

同期発電機

(発送配変電二次説明問題に備える)

- 1.突極機と非突極機、
2. フェイザー、
- 3.出力-相差角曲線、
4. 同期発電機の可能出力曲線、
5. 同期発電機の励磁方式、
6. 試送電と自己励磁、短絡比、
7. タービン発電機の冷却法、
8. タービン発電機の特殊問題、
9. 同期発電機の並列運転、
- 10.同期発電機の安定化

参考資料

- 1.電気工学ハンドブック第6版
- 2.現代電力技術便覧

1.突極機と非突極機、水車発電機とタービン発電機

水車発電機は比速度等から最適速度が低く突極機として製造される。
タービン発電機は回転数が早く遠心力対応から円筒状の非突極機として製造される。

突極機は内部リアクタンスとして、直軸分(d)と横軸分(q)の双方を考える必要があるが、非突極機はこの両者の値が等しく、直軸分(d)だけで表現することができる。

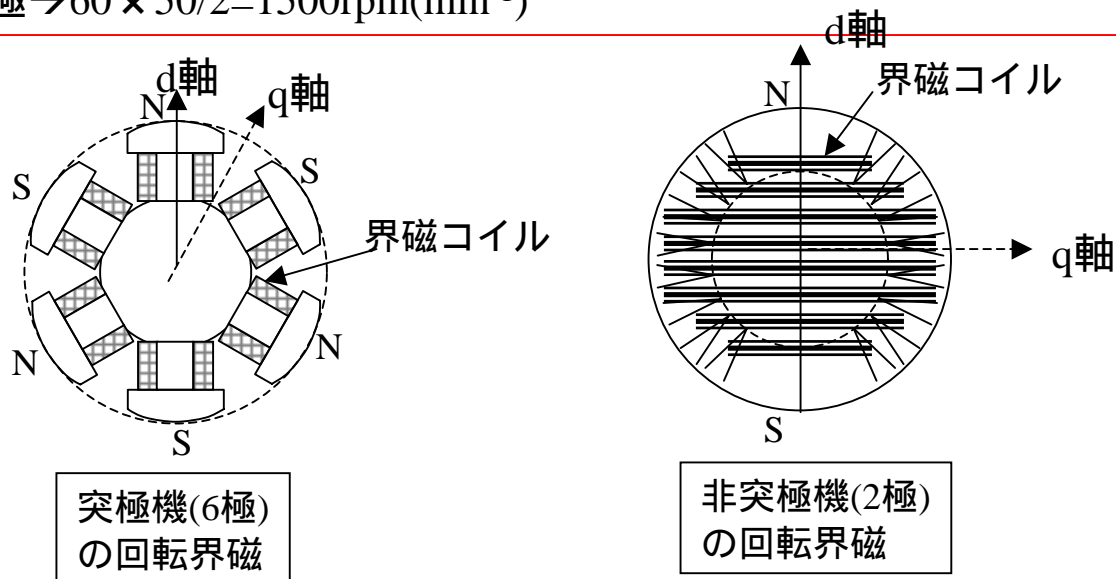
回転数 n は $n = 60 f / P$ f :周波数、 P :極対数=極数/2、

例 $f = 50$, 2極 $\rightarrow 60 \times 50 / 1 = 3000 \text{rpm}(\text{min}^{-1})$

$f = 60$, 6極 $\rightarrow 60 \times 60 / 3 = 1200 \text{rpm}(\text{min}^{-1})$

$f = 50$, 20極 $\rightarrow 60 \times 50 / 10 = 300 \text{rpm}(\text{min}^{-1})$

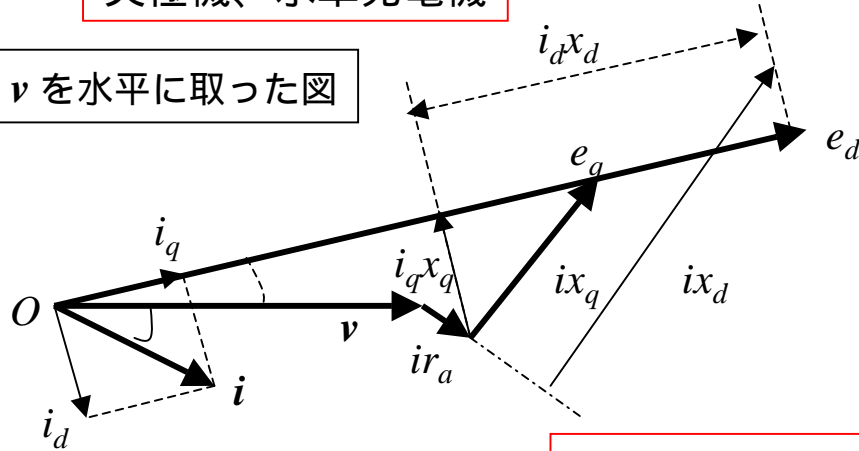
$f = 50$, 4極 $\rightarrow 60 \times 50 / 2 = 1500 \text{rpm}(\text{min}^{-1})$



2.ベクトル図 (フェイザー図)

