

変動負荷に対する同期機の 等価リアクタンスについて

村 井 国 昭*

The Equivalent Reactance of Synchronous Generator on Fluctuating Load

Kuniaki MURAI

要 旨

同期機端子電圧の変動周波数に対する, AVR を含めた同期機の等価リアクタンスの計算について報告する。

Synopsis

This paper reports about the calculation of equivalent reactance of synchronous generator with AVR caused by fluctuating frequency of terminal voltage.

I. 諸 言

電弧炉は平素はその負荷率, 力率ともに高く電力系統にとっては望ましい負荷であるが, ただその起動時にはスクラップが頻繁に電極間を短絡することにより, 炉変圧器の2次短絡の状態になって低力率の大幅な負荷変動が発生し, これにともなう電力系統の電圧変動が重要な問題になってくる。

電力系統は AVR, AFC 等の自動制御装置によって一定電圧, 一定周波数を維持しているが, これらの制御系はいずれも時間遅れを有するので負荷の急変による電圧変動, 周波数変動はさけられない。

この点に鑑み, まず始めに電弧炉が1機の発電機に接続されている場合を考え, 変動周波数に対する等価同期機リアクタンスを求め, さらに AVR と電圧変動の関係を調べたので報告する。

II. 基本式の誘導

同期機の基本式は, 二反作用法の Park の方程式より次のようである。

電圧の式

電機子:

$$v_d = -r_a i_d + p\phi_d - \phi_q \omega$$

$$v_q = -r_a i_q + p\phi_q + \phi_d \omega$$

界 磁:

$$v_f = r_f i_f + p\phi_f$$

制動回路:

$$0 = r_{kd} i_{kd} + p\phi_{kd}$$

$$0 = r_{kq} i_{kq} + p\phi_{kq}$$

磁束鎖交の式

電機子:

$$\phi_d = x_{ad} i_{fd} + x_{ad} i_{kd} - x_{ad} i_d$$

$$\phi_q = x_{aq} i_{kq} - x_q i_q$$

界 磁:

$$\phi_{fd} = x_{ffd} i_{fd} + x_{fk} i_{kd} - x_{ad} i_d$$

制動回路:

$$\phi_{kd} = x_{fk} i_{fd} + x_{kk} i_{kd} - x_{ad} i_d$$

$$\phi_{kq} = x_{kk} i_{kq} - x_{aq} i_q$$

ここで, $x_{kkd} = x_{ad} + x_{kd}$

$$x_{ffd} = x_{ad} + x_{fd}$$

$$x_{kkq} = x_{aq} + x_{kq}$$

ここに, v : 電圧 ϕ : 磁束鎖交数

p : d/dt i : 電流

d : 直軸 q : 構軸

f : 界磁巻線 k : ダンパ

上式の基本式より同期機リアクタンスを導びくに当り, これをブロックダイアグラムに表示し, 解をアナログ計算機により求めるために便利な式を誘導すると(1)式となる。ただし $p\phi_{ad}$, $p\phi_{aq}$, すなわち, 空隙磁束鎖交の変化率項と飽和を無視する。

* 講師 電気工学科

$$\left. \begin{aligned} v_d &= -x_{ad} p i_d - r_a i_d - \phi_q \frac{\omega}{\omega_0} \\ \phi_{fd} &= \frac{\omega_0}{p} \left[\frac{r_f}{x_{ad}} E_{fd} - \frac{r_f}{x_{fd}} (\phi_{fd} - \phi_{ad}) \right] \\ \phi_d &= \phi_{ad} - x_{ad} i_d \\ \phi_{ad} &= x_{ad}'' \left(-i_d + \frac{\phi_{fd}}{x_{fd}} + \frac{\phi_{kd}}{x_{kd}} \right) \\ \phi_{kd} &= \frac{r_{kd}}{x_{kd}} \cdot \frac{\omega}{p} (\phi_{ad} - \phi_{kd}) \\ v_q &= -x_{aq} p i_q - r_a i_q - \phi_d \frac{\omega}{\omega_0} \\ \phi_q &= \phi_{aq} - x_{aq} i_q \\ \phi_{aq} &= x_{aq}'' \left(-i_q + \frac{\phi_{kq}}{x_{kq}} \right) \\ \phi_{kq} &= \frac{r_{kq}}{x_{kq}} \cdot \frac{\omega_0}{p} (\phi_{aq} - \phi_{kq}) \end{aligned} \right\} (1)$$

