

固有値法による同期機の固有定態安定領域の解析 (第1報)

——制動巻線なし突極形同期機——

田村 淳二**

武田 郁夫**

(昭和62年4月30日受理)

Analysis of Inherent Steady State Stability of Synchronous Machines by the Eigen Values Method (Part 1)

—Damper-less Salient-pole-type Synchronous Machines—

by Junji TAMURA and Ikuo TAKEDA

This paper presents an analysis of the inherent steady state stability of damper-less salient-pole-type synchronous machines. Although some methods have been used for this problem, this paper uses eigen values method because it gives the most exact solutions for the problem and both step-out and hunting instabilities can be evaluated by using the method.

The effects of various parameters on the steady state stable region of synchronous machines are discussed in this paper. At first, the characteristics of the eigen values of synchronous machines are considered after deriving the linearized version of basic differential equations, and it is shown that the steady state stability of synchronous machines is generally determined by the three dominant eigen values. Next, calculations of the steady state stable regions for the various circuit conditions of a synchronous generator system are carried out, and the effects of circuit parameters on the stable region, especially on the hunting region, are discussed.

1. ま え が き

本稿では、同期機の固有定態安定領域に関して固有値法により検討を加える。但し本報においては、最も基本的な場合として制動巻線のない同期機を取り扱う。

同期機の固有定態安定性においては、基本的に二つの不安定現象が問題となる。つまり脱調と乱調である。前者の脱調に対しては、特に単機系統においては $dP/d\delta$ 法が最も代表的な解

* 電気学会電力技術研究会 (昭和60年7月) および同回転機研究会 (昭和61年1月) にて発表 (参考文献 1, 2)

** 北見工業大学電気工学科

析法であると考えられる³⁾。一方、乱調に対しては、脱調の場合における $dP/d\delta$ 法ほど確立された手法というものはないが、中でも回転子の微小正弦波振動を仮定して制動トルク係数を求める手法はその歴史も長く^{4)~7)}、代表的な解析法であると言える。但し、この手法には振動周波数をあらかじめ仮定しなければならないという欠点があり、この周波数の推定においては少なからず問題がある。この様に、乱調に対してはいまだ確実な近似的解析法が確立されていないというのが現状である。

これらに対し固有値法は、近似手法というよりは直接的な精密解法であることから、解析的な取り扱いがほとんどの場合困難となり、数値的な解しか得られない点や、またその計算もそれ程簡単ではないという欠点はあるものの、定態安定性に対しては最も確実かつ正確な方法である。またその結果からは、単なる安定判別のみならず、微小な擾乱に対してどのようなふるまいをするかという判断を下すこともできる。筆者らは既に文献(8)において、脱調および乱調に対する新しい解析手法を提案すると同時に、上述の固有値法による定態安定領域の簡単な検討結果を示したが、本稿ではこの結果に加えてさらに同期機および外部送電線の各回路パラメータの安定領域への影響に特に重点をおいて詳細に検討を行なう。

2. 基礎理論⁹⁾

本稿で対象とする解析モデルは、突極形同期発電機による一機無限大母線系統とする。但し送電線は直列インピーダンスのみからなり、また固有定態安定性を扱うので発電機の各種制御機構は考慮しない。この場合の基礎微分方程式は、二軸理論によって以下の様に表わされる。

$$\left. \begin{aligned} v_d &= -(R_a + pL_D) i_d + pL_{md} i_f - e_{vd} \\ v_q &= -(R_a + pL_Q) i_q - e_{vq} \\ v_f &= (r_f + pL_f) i_f - pL_{md} i_d \\ e_{vd} &= -\omega_m L_Q i_q \\ e_{vq} &= -\omega_m (-L_D i_d + L_{md} i_f) \\ \tau_D &= J \cdot p\omega_m + \tau_G \\ \tau_G &= -(e_{vd} i_d + e_{vq} i_q) / \omega_m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

但し、

$$\left. \begin{aligned} R_a &= r_r + r_a \\ L_D &= l_r + L_d = l_r + l_a + L_{md} \\ L_Q &= l_r + L_q = l_r + l_a + L_{mq} \\ L_f &= l_f + L_{md} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