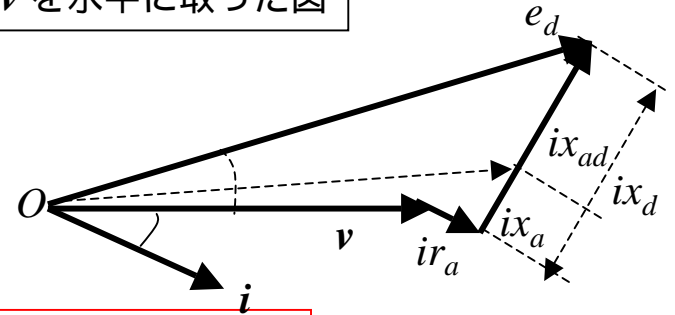
突極機、水車発電機

v を水平に取った図



非突極機、タービン発電機

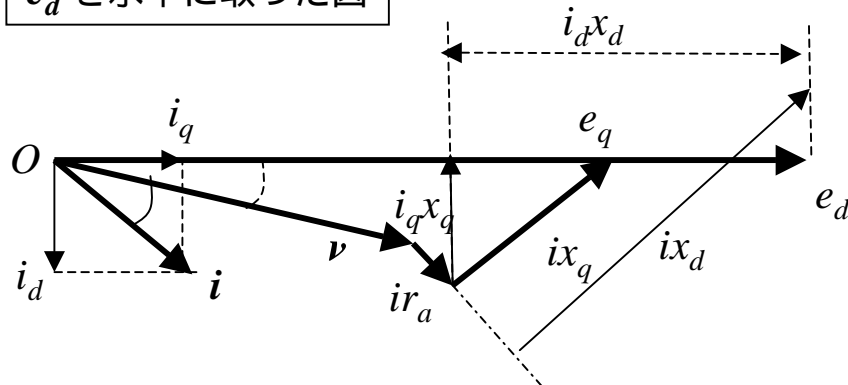
v を水平に取った図



端子電圧 v , 負荷電流 i からスタートする

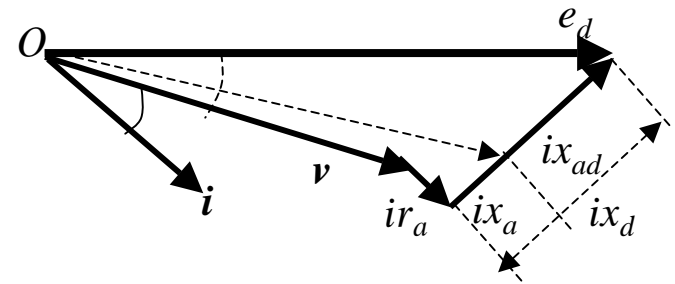
x_a は電機子漏れリアクタンス、 x_{ad} は電機子反作用リアクタンス、 $x_d = x_a + x_{ad}$

e_d を水平に取った図



電機子抵抗 r_a は無視することも多い

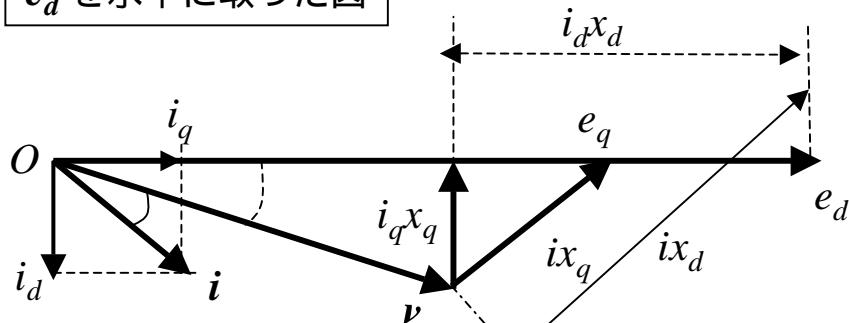
e_d を水平に取った図



左図で $x_q = x_d$ とした場合に等しい

3-1.出力-相差角曲線

e_d を水平に取った図



r_a を無視する。

$$\dot{i} = i_q - j i_d, e_q = e_d - i_d(x_d - x_q) = v \cos \delta + i_d x_q$$

$$\rightarrow i_d = \frac{e_d - v \cos \delta}{x_d}$$

$$v \sin \delta = i_q x_q \rightarrow i_q = \frac{v \sin \delta}{x_q}$$

$$P + jQ = v \dot{i}^* = v \varepsilon^{-j\delta} (i_q + j i_d) = v(\cos \delta - j \sin \delta)(i_q + j i_d)$$

$$= v(i_q \cos \delta + i_d \sin \delta) + jv(-i_q \sin \delta + i_d \cos \delta)$$

$$P = \frac{v^2 \sin \delta \cos \delta}{x_q} + \frac{e_d v \sin \delta - v^2 \cos \delta \sin \delta}{x_d}$$

$$= \frac{e_d v}{x_d} \sin \delta + \frac{v^2}{2} \sin 2\delta \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right)$$

$$Q = -\frac{v^2 \sin^2 \delta}{x_q} + \frac{e_d v \cos \delta - v^2 \cos^2 \delta}{x_d}$$

$$= \frac{e_d v \cos \delta}{x_d} - \frac{v^2(1 - \cos 2\delta)}{2x_q} - \frac{v^2(1 + \cos 2\delta)}{2x_d}$$

$$= \frac{e_d v}{x_d} \cos \delta - \frac{v^2}{2} \frac{x_d + x_q}{x_d x_q} - \frac{v^2 \cos 2\delta}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q}$$

$$= \frac{e_d v}{x_d} \cos \delta - \frac{v^2}{2} \frac{x_q + x_q + x_d - x_q}{x_d x_q} - \frac{v^2 \cos 2\delta}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q}$$

集約すると、

$$P = \frac{e_d v}{x_d} \sin \delta + \frac{v^2(x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin 2\delta = P_1 + P_2$$

$$Q = \frac{e_d v \cos \delta - v^2}{x_d} + \frac{v^2(x_d - x_q)}{2x_d x_q} (1 - \cos 2\delta) = Q_1 + Q_2$$