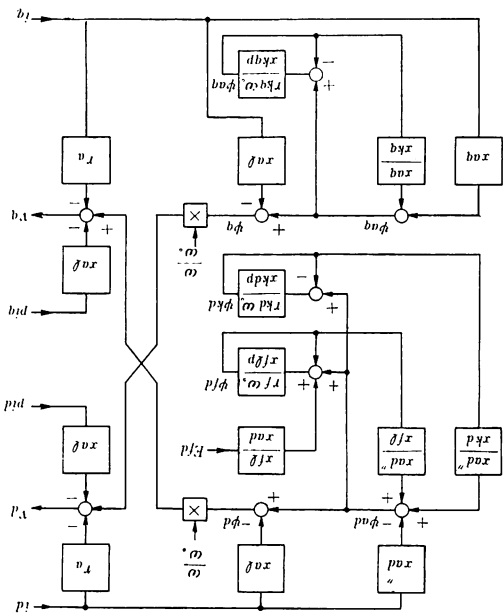
ここで, $\frac{1}{x_{ad}''} = \frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fd}} + \frac{1}{x_{kd}}$
 $\frac{1}{x_{aq}''} = \frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{kq}}$

III. ブロック線図の等価変換による解

(1) 式のブロック線図は第1図のようになる。これを等価変換を繰返し, $x_d(s)$ および $x_q(s)$ を求めるに, 基本式(1)および第1図で判明する通りこのままでは直軸, 構軸の分離が出来なく, また直軸伝達関数は3次式となる。電圧変動に関する問題では, 同期機の電機子抵抗 r_a , $p i_d$, $p i_q$ を無視し, かつ電機子の過渡現象を無視しても影響が少ないので, すなわち $\omega = \omega_0$ とする。等価回路は第2図に示す様に電機子回路部が多少簡略化され, また直軸, 構軸分離が可能となる。

ここで, 励磁機および AVR 回路の伝達関数 $G(s)$ は, 第2図で v_q 端子の変化分 Δv_q を feed back する如く示しているが, 実際は端子電圧 v_t を用いなければいけない。

すなわち, 負荷変化による電流の変化分をそれぞれ Δi_d , Δi_q とし, それにともなって同期機端子電圧変化分を Δv_d , Δv_q とすれば



第1図 同期機のブロックダイヤグラム

$$v_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}$$

$$(v_t + \Delta v_t)^2 = (v_d + \Delta v_d)^2 + (v_q + \Delta v_q)^2$$

いま, $(\Delta v_t)^2$, $(\Delta v_d)^2$, $(\Delta v_q)^2$ は微小であるゆえ消略すると

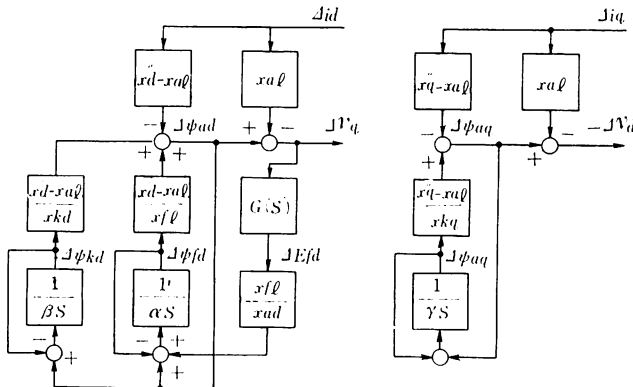
$$\begin{aligned} \Delta v_t &= \frac{v_q}{v_t} \Delta v_q + \frac{v_d}{v_t} \Delta v_d \\ &= \frac{v_q}{\sqrt{v_d^2 + v_q^2}} \Delta v_q + \frac{v_d}{\sqrt{v_d^2 + v_q^2}} \Delta v_d \\ &= \Delta v_q \cos \theta + \Delta v_d \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

