$$\text{これより, } P_c = 4933.3 \rightarrow 4930 \text{ [W]}$$

ここで, P_2 は定格負荷, P_i は鉄損, P_c は銅損を表す。

(3) 最大効率の条件は, 無負荷損 = 負荷損 すなわち最大効率における運転時の鉄損 = 銅損となる。

$$\text{ゆえに, } 1036.0 = n^2 \times 4933.3 \rightarrow n = 0.45826$$

ここで, n は負荷率を表す。

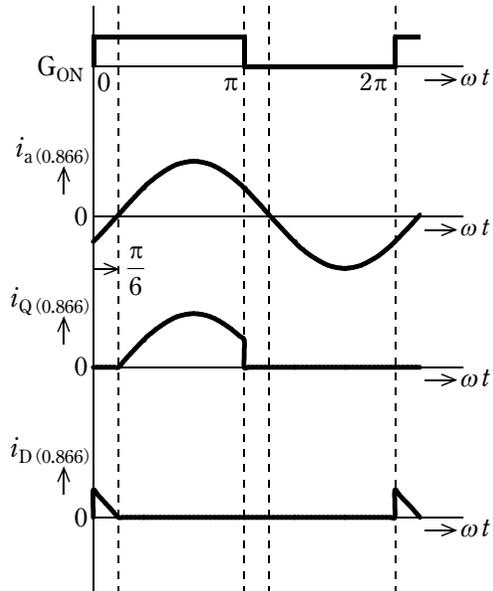
したがって, この変圧器は負荷率 0.45826 のときに最大効率となる。

ゆえにこのときの効率は,

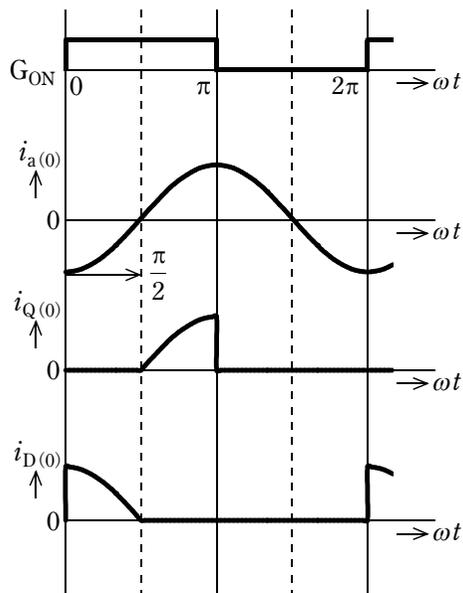
$$\frac{0.45826P_2}{0.45826P_2 + 1036.0 + 1036.0} = 0.98515 \rightarrow 98.5 \text{ [%]}$$

[問3の標準解答]

- (1) 負荷の力率が遅れ $0.866 (\cos \frac{\pi}{6})$ 及び $0 (\cos \frac{\pi}{2})$ の場合の波形は次のようになる。



負荷の力率は遅れ 0.866



負荷の力率は遅れ 0

(2) a相の負荷電流 i_a は、その実効値が 100 [A] であるので、力率角を φ [rad] とすれば、次のように表される。

$$i_a = 100\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \text{ [A]}$$

このとき、IGBT 電流の平均値 I_Q 、及びダイオード電流の平均値 I_D は、 $\omega t = \theta$ と置き換えると、次式で表される。

$$I_Q = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\pi} i_a d\theta \text{ [A]}$$

$$I_D = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\varphi} (-i_a) d\theta \text{ [A]}$$

なお、ダイオード電流の平均値 I_D を求める計算で電流を $-i_a$ としているのは、負荷電流 i_a とダイオード電流 i_D の向きを逆向きとしているためである。

したがって、負荷の力率が遅れ 0.866 の場合の IGBT 電流の平均値 $I_{Q(0.866)}$ は、

$$\begin{aligned} I_{Q(0.866)} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\pi} i_a d\theta = \frac{1}{2\pi} \times 100\sqrt{2} \left[-\cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{\pi}{6}}^{\pi} = -\frac{100\sqrt{2}}{2\pi} \left[\cos\frac{5\pi}{6} - \cos 0 \right] \\ &= -\frac{100\sqrt{2}}{2\pi} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} - 1 \right] = \frac{100\sqrt{2}}{2\pi} \times \frac{\sqrt{3}+2}{2} = 42.000 \rightarrow 42.0 \text{ [A]} \end{aligned}$$

また、負荷の力率が遅れ 0 の場合のダイオード電流の平均値 $I_{D(0)}$ は、

$$\begin{aligned} I_{D(0)} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (-i_a) d\theta = \frac{1}{2\pi} \times 100\sqrt{2} \left[\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{100\sqrt{2}}{2\pi} \left[\cos 0 - \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right] \\ &= \frac{100\sqrt{2}}{2\pi} [1 - 0] = 22.508 \rightarrow 22.5 \text{ [A]} \end{aligned}$$

となる。

[問 4 の標準解答]

(1) 安定解析

$C(s) = K_1$ のときの図 1 のフィードバック制御系の特性方程式は

$$1 + \frac{100K_1}{s(s+1)(s+40)} = 0 \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

となり、 s のべき乗形へ変形すると

$$s^3 + 41s^2 + 40s + 100K_1 = 0 \quad \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