非突極機(タービン発電機)では、 $x_q = x_d$ として、

$$P = \frac{e_d v}{x_d} \sin \delta \equiv P_1$$

$$Q = \frac{e_d v \cos \delta - v^2}{x_d} \equiv Q_1$$

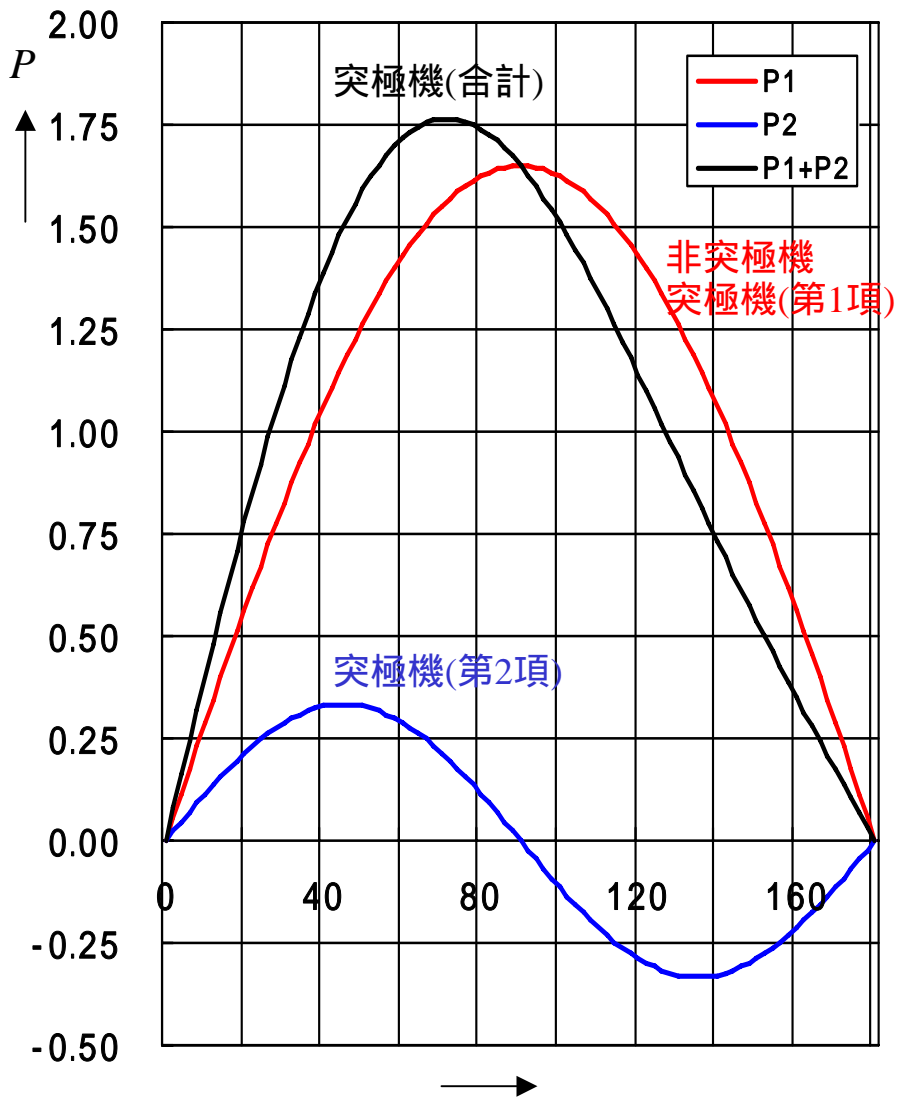
次ページの図参照

3-2.出力-相差角曲線の例

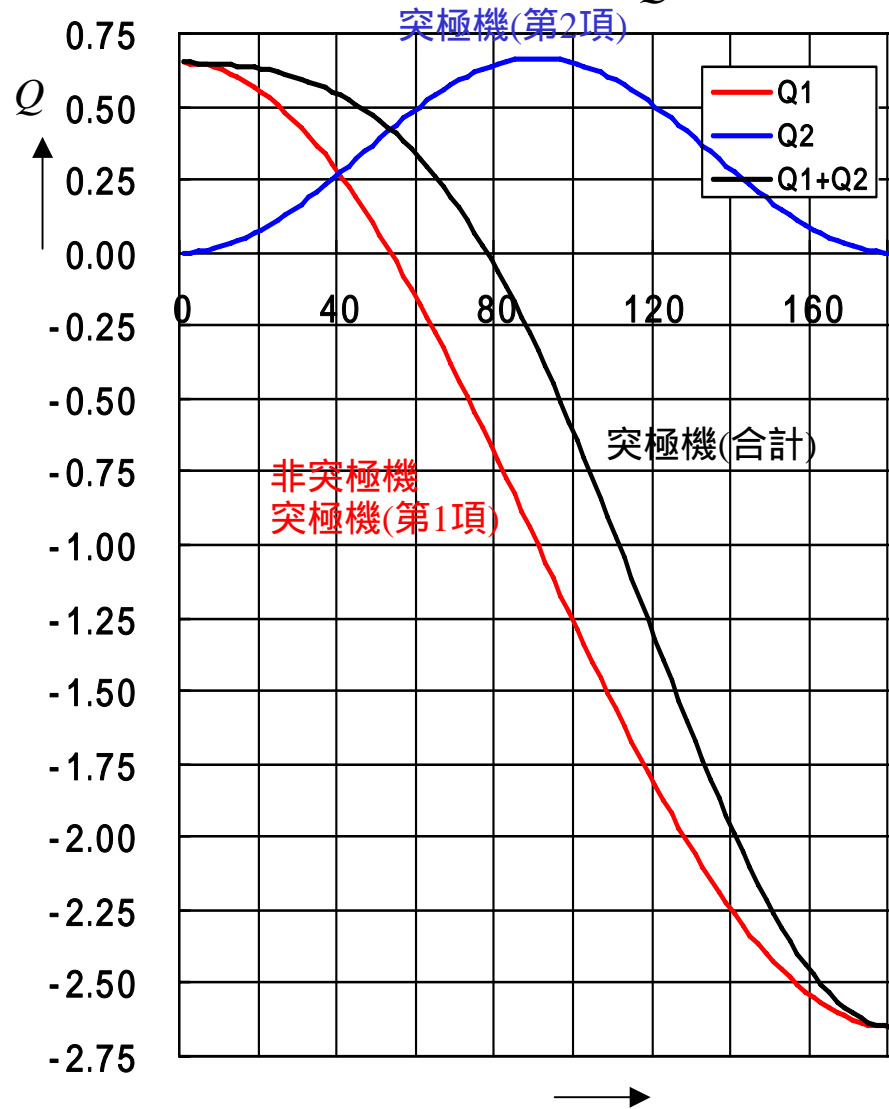
突極機 $e_d = 1.65, v = 1.0, x_d = 1.0, x_q = 0.6$