しかるに, $v_q \gg v_d$ なるゆえ $\sin \theta \doteq 0$, $\cos \theta \doteq 1$ となる。

したがって

$$\Delta v_t \doteq \Delta v_q \quad (3)$$

が成立ち



第2図 簡易同期機ブロックダイヤグラム

$$\Delta E_{fd} = G(s) \Delta v_q \quad (4)$$

としている。

第2図の同期機ブロック線図を、等価変換を繰返しとまとめてみると、(5)式のような等価リアクタンスを表示できる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{-\Delta v_q}{\Delta i_d} &= X_d(s) \\ &= \frac{X_d \{1 + (T_{d'}' + T_{dk'}') S + T_{d'}' T_{d0}''\} S^2}{1 + (T_{d0}' + T_{dk0}') S + T_{d0}' T_{d0}'' S^2 - (1 + \beta S) G(s)} \quad (5) \\ \frac{\Delta v_d}{\Delta i_d} &= X_q(s) = \frac{x_q (1 + T_{q0}'' S)}{1 + T_{q0}'' S} \\ x &= \frac{x_{fl}}{\omega_0 r_f}, \quad \beta = \frac{x_{kd}}{\omega_0 r_{kd}}, \quad \gamma = \frac{x_{kq}}{\omega_0 r_{kq}} \\ T_{d0}' &= \frac{x_{ad} + x_{fl}}{\omega_0 r_f}, \quad T_{d'}' = \frac{x_{d'}'}{x_d} T_{d0}' \\ T_{d0}'' &= \frac{x_{kd} + x_{ad}'}{\omega_0 r_{kd}}, \quad T_{d''}'' = \frac{x_{d''}''}{x_d'} T_{d0}'' \\ T_{dk0}' &= \frac{x_{ad} + x_{kd}}{\omega_0 r_{kd}}, \quad T_{dk'}' = \frac{x_{d''}''}{x_d'} T_{dk0}' \\ x_{d''}'' &= x_{al} + \frac{x_{ad} x_{kd}}{x_{ad} + x_{kd}} \\ T_{q0}'' &= \frac{x_{aq} + x_{kq}}{\omega_0 r_{kd}}, \quad T_{q''}'' = \frac{x_{q''}''}{x_q} T_{q0}'' \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで(6)式のように、 x は界磁回路のみ、 β は直軸制動巻線のみ、 γ は構軸制動巻線のための仮定の時定数とも云うべきものであり、 T_{d0}' 、 $T_{d'}'$ 、 T_{d0}'' 、 $T_{d''}''$ 、 T_{q0}'' 、 $T_{q''}''$ は周知の時定数である。

T_{d0}' : 直軸開路過渡時定数

$T_{d'}'$: 直軸短絡過渡時定数

T_{d0}'' : 直軸開路初期過渡時定数

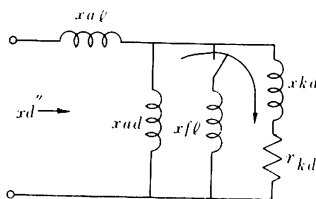
$T_{d''}''$: 直軸短絡初期過渡時定数

ここで新しく用いた時定数として T_{dk0}' 、 $T_{dk'}'$ がある。第3図から T_{d0}'' は x_{fl} を考えるが、 T_{dk0}' はこれと考える場合であり、また $T_{dk'}'$ は同じく $T_{d''}''$ に対して x_{fl} を考えない場合に相当する。すなわち

T_{dk0}' : 電機子開路界磁洩漏無視時の初期過渡時定数

$T_{dk'}'$: 電機子短絡界磁洩漏無視時の初期過渡時定数

となり、 $x_{d''}''$ はこの時の端子から見たリアクタンスである。



第3図 T_{dk0}' 、 $T_{dk'}'$ の時定数

$X_d(s)$ 式において、 s の1次項では分母の T_{d0}' は x_{kd} を考えない時定数、 T_{dk0}' は x_{fl} を考えない時定数の和となり、同じく分子では $T_{d'}'$ は x_{kd} を考えず端子短絡、 $T_{dk'}'$ は x_{fl} を考えず端子短絡の場合の時定数の和となる。

IV. 計算例

(5)式を計算するにあたって、諸数値は(6)、(7)式の関係より、実測可能な数値を与えると容易に計算できる。

$$\left. \begin{aligned} x_d &= x_{al} + x_{ad} \\ x_{d'}' &= x_{al} + x_{ad}' = x_{al} + \frac{x_{ad} x_{fl}}{x_{ad} + x_{fl}} \\ x_{d''}'' &= x_{al} + x_{ad}'' = x_{al} + \frac{x_{ad}' x_{kd}}{x_{ad}' + x_{kd}} \\ x_q &= x_{al} + x_{aq} \\ x_{q''}'' &= x_{al} + x_{aq}'' = x_{al} + \frac{x_{aq} x_{kq}}{x_{aq} + x_{kq}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