以上において、

p : 微分演算子 ($=d/dt$)

r_r, l_r : 送電線の直列抵抗およびインダクタンス

- r_a, r_f : 電機子および界磁各巻線抵抗
 l_a, l_f : 電機子および界磁各もれインダクタンス
 L_{md}, L_{mq} : d, q 軸各励磁インダクタンス
 ω_m : 回転子角速度
 J : 回転部分の慣性モーメント
 τ_G, τ_D : 電氣的発生トルクおよび原動機トルク

である。

次に、(1) 式の基礎方程式の線形化方程式を導出する。まず、無限大母線電圧を

$$v_a = \sqrt{2} V_B \cos \omega t \quad (3)$$

とおくと (但し、 ω は同期角速度であり、 b, c 相電圧は位相がそれぞれ $2\pi/3, 4\pi/3$ 遅れているとする)、その d, q 軸成分との関係は次式で表わされる。

$$[\sqrt{3} v_0 v_d v_q]^T = [C_\theta] [v_a v_b v_c]^T \quad (4)$$

但し、

$$[C_\theta] = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\begin{array}{ccc} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{array} \right] \quad (5)$$

$$\theta = \omega t + \theta_0$$

ここで、 θ は電機子 a 相磁軸と d 軸 (界磁々軸) 間の相差角である。ところで、無負荷状態 ($i_d = i_q = 0$) において電機子に発生する電圧は (1) 式より

$$\left. \begin{array}{l} v_{d0} = 0 \\ v_{q0} = \omega L_{md} i_{f0} \end{array} \right\} \quad (6)$$

となり、これより 3 相の電機子無負荷誘起電圧は、

$$[e_{a0} e_{b0} e_{c0}]^T = [C_\theta]^{-1} \cdot [0 \quad 0 \quad \omega L_{md} i_{f0}]^T \quad (7)$$

つまり、

$$\left. \begin{array}{l} e_{a0} = \sqrt{2/3} \cdot \omega L_{md} i_{f0} \cos(\omega t + \theta_0 + \pi/2) \\ \therefore \dot{E}_0 = E_0 \varepsilon^{j(\theta_0 + \pi/2)} = \sqrt{1/3} \cdot \omega L_{md} i_{f0} \cdot \varepsilon^{j(\theta_0 + \pi/2)} \end{array} \right\} \quad (8)$$

となる。負荷角 δ は発電機においては、

$$\delta = \angle \dot{E}_0 - \angle \dot{V}_a \quad (9)$$

と定義されるので、よって (3) 式より

$$\theta_0 = -\pi/2 + \delta \quad (10)$$

の関係のあることが分る。よって、上式を (4), (5) 式に代入して、

$$\left. \begin{aligned} v_d &= \sqrt{3} V_B \sin \delta \\ v_q &= \sqrt{3} V_B \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

が得られる。一方, (5), (10) 式より

$$\omega_m = p\theta = \omega + p\delta \quad (12)$$

となる。以上で得られた (1), (11), (12) 式を定常動作点 ($\delta = \delta_0$, $\omega_m = \omega$ および無負荷誘起電圧 E_0) において線形化すると, その結果が次式となる。なお添字 Δ は定常値からの変化を表わす。