非突極機 $e_d = 1.65, v = 1.0, x_d = x_q = 1.0$

P- 曲線

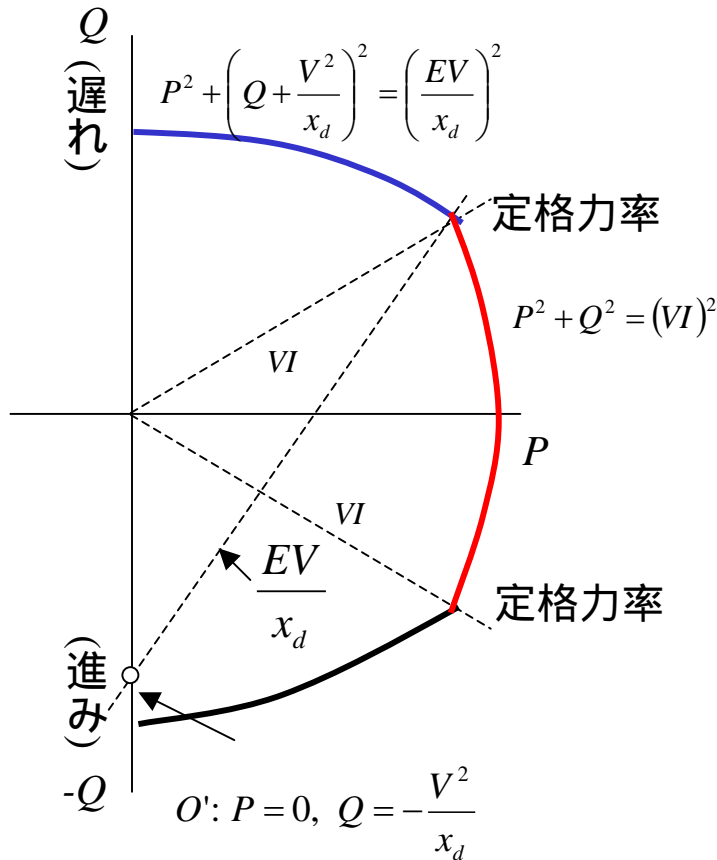


Q- 曲線



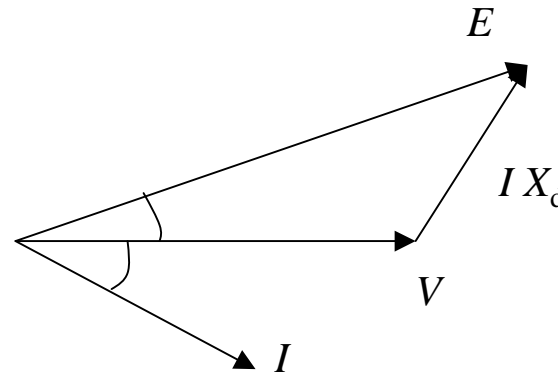
4. 同期発電機の可能出力曲線

同期発電機には下図に示すような容量面での運転限界があり、この曲線を「可能出力曲線(*Capability Curve*)」という。その限界は、3つの部分からなり、**界磁(回転子)電流制約**、**電機子(固定子)電流制約**および、進相運転時の固定子端部鉄心の過熱による制約の3つである。