数値例として、いま $G(s) = 0$ すなわち励磁一定とし、次の値を

$$x_d = 1.17, \quad x_{ad} = 1.03, \quad x_{al} = 0.14, \quad x_{kd} = 0.092$$

$$x_{fl} = 0.267, \quad x_q = 0.75, \quad r_{aq} = 0.61, \quad x_{kq} = 0.115$$

$$r_a = 0.0121, \quad r_{kd} = 0.0302, \quad r_f = 0.0302, \quad r_{kq} = 0.039$$

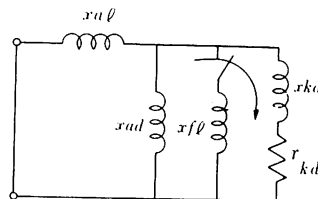
(5)式に代入すれば(8)式となる。

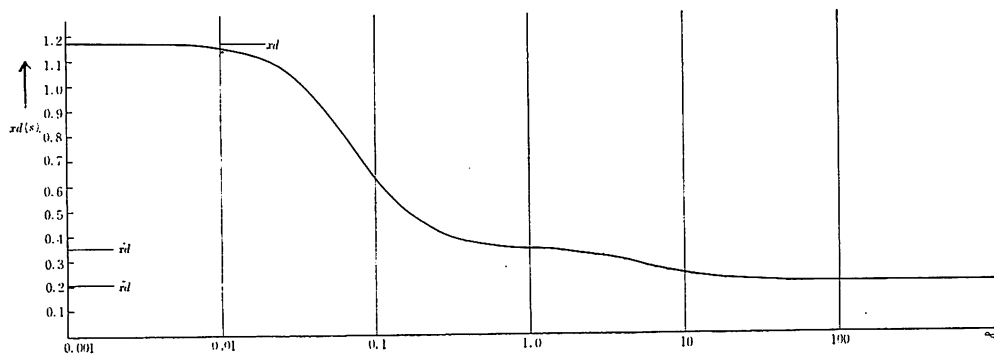
$$\left. \begin{aligned} X_d(s) &= \frac{1.17 + 1.29S + 0.01863S^2}{1 + 2.966S + 0.09124S^2} \\ X_q(s) &= \frac{0.75 + 0.01401S}{1 + 0.05917S} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

電圧変化の周波数を変えてプロットした同期機等価リアクタンスが、直軸で第4図、構軸で第5図となる。ここで x_d 、 $x_{d'}'$ 、 $x_{d''}''$ は図示の如くで 30Hz 以上では $x_{d''}''$ に等しくなる。構軸においても同様に 30Hz 以上の変動に対しては $x_{q''}''$ になることを示している。

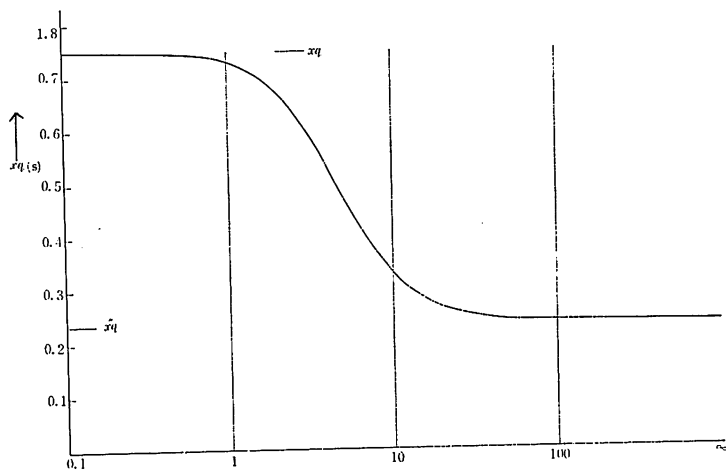
V. アナログ計算機による直接解

AVR をつけた場合には、この励磁回路が $X_d(s)$ に含まれてくるわけで、変動周波数に応じて考慮を要する。AVR を増巾度 μ のみにて表示するならば、(5)式の計算は簡単であるが、一般に1次遅れで表わさなければ誤差が非常に多くなる。ここで、アナログ計算