$$p[\Delta i_d \ \Delta i_q \ \Delta i_f \ \Delta \delta \ \Delta \omega_m]^T = \begin{bmatrix} -\frac{L_f R_a}{L_{Df}^2} & \frac{\omega L_Q L_f}{L_{Df}^2} & -\frac{L_{md} r_f}{L_{Df}^2} & -\frac{L_f \sqrt{3} V_B \cos \delta_0}{L_{Df}^2} & \frac{L_Q L_f i_{q0}}{L_{Df}^2} \\ -\frac{\omega L_D}{L_Q} & -\frac{R_a}{L_Q} & \frac{\omega L_{md}}{L_Q} & \frac{\sqrt{3} V_B \sin \delta_0}{L_Q} & \frac{-L_D i_{d0} + L_{md} i_{f0}}{L_Q} \\ -\frac{L_{md} R_a}{L_{Df}^2} & \frac{\omega L_{md} L_Q}{L_{Df}^2} & -\frac{L_D r_f}{L_{Df}^2} & -\frac{L_{md} \sqrt{3} V_B \cos \delta_0}{L_{Df}^2} & \frac{L_{md} L_Q i_{q0}}{L_{Df}^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{(L_{md} - L_{mq}) i_{q0}}{J} & \frac{(L_{md} - L_{mq}) i_{d0} - L_{md} i_{f0}}{J} & -\frac{L_{md} i_{q0}}{J} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \\ \Delta i_f \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

但し,

$$\left. \begin{aligned} L_{Df}^2 &= L_D L_f - L_{md}^2 \\ i_{d0} &= \{-\sqrt{3} V_B (R_a \sin \delta_0 + \omega L_Q \cos \delta_0) + \omega L_Q \sqrt{3} E_0\} / (R_a^2 + \omega L_D \omega L_Q) \\ i_{q0} &= \{-\sqrt{3} V_B (-R_a \cos \delta_0 + \omega L_D \sin \delta_0 + R_a \sqrt{3} E_0) / (R_a^2 + \omega L_D \omega L_Q) \\ i_{f0} &= \sqrt{3} E_0 / \omega L_{md} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

上式の固有値を種々の δ_0 , E_0 に対して計算し, 安定判別を行なうことにより, 定態安定領域図を求めることができる。

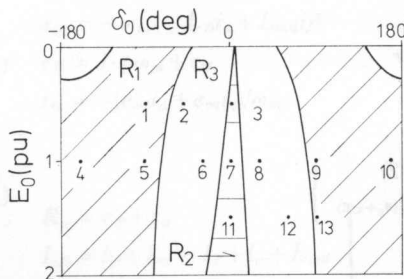


図1 安態安定領域 ($r_r = 0.1$ pu, $l_r = 0.3$ pu, $H = 5$ sec)

Fig. 1. Steady state stable region ($r_r = 0.1$ pu, $l_r = 0.3$ pu, $H = 5$ sec).

表1 モデル定数

Table 1. Constants of the model

r_a	0.01 pu
l_a	0.1 pu
L_d	1.0 pu
L_q	0.7 pu
L'_d	0.3 pu
L_f	1.16 pu
r_f	0.0007 pu
T'_d	1.5 sec
T'_{d0}	5.0 sec
ω	100 π rad/s
J	5 sec (注1)
r_r	0.1 pu
l_r	0.3 pu

(注1) 蓄積エネルギー定数 H における値

(注2) 上記の値は全て自己容量ベース値

3. 固有値の特性⁸⁾

図1に前述の固有値法により求めた定態安定領域図を示す。数値計算モデルの定数は、表1に示してある。同図において、領域 R_1 は脱調領域を、領域 R_2 は乱調領域を、領域 R_3 は安定な領域をそれぞれ表わしている。なお、負荷角 δ_0 が $-180 \sim 0$ 度の範囲が電動機としての動作領域、 $0 \sim 180$ 度の範囲が発電機としての動作領域である。各領域の固有値の構造による基本的な定義は、脱調領域は少なくとも一つの正の実根が存在する領域、また乱調領域は正の実部を有する共役複素根が存在する領域ということである。もちろん、安定領域は全ての固有値が安定根となる場合である。これらは実際の現象ともよく合致している。なお、正の実根と正の実部を有する共役複素根が同時に存在するような領域は、通常の数値においては現れない。

次に、表2に図1中に示してある各運転点における固有値の実際の値を示してある。これらの結果からまず分ることは、5個の固有値のうちの2根 (λ_4, λ_5) は運転点に関係なくほとんど一定値となっており、

$$\lambda_4, \lambda_5 \doteq -\frac{1}{T_{a(srs)}} \pm j\omega \quad (15)$$

にて十分近似表現できることである (表2を見る限り上式で完全に表現できるかのように思われるが、定数によっては多少ずれる場合もあり、あくまでも近似式である)。ここで $T_{a(srs)}$ は送電線も含めた場合の電機子時定数であり、次式で表わされる。