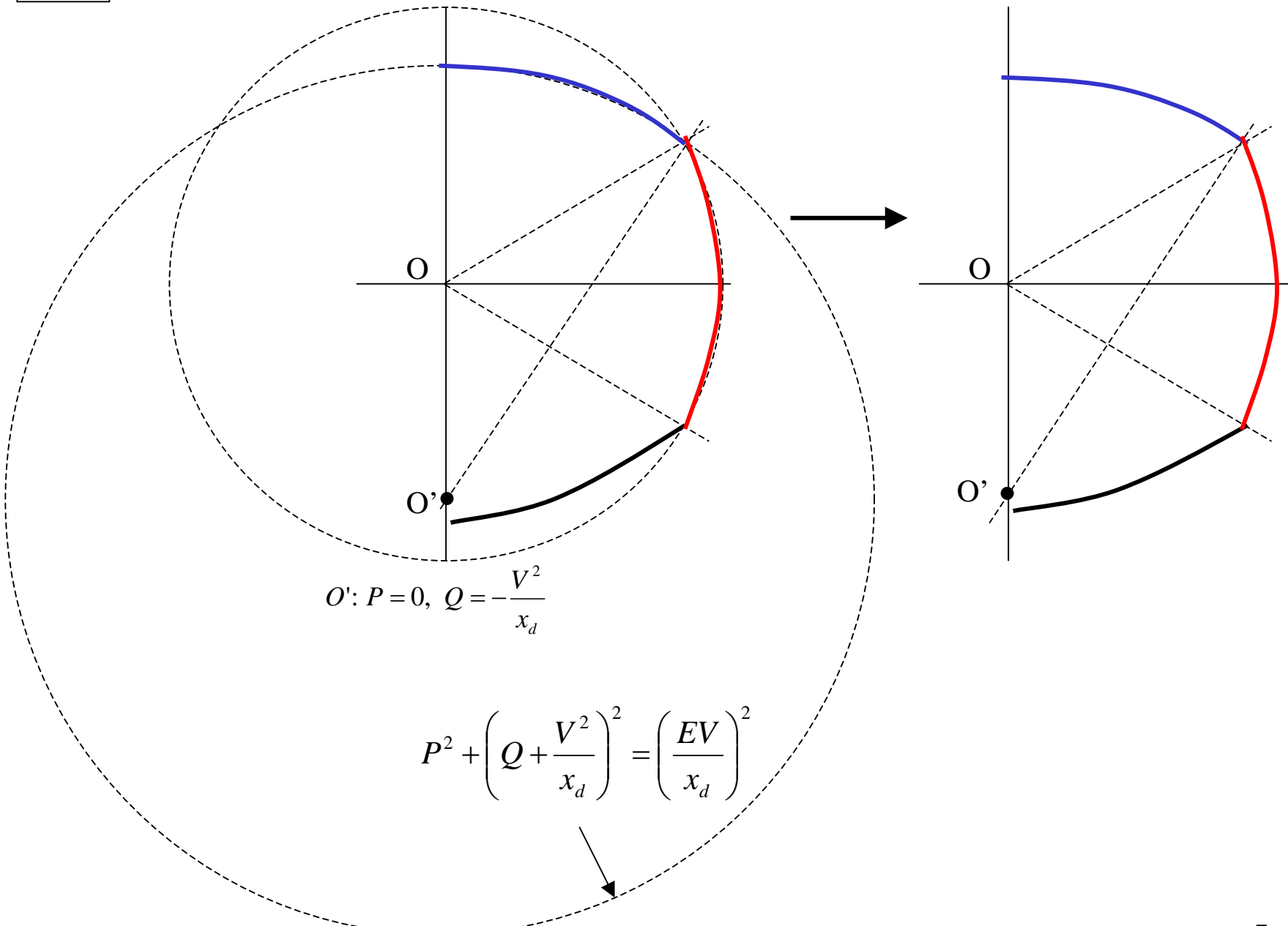


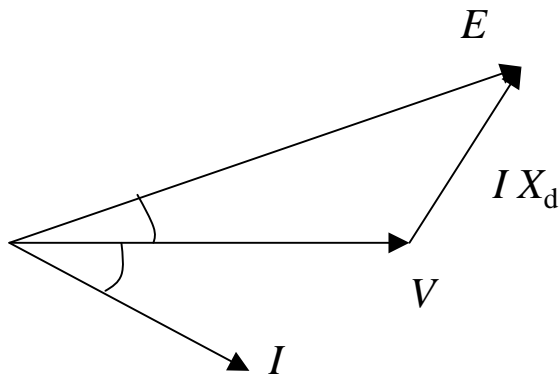
- 青：界磁(回転子)電流制約
- 赤：電機子(固定子)電流制約
- 黒：進相運転時の固定子端部鉄心の過熱による制約

E は内部誘起電圧であるが界磁電流を表すと考えてよい



作図法、 の算出根拠は次ページ以下を参照





界磁電流(回転子電流)による制約

図から、

$$P = VI \cos \theta$$

$$Q = VI \sin \theta$$

$$\frac{\dot{E} - V}{jx_d} = \dot{I} \rightarrow$$

$$P + jQ = V \left(\frac{\dot{E} - V}{jx_d} \right)^* = \frac{V\dot{E}^* - V^2}{-jx_d}$$

$$= \frac{VE(\cos \delta - j \sin \delta) - V^2}{-jx_d}$$

$$= \frac{EV}{x_d} \sin \delta + j \frac{EV \cos \delta - V^2}{x_d}$$

$$= P + jQ$$

$$VI \cos \theta = \frac{EV}{x_d} \sin \delta, \quad VI \sin \theta = \frac{EV \cos \delta - V^2}{x_d}$$

$$VI \sin \theta + \frac{V^2}{x_d} = \frac{EV \cos \delta}{x_d}$$

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{x_d} \right)^2 = \left(\frac{EV}{x_d} \right)^2$$

5. 同期発電機の励磁方式

励磁方式を大別すると次の3つになる。

直流励磁方式

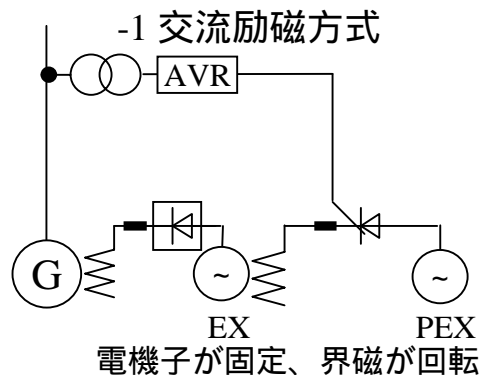
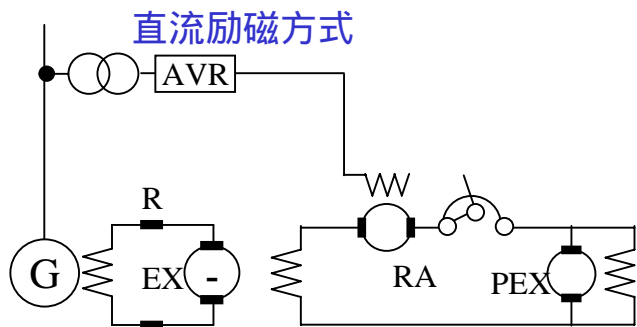
交流励磁方式(ブラシレスを含む)