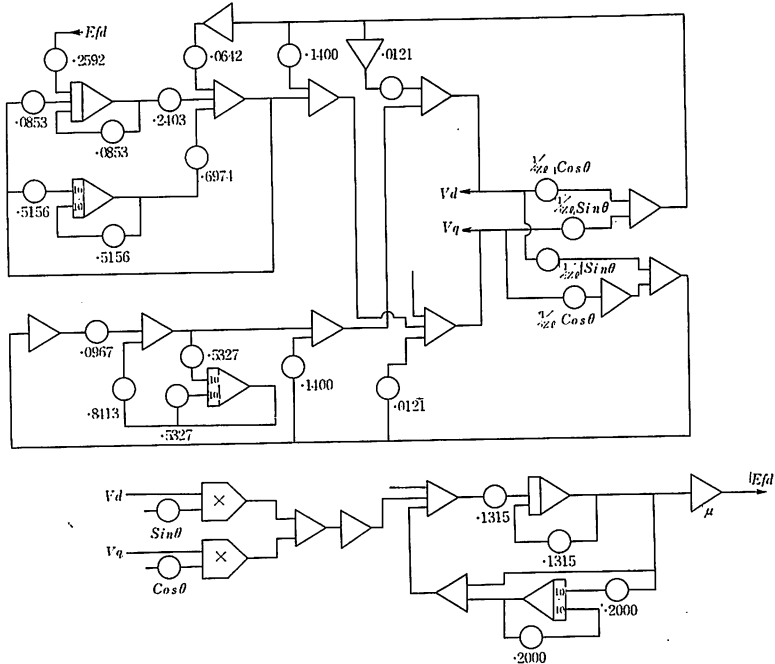




第4図 動揺周波数 (Hz)



第5図 動揺周波数 (Hz)



第6図 アナログ計算機ブロックダイヤグラム

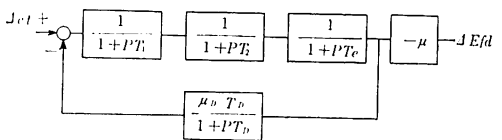
機による、変動負荷に対する AVR を考慮した同期機等価リアクタンスを求める。

外部負荷回路については、三相平衡負荷とすれば(9)式となる。

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{\cos\theta}{\sqrt{r_L^2 + x_L^2}} v_d + \frac{\sin\theta}{\sqrt{r_L^2 + x_L^2}} v_q \\ &= \frac{\cos\theta}{|Z_L|} v_d + \frac{\sin\theta}{|Z_L|} v_q \\ i_q &= -\frac{\sin\theta}{\sqrt{r_L^2 + x_L^2}} v_d + \frac{\cos\theta}{\sqrt{r_L^2 + x_L^2}} v_q \\ &= -\frac{\sin\theta}{|Z_L|} v_d + \frac{\cos\theta}{|Z_L|} v_q \\ \theta &= \tan^{-1} x_L / r_L \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