表2 図1中の各運転点における固有値の値 (sec⁻¹)Table 2. Eigen values at each operating points in figure 1 (sec⁻¹)

No.	E_0 (pb)	δ_0 (度)	$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	λ_4, λ_5
1	0.5	-90	0.190, -0.306 ± j 4.18	-46.1 ± j 314
2	0.5	-50	-0.0933, -0.165 ± j 4.60	-46.1 ± j 314
3	0.5	0	0.00278 ± j 4.36, -0.430	-46.1 ± j 314
4	1.0	-160	4.02, -0.450, -3.99	-46.1 ± j 314
5	1.0	-90	0.249, -0.334 ± j 3.80	-46.1 ± j 314
6	1.0	-30	-0.0414 ± j 5.36, -0.336	-46.1 ± j 314
7	1.0	0	0.00740 ± j 5.55, -0.433	-46.1 ± j 314
8	1.0	30	-0.0388 ± j 5.76, -0.340	-46.1 ± j 314
9	1.0	90	0.0906, -0.254 ± j 5.15	-46.1 ± j 314
10	1.0	170	3.81, -0.525, -3.71	-46.1 ± j 314
11	1.5	0	0.0128 ± j 6.53, -0.435	-46.1 ± j 314
12	1.5	60	-0.114 ± j 6.47, -0.180	-46.1 ± j 314
13	1.5	90	0.0710, -0.240 ± j 5.44	-46.1 ± j 314

(注) $1/T_{a(srs)} = 46.1 \text{ sec}^{-1}$.

$$T_{a(sys)} = \frac{2(l_r + L'_d) L_Q}{R_a(l_r + L'_d + L_Q)} \tag{16}$$

ここで、 L'_d は発電機自体の過渡リアクタンスである。一方、残りの3固有値 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ は、表2から分るように運転点によってその構成および値が大幅に変化し、またその実部の絶対値も一般にかなり小さい。従って、これら3固有値が同期機の安定、不安定を決定する支配的固有値になっていると行うことができる。数値計算結果をもとにこれら3根の構成を各領域に対応してまとめると、以下ようになる。

1) 安定な場合 ($a, b, c > 0$ とする)

$$-a \pm jb, -c$$

2) 乱調の場合

$$a \pm jb, -c$$

3) 脱調の場合

$$-a \pm jb, c \text{ および } -a, -b, c$$

上記の他の構成となる場合もないわけではないが、通常の数値においては非常にまれである。

以上により、同期機の固有値の基本的な特性が明らかとなった。

4. 各回路定数の定態安定領域への影響

本章では、同期機および送電線の各回路定数の定態安定領域への影響について詳細に検討する。一般に、脱調領域は励磁インダクタンスの影響は大きく受けるが、その他のパラメータによる影響は小さいのに対して、乱調領域の方はほとんどすべての回路パラメータの影響を受けるので、ここでは乱調領域の特性に特に重点をおいて検討を行なう。なお、数値計算モデルの定数は以後の各表中に示してあるもの以外はすべて表1の値を用いている。

4.1 送電線直列インピーダンスの影響

まず初めに、表3に送電線抵抗 r_r の影響に対する計算結果を示す。同表において、乱調

表3 r_r の影響 ($l_r = 0.3 \text{ pu}, H = 5 \text{ sec}$)
Table 3. Effect of r_r ($l_r = 0.3 \text{ pu}, H = 5 \text{ sec}$)

r_r (pu)	乱調領域幅 ($E_0 = 1 \text{ pu}$)	図番号
0.0	5 (-2 ~ 2)	1
0.05	15 (-7 ~ 7)	
0.1	23 (-11 ~ 11)	
0.2	34 (-16 ~ 17)	
0.3	44 (-21 ~ 22)	
0.4	53 (-26 ~ 26)	2
0.5	61 (-31 ~ 29)	

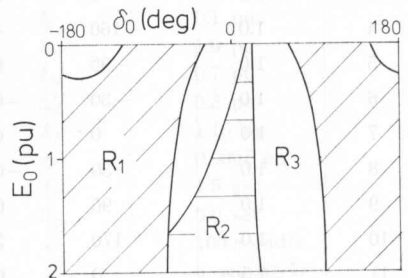


図2 安態安定領域 ($r_r = 0.4 \text{ pu}, l_r = 0.3 \text{ pu}, H = 5 \text{ sec}$).