静止形励磁方式

励磁方式は、歴史的には、直流励磁機方式から始まったが、半導体技術の進歩により現代では、サイリスタ励磁方式やブラシレス励磁方式が広く採用されている。

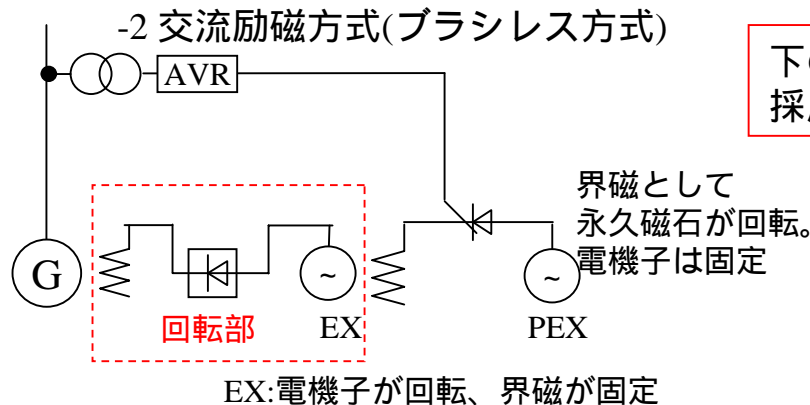
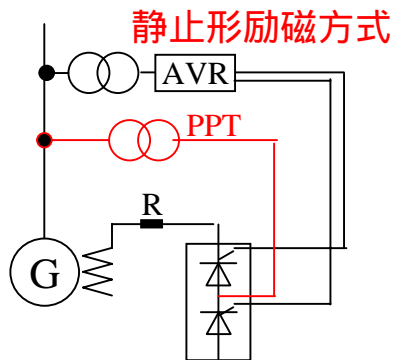
静止形は発電機の界磁電流を直接制御するため応答速度が速い(界磁巻線はほぼ完全なインダクタンスであるため変化入力に対し1段で90度ずつの遅れが出る)

また、発電機の軸振動の影響を受けにくいなどの長所がある。ブラシレスでは、スリップリングおよびブラシが不要であり、機械的な弱点である摺動部がなく保守点検も容易である。



界磁として
永久磁石が回転。
電機子は固定

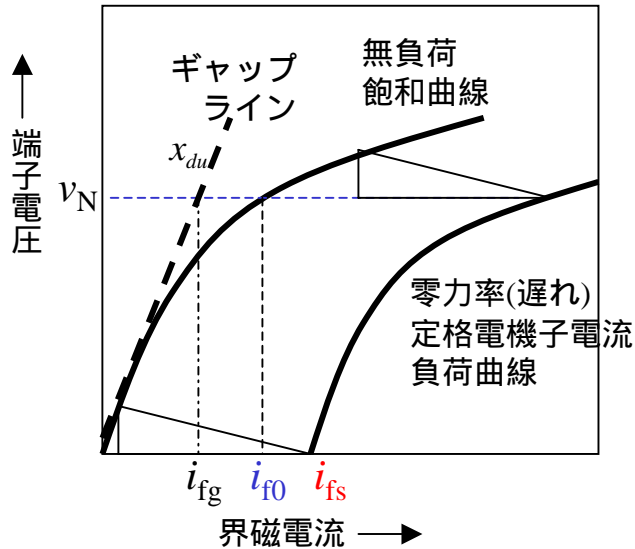
R:スリップリング
EX:励磁機
PEX:副励磁機
PPT:励磁用変圧器
RA:回転増幅器
AVR:自動電圧調整装置



下の二つが広く
採用されている

6. 試送電と自己励磁、短絡比

$$\text{短絡比} = \frac{\text{定格速度で無負荷定格電圧を誘起するのに必要な界磁電流}}{\text{三相短絡時に定格電流に等しい持続短絡電流を流すのに必要な界磁電流}} = \frac{i_{f0}}{i_{fs}} = \frac{1}{x_d}$$



短絡比は飽和直軸同期リアクタンスの逆数に等しい。

すなわち、短絡比 $= \frac{1}{x_d} = \frac{1+\sigma}{x_{du}}$ である。

x_d の値は、水力発電などの突極機では 1.1~1.4[p.u.]
 汽力などの非突極機では、1.7~2.0[p.u.]程度である。

短絡比が大きいと

長所として

リアクタンスが小さい、すなわち、磁気回路の漏洩が少ない鉄機械(材料の鉄が多い機械)となる。

従って、電圧変動率が小さく、安定度向上に貢献する。
 電機子反作用が小さく自己励磁が生じにくく充電可能容量が大きくなる。

一方、短所としては、

短絡比を大きく取ると、鉄心寸法を大きくし、界磁銅量を増して起磁力を大きくする。このため重量が増し、価格が高くなり、また基礎構造物の建設費も上がる。

自己励磁を起こさないようにするためには、不飽和の直軸リアクタンス x_{du} と充電容量リアクタンス x_e の合成値が誘導性であることである。このとき、充電可能な容量 Q は、

$$Q \leq \frac{v^2}{x_{du}} = \frac{v^2}{1+\sigma} \times \text{短絡比} \quad [pu]$$

である (短絡比 $= 1/x_d$) 水力発電参照

7. タービン発電機の冷却法

冷却方式には、導体内に冷媒を通す**直接冷却**と、導体周辺に冷媒を通す**関節冷却**方式がある。比較的低速の水車発電機は間接空気冷却方式が採用される。

タービン発電機では、**電機子巻線は間接冷却、界磁巻線は間接、直接の両冷却方式が採用される。**

1. **空気冷却**は、構造が簡単で運転が容易なこと、電子計算機を用いた解析技術の進歩で、最近では50Hzで300MW、60Hzで240MWまでの大容量化が行われている。

大容量機では、**リバースフロー方式**と呼ばれる方式で、冷媒の流れを通常と逆に、熱交換器→冷却部位→ファン→熱交換器として、ファンを通過しない低温の冷媒を冷却対象に通す方式が採用されている。

2. 一方、**水素冷却**機は冷媒が水素ガスのため**風損**が少なく1955年以降多数製作されている。

水素冷却の利点は

水素の密度が空気の10%程度と低いことから**通風損失や摩擦損失が空気の10%程度**である。

水素の比熱が空気の14倍程度と高いため冷却効果が大い。比熱と密度との積、すなわち、熱容量はほとんど空気と同じであり、同一風量では同一温度上昇になるが、**風損による温度上昇**が空気では10 程度、水素では無視できる程度である。

水素は、**化学的に不活性**であるため**絶縁物の劣化が少なくコロナ発生の電圧が高い**。

水素圧は、間接冷却機で200～300kPag(キロパスカル、ゲージ、2～3 気圧)、直接冷却機で200～500kPagである。ガス圧を上げるほど冷却効果が増加し、同一寸法の機械では、間接冷却5kPagの時の出力を100とすると100kPagでは115、200kPagでは125となる。