第1図および(9)式のアナログ計算機ブロックダイヤグラムは第6図のようである。

連続形 AVR の伝達関数 $G(s)$ のブロック図は第7図による。



第7図 AVR の伝達関数

- ここに、
- T_1 : 入力増巾器時定数

0.0125s
- T^2 : 出力増巾器時定数

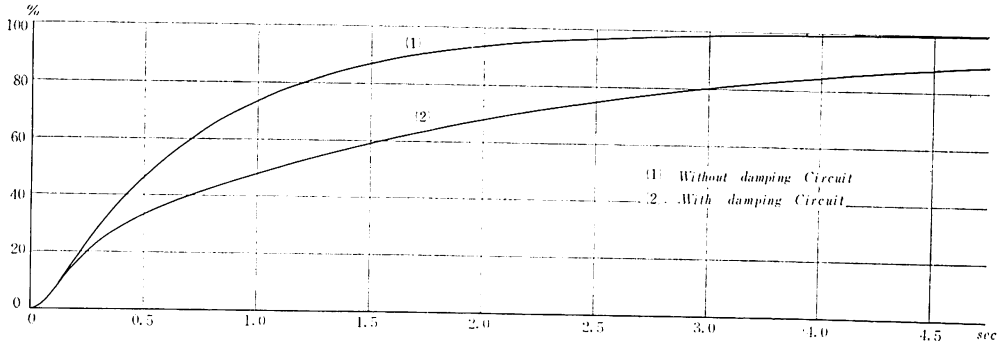
0.5s
- T_e : 励磁機時定数

0.7s
- μ : ループ利得

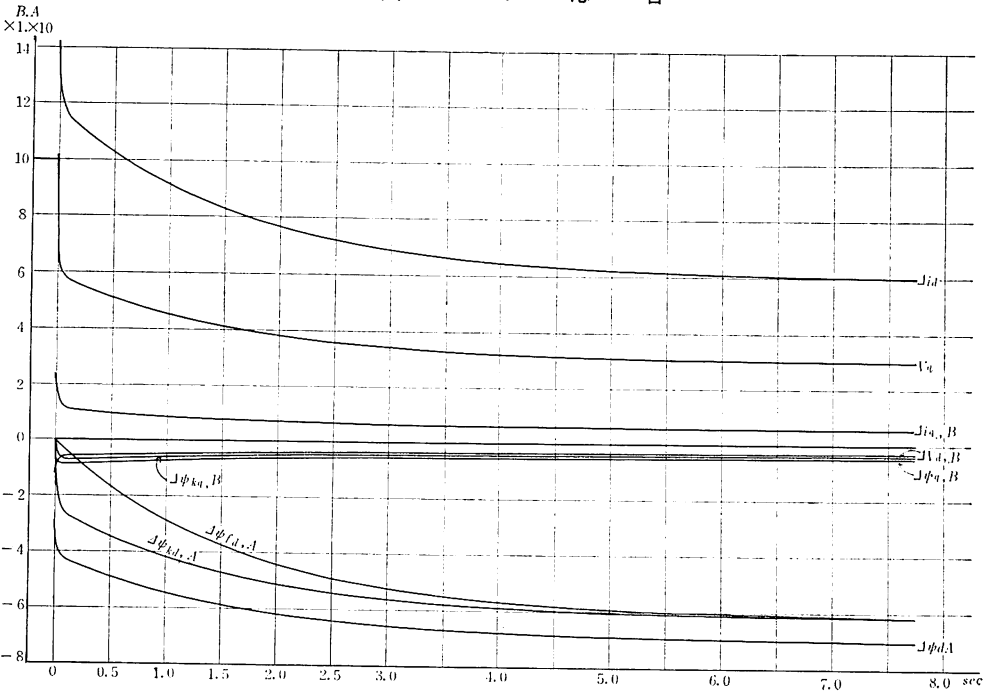
10~50
- T_D : 制動回路時定数

0.5s
- μ_D : 制動回路利得

2



第8図 AVR の 応 答



第9図 AVR なし の 場 合 の 応 答

第1表 第9図からの $x_d(t)$ の計算

t (sec)	V_q	Δv_q	Δi_d	$x_d(t)$
0.05	59.0	41.0	119.0	0.344
0.10	57.8	42.2	115.2	0.366
0.15	56.3	43.7	113.0	0.387
0.20	56.0	44.0	111.0	0.396
0.30	54.1	45.9	108.0	0.425
0.50	51.5	48.5	102.5	0.473
0.75	48.1	51.9	96.2	0.539
1.0	45.7	54.3	91.2	0.596
1.5	41.3	58.7	83.0	0.708
2.0	38.2	61.8	76.8	0.805
3.0	34.2	65.8	68.9	0.954
4.0	32.0	68.0	64.3	1.060
5.0	31.0	69.0	62.0	1.116
7.0	30.0	70.0	60.0	1.166

VI. 計算結果

(i) AVR の周波数応答

第8図に示す。この図から AVR は μ の gain を持った比例動作要素と考えることはかなり難かしく、 $x_d(t)$ の計算上精度に相当の影響を与えと思われるので、後述の如く AVR の出力が端子電圧とどのような時間関係にあるかも調べた。

(ii) 純誘導負荷印加時の同期機磁束、電圧、電流の時間応答 (AVR なし)