Fig. 2. Steady state stable region ($r_r = 0.4 \text{ pu}, l_r = 0.3 \text{ pu}, H = 5 \text{ sec}$).

領域幅とは $E_0=1$ pu における乱調領域の存在する範囲を負荷角 δ_0 の幅として示したものであり、かつこ内はその範囲を表わしている。この結果より、 r_T が大きい程乱調領域が増大することが分るが、このことは従来からも言われている⁴⁾。さらに図2を見ると、 E_0 大 (過励磁) な程乱調領域はより広い範囲に存在すること、および発電機領域よりも電動機領域においてより乱調になりやすいことなどが明確に分る。なお、脱調領域は図1および図2の比較により、その形はほとんど変化せず左右にスライドすることが解る。

次に、表4に送電線インダクタンス l_T の影響に対する計算結果を示す。これより、 l_T が大きいほど乱調領域が減少することが分るが、その変化はかなり小さい。なお、このことは従来から、 l_T が小さくなると r_T の値が相対的に大きくなるので乱調になりやすい、という形で説明されている。また、脱調領域の方は図1と図3との比較により、その形がわずかに変化することが分る。

表4 l_T の影響 ($r_T=0.1$ pu, $H=5$ sec)

Table 4. Effect of l_T ($r_T=0.1$ pu, $H=5$ sec)

l_T (pu)	乱調領域幅 ($E_0=1$ pu)	図番号
0.0	23 (-11~11)	1
0.1	23 (-11~11)	
0.2	23 (-11~11)	
0.3	23 (-11~11)	
0.4	23 (-11~11)	
0.5	22 (-10~11)	
0.7	21 (-10~10)	3
1.0	21 (-10~10)	
1.5	19 (-9~9)	

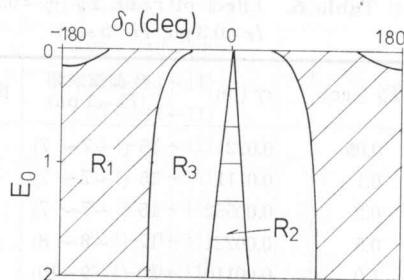


図3 定態安定領域 ($r_T=0.1$ pu, $l_T=1.5$ pu, $H=5$ sec).

Fig. 3. Steady state stable region ($r_T=0.1$ pu, $l_T=1.5$ pu, $H=5$ sec).

4.2 慣性定数の影響

本節では、回路定数ではないが非常に重要なパラメータである慣性定数 H の影響について検討するが、その計算結果を表5に示す。ここでは同期電動機も含めて実際的にありうる範囲内で H を変えて計算を行なった。同表より、 H が小さいほど乱調になりやすいことは非常に明白である。同期電動機の場合には一般に慣性が小さく (H は1秒程度) また r_T の比較的大きな低圧送電系統に接続される場合が多いので、制動巻線がなければかなり乱調になりやすいということになる。一方、 H が大きくなると乱調領域はしだいに減少していくが、5秒程度以上ではほとんど飽和してしまう傾向にある。なお、脱調領域は H が変わっても全く変化しないようである。