水素冷却での問題点は、空気と混合した場合の**爆発の危険性**で、**水素容積比で10～70%**が危険なので自動的に**水素容積比を90%以上に保持**するようにしている。また、軸に沿って機外に漏れないよう油膜による**シール機構**を備え、かつ、**機内圧より高い圧力の油**を軸とシールリングの間に流してガス漏れを防ぐ。

3. 最近では巻線を**直接冷却**する方式として**水素および水冷却**が採用されるようになった。素線の間冷媒の通路を設ける方式および中空導体として冷媒の通路を設ける方式がある。電気的な絶縁が必要な箇所には**絶縁接続管**が挿入される。**回転子の水素冷却**の場合は、回転に伴う圧力差を利用して冷媒を通す。回転子の水冷却では発電機の重量が15～25%軽減される、部分負荷効率が上昇するなどの利点があるが、構造が複雑で信頼性上不利なため、ヨーロッパで4極機に一次採用されて以来用いられていない。

8. タービン発電機の特異問題

タービン発電機は、冷却法の進歩で単位重量当りの出力大きくなり、それに伴う種々の問題に対し、つぎのような構造上の諸対策がとられている。

1. 固定子鉄心端部の漏れ磁束による過熱対策

可能出力曲線の進相運転時の出力制約の原因となっている「固定子鉄心端部の漏れ磁束による過熱」対策として、非磁性体の採用、導電性シールド、電磁鋼板による磁束分路などの対策が取られている。

2. 不平衡負荷運転対策

不平衡負荷では電機子の逆相電流により回転子に定格周波数の2倍の周波数の渦電流が生じ、回転子の表面保持環、くさびの部分を通る。整流器負荷や電気炉など高調波源がある場合も同様である。この対策として、回転子端部に制動導体、短絡環を設けるなどの方法がとられる。

3. 過渡的な電気トルクによる軸ねじりトルク対策

落雷その他電気事故による再閉路などの過渡的な電気トルクにより機過愛的な軸ねじりトルクが生じるので軸系構造上十分な強度が確保されるよう対策がとられる。

9. 同期発電機の並列運転

1. 負荷配分

並列した他の発電機との負荷配分は、**機械的入力**、すなわち原動機の出力によって決まる。すなわち、機械的入力は、水力ではガイドベーン開度、汽力では主蒸気加減弁開度と圧力である。一方、電氣的出力の調整は、系統側から受ける入力、すなわち、周波数の変化により、速度特性曲線と調速機の制御機能により機械的入力を調整する形でも行われる。

2. 電圧

並列状態では端子電圧が等しい。図1に示すように2機の間励磁の差による内部誘起電圧の差 e がある場合には、この電圧差を両機のリアクタンス和 $x_{dA} + x_{dB}$ で除して得られる電流 i が流れこれは内部誘起電圧の高いB機に対し90度遅れで端子電圧を下げ、内部誘起電圧の低いA機に対し90度進みの負荷電流になるので端子電圧を上げ端子電圧は若干上昇し同じになり両機の間**無効横流**が流れ損失を生じる。電圧を上げたい場合はA、B両機の励磁を協調して高めるのがよい。

3. 内部誘起電圧の位相

図2に示すように、無限大母線(系統内の対象発電機以外の全発電機の総合と考えてよい)に並列された発電機の内部誘起電圧の位相が端子電圧に対し だけ増加した時、その電気出力は $P = e_d v \sin(\) / x_d$ から $P' = e_d v \sin(\ + \) / x_d$ (この差はPの微分から、 $P = (dP/d \) = e_d v \cos(\) / x_d$) に増加し、機械的入力が変わらなければ減速し が減少する。すなわち、元の位相に戻ろうとする力が働く。その大きさは、位相のずれ1rad当たり $P_s = e_d v \cos(\) / x_d$ である。 P_s を「**同期化力**」という。 P_s を定格角速度 ω_n で割った値は「**同期化トルク**」と呼ばれる。

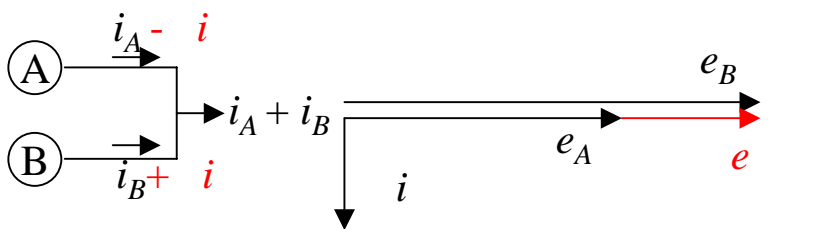


図1 励磁の差

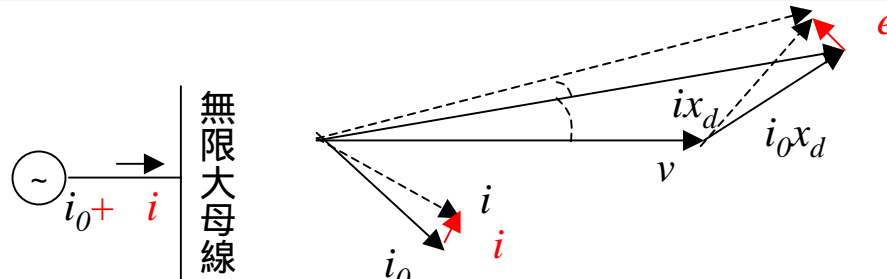


図2 内部誘起電圧の位相差

10-1. 同期発電機の動揺に対する安定化 動揺方程式、運動方程式

制動や同期化力を無視し、慣性項で表した単純な回転系の運動方程式は

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_m - T_e :$$

J : 慣性モーメント、 T : トルク、 m, e : 機械的、電氣的
 $\times \omega_m$ 両辺に定格角速度を乗じる。

$$M \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = P_m - P_e$$

$$M = J \omega_m$$

$$\theta_m = \omega_m t + \delta_m$$

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e$$

注. $J \omega_m$ は厳密には定数ではないが周波数の変化が小さいとして定数とみなす。

$$\frac{M}{S_B} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \bar{P}_m - \bar{P}_e \quad [pu]$$