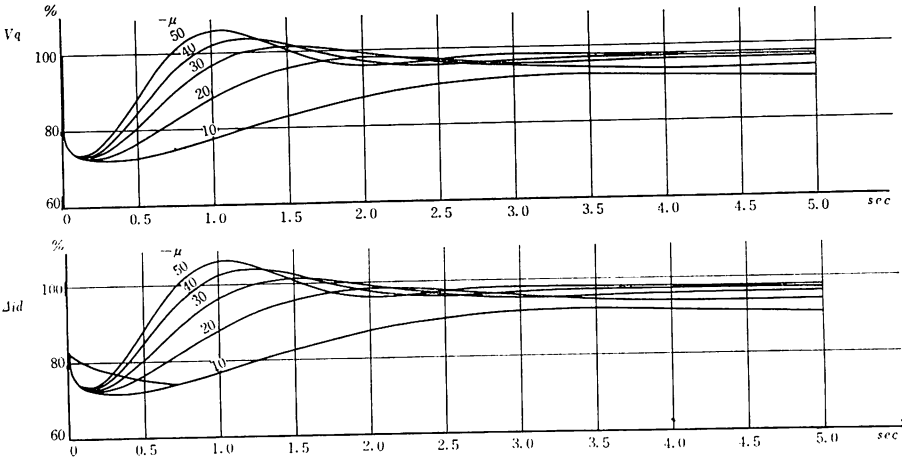
第9図に見られるように、この時間応答は 0.1 sec 以内とそれ以降の二つの時定数によって支配されている。この時間応答から $x_d(t)$ を計算すると第1表に示

すように、 x のあらかじめの値 (x_d, x_d' 等) が時間のどの辺に出ているか明瞭になり、第4図と一致する。

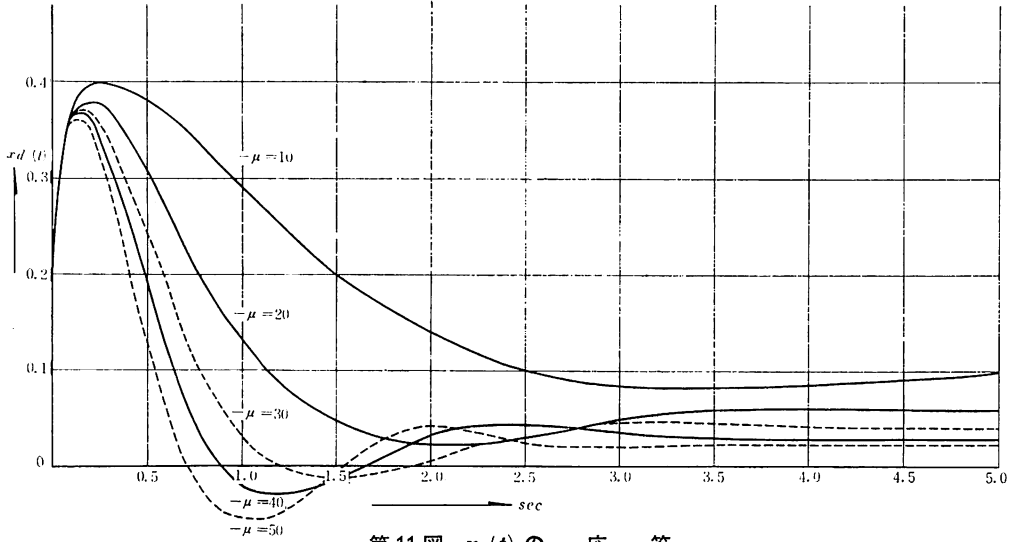
(iii) 純誘導負荷印加時の同期機電圧 (V_q)、電流 (Δi_d) の時間応答 (AVR あり)

第10図は AVR の gain μ を 10~50 にわたり変化させた $V_q, \Delta i_d$ の時間応答である。図に見られるように AVR gain μ の変化は 0.1 sec 以降にきき始め、1 sec 付近で最も顕著になり、4 sec 以降はそれぞれきまった off set を持つにいたる。 $\mu = 10$ で不足制動、 $\mu = 30 \sim 50$ で過制動となっているが、いずれも系の不安定は生じえなかった。