4.3 界磁の回路定数の影響

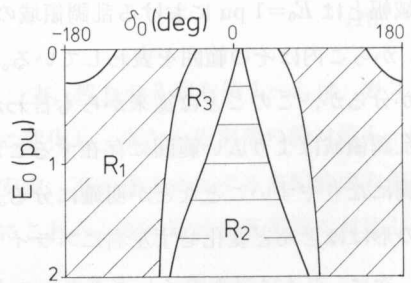
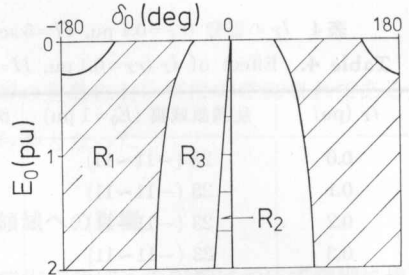
本節では、界磁回路の定数の影響について検討する。まず初めに、界磁巻線抵抗 r_f の影響に関する計算結果を表6に示す。同表より、 r_f が大きい (T_d' が小さい) 程乱調領域が減少す

表5 H の影響 ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu)Table 5. Effect of H ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu)

H (sec)	乱調領域幅 ($E_0=1$ pu)	図番号
0.2	116 (-53~62)	4
0.5	66 (-31~34)	
1.0	56 (-22~23)	
2.0	33 (-16~16)	
3.0	27 (-13~13)	
5.0	23 (-11~11)	1
7.0	21 (-10~10)	
10.0	19 (-9~9)	
15.0	17 (-8~8)	

表6 r_f (T'_d) の影響 ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu, $H=5$ sec)Table 6. Effect of r_f or T'_d ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu, $H=5$ sec)

T'_d (sec)	r_f (pu)	乱調領域幅 ($E_0=1$ pu)	図番号
0.05	0.0221	15 (-7~7)	5
0.1	0.0111	15 (-7~7)	
0.2	0.00552	15 (-7~7)	
0.5	0.00221	17 (-8~8)	
1.0	0.00110	20 (-9~10)	
1.5	0.00074	23 (-11~11)	1
2.0	0.00055	25 (-12~12)	
3.0	0.00037	30 (-14~15)	

図4 定態安定領域 ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu, $H=0.5$ sec).Fig. 4. Steady state stable region ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu, $H=0.5$ sec).図5 定態安定領域 ($T'_d=0.05$ sec).Fig. 5. Steady state stable region ($T'_d=0.05$ sec).

ることが解る。同期電動機等の T'_d の小さな一部の同期機を除けば、ほとんどの電力系統用同期発電機では T'_d が大きく、特に大容量機程大きい。従って、制動巻線や安定化制御機構等がなければ非常に乱調になりやすいということが言える。

次に、界磁巻線もれインダクタンス l_f の影響に対する計算結果を表7に示す。これより、 l_f が大きい程乱調になりやすいことが解るが、しかしながらその変化の割合はそれほど大きくはない。このことは、 l_f が大きくなると相対的に r_f の値が小さくなり、その結果として乱調になりやすくなる、という形で説明できるものと思われる。

なお、脱調領域の方は、 r_f , l_f のいずれの影響も全く受けないという結果となった。

4.4 励磁インダクタンスの影響

最後に、励磁インダクタンス L_{md} , L_{mq} の影響について検討する。その結果を表8に示す。これより、乱調領域は L_{md} の影響はあまり受けないが、 L_{mq} の影響は比較的大きく受けることが解る。一方、脱調領域もこれら励磁インダクタンスの影響をかなり受けることが解るが、特に図7は興味深い。これはいわゆる円筒形同期機の場合であり、同図の様に脱調に対する安定

表7 l_f の影響 ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu, $H=5$ sec)

Table 7. Effect of l_f ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu, $H=5$ sec)

l_f (pu)	L'_d (pu)	T'_d (sec)	乱調領域幅 ($E_0=1$ pu)	図番号
0.05	0.147	0.605	17 (-8~8)	6
0.10	0.190	0.821	19 (-9~9)	
0.15	0.229	1.04	19 (-9~9)	1
0.20	0.264	1.25	21 (-10~10)	
0.26	0.3	1.5	23 (-11~11)	
0.30	0.325	1.69	24 (-11~12)	
0.35	0.352	1.90	25 (-12~12)	

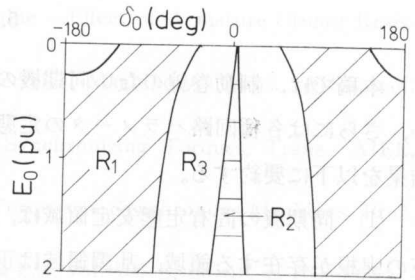


図6 定態安定領域 ($l_f=0.05$ pu).