S_B : 定格容量または基準容量 MVA, S_b : 同左 kVA 単位

$$\frac{M}{S_B} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{J \omega_m}{S_B} \left(\frac{\omega_B}{\omega_B} \right) \left(\frac{2}{p} \right) \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{J \omega_m}{S_B} \frac{\omega_B}{\omega_B} \frac{1}{(p/2)} \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

$$= \frac{J \omega_m^2}{S_B \omega_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \left(\frac{2H}{\omega_B} \right) \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_m^2}{S_B} \quad [\text{秒}] : \text{蓄積運動エネルギー} [MJ / \text{定格 MVA}]$$

$$T_S = 2H = J \omega_m^2 / S_B$$

$$= GD^2 / 4 * (2\pi N / 60)^2 / S_B$$

$$= GD^2 * N^2 / S_B * \pi^2 / 60^2$$

$$= 2.74156 / 1000 * GD^2 * N^2 / S_B$$

$$= 2.74156 * GD^2 [kg \cdot m^2] * (N[rpm] / 1000)^2 / S_b [kVA] [\text{秒}]$$

T_S = 加速定数、 H = 単位慣性定数(1967, HB), $\bar{M} = M / S_B = T_S / \omega_B$
 ここで制動項 D および同期化項 K を加え一般化する。

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + D \frac{d\delta_m}{dt} + K \delta_m$$

$$= \frac{T_S}{\omega_B} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + D \frac{d\delta_m}{dt} + K \delta_m = P_m - P_e$$

D : 制動

K : 同期化力

$$\delta: \text{負荷角} = \delta_m \frac{p}{2}$$

p : 極数 = 極対数 $\times 2$

$$\omega_B: \text{電気角速度} = \omega_m \frac{p}{2}$$

J : 慣性モーメント

θ_m : 静止軸に対する位相角

T_m : 正味機械的入力

T_e : 電磁トルク

10-2. 同期発電機の動揺に対する安定化

運動方程式は、次式で表される。

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + D \frac{d\delta_m}{dt} + K \delta_m = P_m - P_e$$

系統事故などが原因で一時的に電気出力が減少し、機械的入力
は急には変化しないので右辺がプラスになり、これにより左辺
の δ_m が一旦増加して動揺が生じる。この時 δ_m が変化するが、こ
れが減衰振動するなど一定値に落ち着かせることが出来れば、
安定であるといい、位相差が拡大し続けるとき、または振動が
長時間継続するとき不安定であるという。

動揺を抑制するには、 M, D, K の効果を大きくする方法と、左辺
の $(P_m - P_e)$ の絶対値を小さくすればよい。

① M を大きくする、すなわち、フライホイールなどの採用。

② 制動項 D の対策は、制動巻線の採用、 PSS (*Power System Stabilizer*)の採用がある。

③ K では、電気的出力が、送受2点の位相差を θ 、電圧を e, v として、

$$P_e = \frac{ev}{x} \sin \theta, \quad (p.4, \text{非突極機の場合})$$

この場合 x には発電機内部リアクタンスに加え送受両地点間の
系統のリアクタンスを含む。

この場合の同期化力は、 $K = \frac{dP_e}{d\theta} = \frac{ev}{x_d} \cos \theta$ となるので、これを

大きくするには、 θ を小さく、 ev/x_d を大きくする。 P_e 一定なら

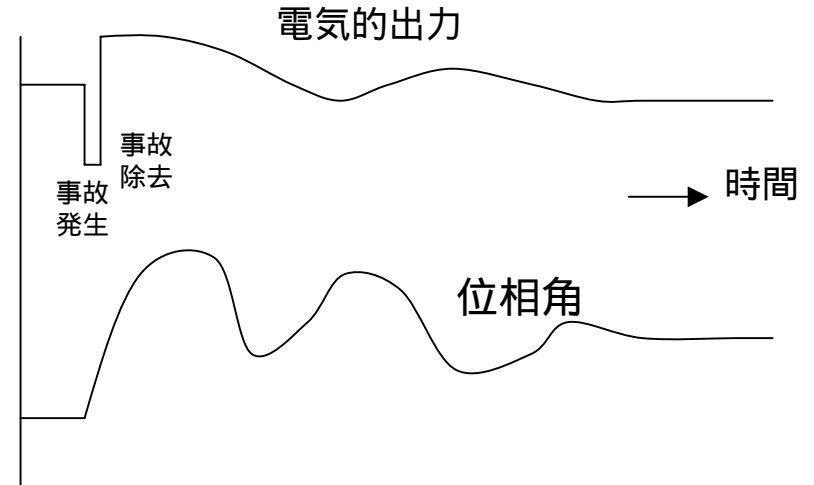
③(a) x を小さくする。すなわち、2点間のリアクタンスを小さくする

③(b) 電圧を高くする。

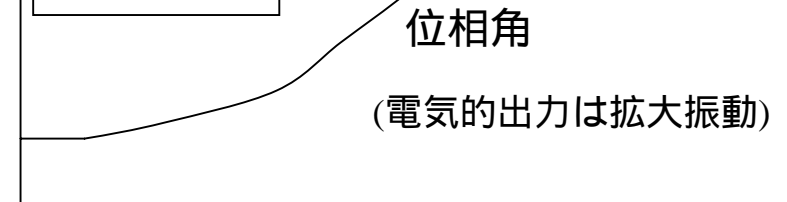
すなわち、並列回路の建設、高電圧の採用が有効である。

④ 右辺から蒸気バイパスで機械的入力 P_m を一次減少する制御も有効。

安定化する例



不安定な例1



不安定な例2