が得られる。ここで、ラウスの安定判別法を適用するために、ラウス表を作成すると

$$\begin{array}{r|ll} s^3 & 1 & 40 \\ s^2 & 41 & 100K_1 \\ s^1 & \frac{1640-100K_1}{41} & 0 \\ s^0 & 100K_1 & \end{array}$$

となり、安定条件は、

$$0 < K_1 < 16.4 \quad (\text{答}) \quad \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

で与えられるので、安定限界を与える K_1 は $K_1 = 16.4$ となる。

また、 $K_1 = 16.4$ (安定限界) のときの持続振動の角周波数 ω_1 は、 $s = j\omega_1$ 及び $K_1 = 16.4$ を②式へ代入することにより

$$\begin{aligned} (j\omega_1)^3 + 41(j\omega_1)^2 + 40j\omega_1 + 1640 &= 0 \\ \Rightarrow (-41\omega_1^2 + 1640) + j\omega_1(40 - \omega_1^2) &= 0 \\ \Rightarrow \omega_1 = \sqrt{40} = 2\sqrt{10} \quad [\text{rad/s}] \quad (\text{答}) &\quad \dots\dots\dots \textcircled{4} \end{aligned}$$

が得られる。

(2) 偏差の計算

$K_1 = 1$ のとき、目標値 $r(t)$ から偏差 $e(t)$ までの伝達関数は

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + \frac{100}{s(s+1)(s+40)}} = \frac{s(s+1)(s+40)}{s(s+1)(s+40)+100} \quad \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

となる。ここで、 $\omega = 1$ のときの周波数伝達関数の絶対値を求めるために、 $s = j\omega = j$ を⑤式に代入して計算すると

$$\begin{aligned} \left| \frac{E(j)}{R(j)} \right| &= \left| \frac{j(j+1)(j+40)}{j(j+1)(j+40)+100} \right| = \left| \frac{j(j+1)(j+40)}{59+39j} \right| = \frac{\sqrt{2}\sqrt{1+40^2}}{\sqrt{59^2+39^2}} \\ &= \frac{\sqrt{3202}}{\sqrt{3481+1521}} = \frac{\sqrt{3202}}{\sqrt{5002}} = 0.80009 \quad \dots\dots\dots \textcircled{6} \end{aligned}$$

となり、偏差の振幅は 0.800 となる。

(3) 補償器の名称

位相進み補償器

(4) 補償器のゲイン特性の折れ線近似

$$C(s) = 10 \times \frac{s+1}{s+10} = \frac{s+1}{\frac{s}{10}+1} \quad \text{の伝達関数より,}$$

次の周波数伝達関数

$$C(j\omega) = \frac{j\omega+1}{\frac{j\omega}{10}+1}$$

のゲイン特性 $20 \log |C(j\omega)|$ を折れ線近似で求める。

分子については、 $\omega = 1$ が折れ点周波数であり、 $\omega < 1$ の範囲ではゲインは 0 [dB]、 $\omega > 1$ の範囲では 20 [dB/decade] の勾配をもつ直線に近似できる。

(図 a を参照)

一方、分母については、 $\omega = 10$ が折れ点周波数であり、 $\omega < 10$ の範囲ではゲインは 0 [dB]、 $\omega > 10$ の範囲では -20 [dB/decade] の勾配をもつ直線に近似できる。(図 a を参照)

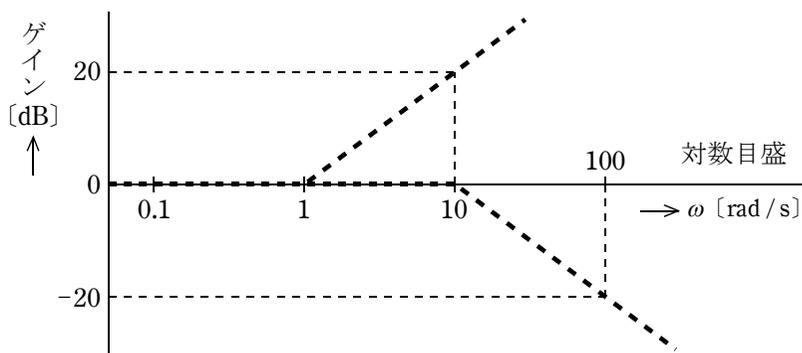


図 a

$C(j\omega)$ のゲイン特性は、この二つの折れ線を合成したもので近似できるので、図 b のように与えられる。

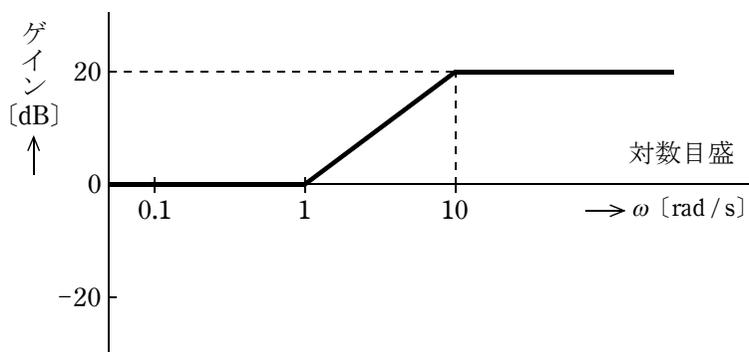


図 b

- (5) 最も大きな特徴は、上記(4)のゲイン特性に示すように、一巡伝達特性（開ループ特性）の高周波域のゲインを高め、ゲイン交さ周波数を高周波域へシフトさせることにより、安定性を補償しつつ、速応性を改善できる。