Fig. 6. Steady state stable region ($l_f=0.05$ pu).

表8 L_{md} , L_{mq} の影響 ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu, $H=5$ sec)

Table 8. Effect of L_{md} and L_{mq} ($r_T=0.1$ pu, $l_T=0.3$ pu, $H=5$ sec)

L_{md} (pu)	L_{mq} (pu)	L'_d (pu)	T'_d (sec)	乱調領域幅 ($E_0=1$ pu)	図番号
0.6	0.6	0.280	1.48	25 (-12~12)	1
0.7	0.6	0.288	1.49	23 (-11~11)	
0.8	0.6	0.295	1.50	23 (-11~11)	
0.9	0.6	0.300	1.50	23 (-11~11)	
1.0	0.6	0.305	1.50	23 (-11~11)	
1.1	0.6	0.308	1.51	23 (-11~11)	
1.2	0.6	0.312	1.51	22 (-10~11)	
1.3	0.6	0.315	1.51	22 (-10~11)	
1.4	0.6	0.317	1.51	22 (-10~11)	
1.5	0.6	0.320	1.52	21 (-10~10)	
1.6	0.6	0.322	1.52	21 (-10~10)	
0.9	0.3	0.300	1.50	36 (-17~18)	
0.9	0.4	0.300	1.50	30 (-14~15)	
0.9	0.5	0.300	1.50	26 (-12~13)	
0.9	0.7	0.300	1.50	21 (-10~10)	
0.9	0.8	0.300	1.50	19 (-9~9)	7
0.9	0.9	0.300	1.50	17 (-8~8)	

注) $l_a=0.1$ pu, $l_f=0.26$ pu, $r_f=0.0007$ pu.

限界は負荷角のみで決まり、励磁の大きさには依存しないことが解る。突極形であるか円筒形であるかの違い、つまりは $L_{md}=L_{mq}$ であるか否かの違いは、定常特性的にはいわゆる反作用トルク成分により説明できるが、以上の結果から、定態安定領域の観点から見れば、両者の差は脱調の限界が励磁の強さ(界磁電圧の大きさ)に依存するかしらないかであると言えることができる。

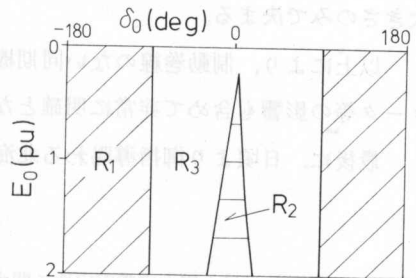


図7 定態安定領域 ($L_{md}=L_{mq}=0.9$ pu).

Fig. 7. Steady state stable region ($L_{md}=L_{mq}=0.9$ pu).

5. あとがき

本稿では、制動巻線のない同期機の固有定態安定領域に関して固有値法による検討を行ない、さらには各種回路パラメータの定態安定領域への影響について詳細に考察した。得られた結果を以下に要約する。

(1) 同期機の固有定態安定領域は、固有値の構造によって、脱調領域は少なくとも一つの正の実根が存在する領域、乱調領域は正の実部を有する共役複素根が存在する領域、安定な領域は当然のことながらすべての固有値が安定根となる領域、という形で分類定義できる。

(2) 5個の固有値のうちの2根は、運転状態等に関係なくほぼ一定値となり、(15)式にて近似表現できる。残りの3根は、運転点によってその値および構造が大幅に変化し、同期機の定態安定性を決定する支配的固有値となっている。

(3) 同期機の電機子直列抵抗（送電線直列抵抗）は乱調領域に対して非常に大きな影響を有しており、これが大きい程乱調領域は増大する。一方インダクタンス分については、これが大きい程わずかではあるが乱調領域が減少する。なお、これら両者の脱調領域への影響は比較的小さい。