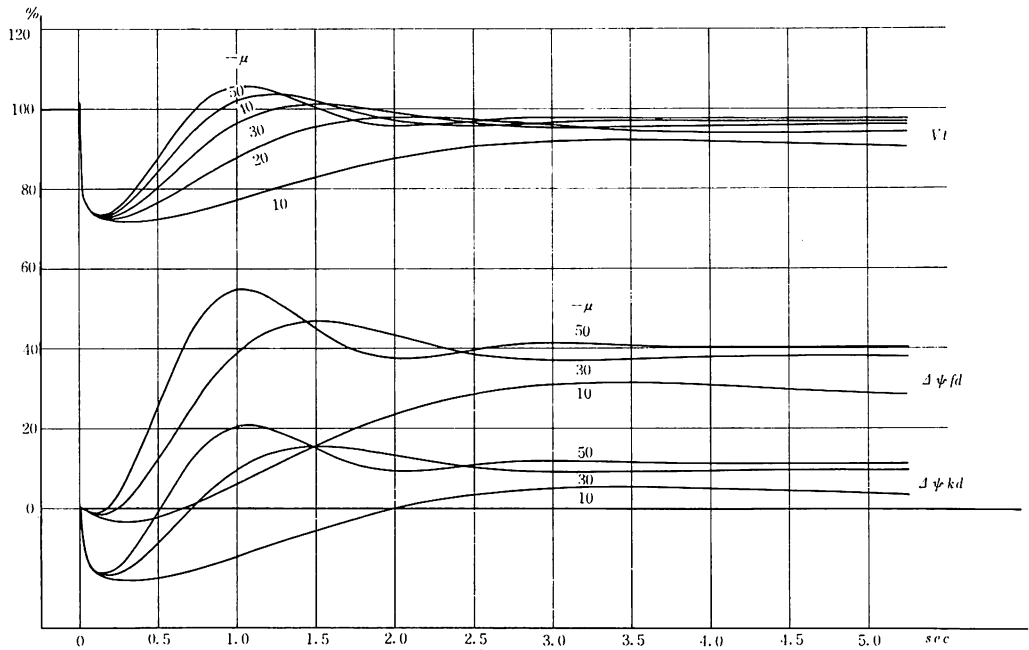
この図より、 μ の変化による $x_d(t)$ の変化を書いた



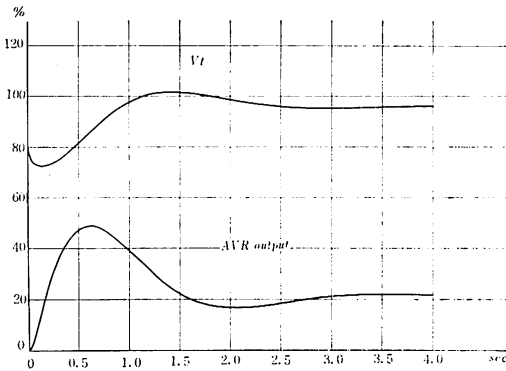
第10図 $V_q, \Delta i_d$ の 応 答



第11図 $x_d(t)$ の 応 答



第12図 AVR の磁束に及ぼす影響



第13図 AVR の時間遅れ

ものが第11図である。

(iv) AVR の磁束に及ぼす影響

前項で AVR は 0.1 sec 以降でないときき始めないことが判明したが、この場合磁束はどのようになっているかを示すのが第12図である。図より $\Delta\psi_{fd}$ が AVR の影響を受け始めるのがやはり 0.1 sec 以降である。

(v) AVR の時間遅れ

AVR の周波数応答からも予想されたことであるが、AVR の出力と端力と端子電圧の時間関係は、第13図より端子電圧の降下と共に AVR 出力は増加す

るが、0.1 sec 附近では量的にも少く、AVR の効果が充分でないことがわかる。

VII. 結 言

(i) AVR なしの場合、第4図より負荷変動の動揺周波数に対する同期機の等価リアクタンスの値が明らかになった。

(ii) 第11図より AVR の gain は30前後が適していると思われる。これより gain が高いと振動の行過ぎによってかえって変動がましてくる。

AVR は0.5sec以降急激にきき始める。すなわち、変動負荷の動揺周期の遅いものには効果があるが、周期の早いものには効果がうすい。これは AVR の時間遅れに有するものである。

(iii) 系統に接続されている場合、電圧変動が需要家に及ぼす影響について、多くの報告がなされ、動揺

周期 6Hz 前後がフリッカ問題に最も苛酷とされている。これは第4図より、同期機等価リアクタンスは x_d' と x_d'' の中間附近と思われる。これを軽減する目的に時間遅れの有する AVR ではなし得ないことになる。したがって、時間遅れの非常に小さい自励式同期機の検討等もよいのではないかとと思われる。

AVR の最適 gain を求めたが安定度についてはなお今後の検討を要す。

参 考 文 献

- 1) H. K. Messerle : PIEE, 1955, June.
- 2) M. Riaz : PA and S, 1956, Dec.
- 3) 馬場 : 三菱電機技報, Vol. 32, No. 2, 1958.
- 4) 村井, 小池 : 電気四学会連合大会, 603, 昭37.
- 5) 村井 : 電学会, 北海道支部大会, 77, 昭44.

(昭和45年1月14日受理)