(4) 乱調領域は過励磁（無負荷誘起電圧が大きい）なほど広い範囲に存在し、また発電機領域よりも電動機領域の方に多く存在する。

(5) 慣性定数は乱調領域に対して非常に大きく影響し、これが小さいほど乱調領域は増大する。一方、脱調領域は慣性定数には全く影響されない。

(6) 界磁巻線インピーダンスの乱調領域への影響に関しては、抵抗分が大きいほどまたはインダクタンス分が小さいほど乱調領域が減少するが、その変化の大きさは比較的小さい。一方、脱調領域はこれら両者の影響は全く受けない。

(7) 励磁インダクタンスの乱調領域への影響に関しては L_{mq} の影響が比較的大きく、これが小さいほど乱調領域が増大する。一方、脱調領域もこれらの影響を大きく受けるが、特に円筒形同期機 ($L_{md} = L_{mq}$) では脱調に対する安定限界が励磁の強さには無関係となり、負荷角の大きさのみで決まる。

以上により、制動巻線のない同期機の固有定態安定領域の基本的な特性が、各種回路パラメータ等の影響も含めて非常に明確となった。

最後に、日頃より御指導賜わる北海道大学工学部、長谷川 淳教授に感謝申し上げます。

文 献

- 1) 田村他：同期機の固有定態安定性に関する一考察．電気学会電力技術研究会資料，PE-85-91（昭和60年7月）。
- 2) 田村他：同期機の固有定態安定性に関する一考察（続報）．電気学会回転機研究会資料，RM-86-6（昭和61年1月）。

- 3) E. W. Kimbark: Power System Stability, Dover Publ., 1968.
- 4) C. A. Nickle et al.: Stability of Synchronous Machine —Effect of Armature Circuit Resistance, Trans. AIEE, vol. 49, p. 338, 1930.
- 5) G. Kron: Equivalent Circuit for the Hunting of Electrical Machinery, Trans. AIEE, vol. 61, p. 290, 1942.
- 6) C. Concordia: Synchronous Machine Damping and Synchronizing Torques, Trans. AIEE, vol. 70, p. 731, 1951.
- 7) D. P. S. Gupta et al.: Synchronizing and Damping Torques in Synchronous Machines, Proc. IEE, vol. 114, p. 1451, 1967.
- 8) 田村他: 同期機の新しい定態安定度解析理論. 電気学会論文誌, vol. 106-B, no. 10, p. 859, 1986.
- 9) 猪狩: 電気機械理論. コロナ社.

Analysis of Inherent Steady State Stability of Synchronous Machines by the Eigen Values Method (Part II)
 Ballast-Loaded Synchronous Machines with Drooper Windings
 By Jiro Tanaka and Hisa Tanaka

This paper presents an analysis of the inherent steady state stability of salient-pole synchronous machines with drooper windings. The eigen value method is used to analyze the stability in the present paper. Since the general purpose of the analysis is to determine the inherent stability, the paper focuses the study on the hunting region.

First, the basic linearized differential equations for a synchronous generator with drooper windings are derived and the characteristics of the eigen values are studied. It is shown that the steady state stability is determined by the three real eigen values in the same way as in a damped-free system. Next, the inherent steady state stable regions for the various circuit conditions are studied with respect to circuit parameters. In particular, the effects of drooper circuit parameters on the hunting limits are discussed in detail.

目 次

序言 1
 1. 同期機の固有定態安定領域の解析 1
 2. 同期機の固有定態安定領域の解析 1
 3. 同期機の固有定態安定領域の解析 1
 4. 同期機の固有定態安定領域の解析 1
 5. 同期機の固有定態安定領域の解析 1
 6. 同期機の固有定態安定領域の解析 1
 7. 同期機の固有定態安定領域の解析 1
 8. 同期機の固有定態安定領域の解析 1
 9. 同期機の固有定態安定領域の解析 1
 10. 同期機の固有定態安定領域の解析 1