

可飽和リアクトルによつて制御される 誘導電動機の特 性

桜 井 泰 男*

Characteristics of the Induction Motor Controlled by Saturable Reactors

By Yasuo Sakurai
Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Non-contact-point controlling method is extensively used by Hitachi, Ltd. for the change of rotating direction of the electric motor, and the speed control. It controls the exciting current of the saturable reactors assembled in bridge on the primary side of the motor.

The writer analyzes the characteristics of the induction motor on such a circuit as mentioned above. The circuit being unbalanced, the calculation of the characteristics becomes complicated. But by picking up special circuit the calculation is simplified, and the positive and negative phases may be indicated by a simple equivalent circuit. By the combination of these, the characteristics may be obtained in the simple manner, and the controlling characteristics are also improved. It is advantageous for the manufacturer to clarify the characteristics and to have all the reactor elements equivalent.

The writer shows the example of calculation picking up 1/2 HP induction motor as a test piece. He clarifies the controlling characteristics giving the examples of the variation of torque and current which are incidental to the change of reactance.

This method has widely been adopted for various purposes such as the automatic speed control of the main motor, the adjustment of various kinds of valves, dampers, etc., and for many other services with satisfactory results. The application of this method is daily expanding.

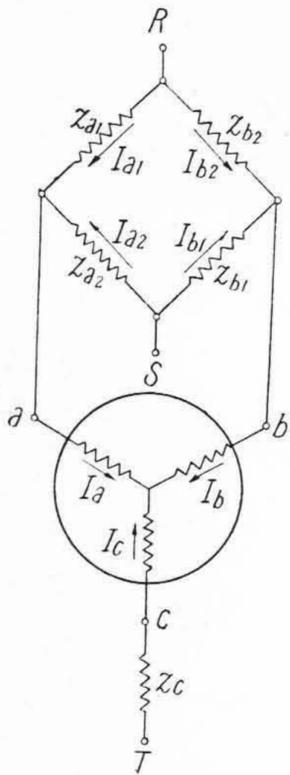
〔I〕 緒 言

三相誘導電動機の正逆運転、或は速度制御の方式として日立製作所に於ては近時、無接点制御方式を研究し種々の実用方面を開拓して実績を挙げている。本誌前号に紹介された「電気炉電極自動制御」方式はその一例である。

この他に応用し得る例としては、ファンのダンパー自動開閉装置、セメント用キルンの定速度制御、パルプグ

* 日立製作所日立工場

ラインダー自動圧力調整装置、可動翼ポンプ翼開度調整等枚挙にいとまなく、これ等は既に実施に移されて好成績を挙げている。この方式の特長とする所は一次側にリアクタンスブリッジを挿入して、ブリッジの素子として可飽和リアクトルを用い、直流励磁を以てリアクタンスを加減する事に依り、電動機の回転方向を制御するにある。従つて電動機はこれに適したものとし、停止時には極力電流を制限し且つ動作時には大きなトルクを得るよう、電動機自身の設計とリアクタンスの選定及び配置に考慮を払わねばならない。



第 1 図
リアクトル制御回路
Fig. 1.
Circuits of Reactor Control

この方式は単なる三相外部不平衡の場合と異りブリッジを形成しているので特性算式が複雑であるがここに一般的な場合から電流算式を導き電動機の特性を検討して見たい。

〔II〕 外部にブリッジを有する
電動機の算式

先ず第 1 図に示すように三相中二相に $Z_{a1}, Z_{a2}, Z_{b1}, Z_{b2}$ なるインピーダンスをブリッジに組んで接続し第三相に Z_c なるインピーダンスを挿入した一般的な場合を考える。

ここに a, b, c, \dots 誘導電動機端子
 R, S, T, \dots 平衡三相電源端子

R, S, T の相電圧をそれぞれ

$$V, a^2V, aV \left(a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

として各部の電流を図のように定める。

この接続に於て、例えば $z_{a2} = z_{b2} = \infty$ とすれば $I_a = I_{a1}, I_b = I_{b1}$ となり相回転は $R \rightarrow S \rightarrow T$ に対し $a \rightarrow b \rightarrow c$ となり正常運転をなし、 $z_{a1} = z_{b1} = \infty$ とすれば相回転は $b \rightarrow a \rightarrow c$ となり逆転する。

又 $z_{a1} = z_{b1} = z_{a2} = z_{b2}$ とすればブリッジはバランスして a, b 両相は同相従つて電動機は単相となり負荷がある程度以上ならば停止する。これが正逆運転の原理であるがこの中間の状態ですべて速度制御を行う事も出来る。実際はインピーダンスは有限値であるから、上記の中間の値で制御されるのである。

今 a, b, c 各点の相電圧をそれぞれ V_a, V_b, V_c とすると

$$\left. \begin{aligned} V_a &= V - I_{a1}z_{a1} = a^2V - I_{a2}z_{a2} \\ V_b &= a^2V - I_{b1}z_{b1} = V - I_{b2}z_{b2} \\ V_c &= aV - I_c z_c \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} \\ I_b &= I_{b1} + I_{b2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

これ等より

$$\left. \begin{aligned} V_a &= \frac{1}{z_{a1} + z_{a2}} (a^2Vz_{a1} + Vz_{a2} - I_a z_{a1}z_{a2}) \\ V_b &= \frac{1}{z_{b1} + z_{b2}} (Vz_{b1} + a^2Vz_{b2} - I_b z_{b1}z_{b2}) \\ V_c &= aV - I_c z_c \end{aligned} \right\} \dots \dots (3)$$

電動機の正相電圧電流をそれぞれ V_1, I_1 とし逆相のそれを V_2, I_2 とすると

$$\left. \begin{aligned} 3V_1 &= V_a + aV_b + a^2V_c \\ 3V_2 &= V_a + a^2V_b + aV_c \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_1 + I_2 \\ I_b &= a^2I_1 + aI_2 \\ I_c &= aI_1 + a^2I_2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

更に

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= I_1 z_p \\ V_2 &= I_2 z_n \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

ここに z_p = 電動機正相インピーダンス
 z_n = 電動機逆相インピーダンス

励磁電流は以後省略して考えるものとする。(3), (4), (5), (6) 式より

$$\begin{aligned} &\frac{1}{Z_a} \{ a^2Vz_{a1} + Vz_{a2} - (I_1 + I_2)z_{a1}z_{a2} \} \\ &+ \frac{1}{Z_b} \{ aVz_{b1} + Vz_{b2} - (I_1 + a^2I_2)z_{b1}z_{b2} \} \\ &+ V - (I_1 + aI_2)z_c = 3I_1 z_p \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{Z_a} \{ a^2Vz_{a1} + Vz_{a2} - (I_1 + I_2)z_{a1}z_{a2} \} \\ &+ \frac{1}{Z_b} \{ a^2Vz_{b1} + aVz_{b2} - (aI_1 + I_2)z_{b1}z_{b2} \} \\ &+ a^2V - (a^2I_1 + I_2)z_c = 3I_2 z_n \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

を得る。但し $Z_a = z_{a1} + z_{a2}$
 $Z_b = z_{b1} + z_{b2}$

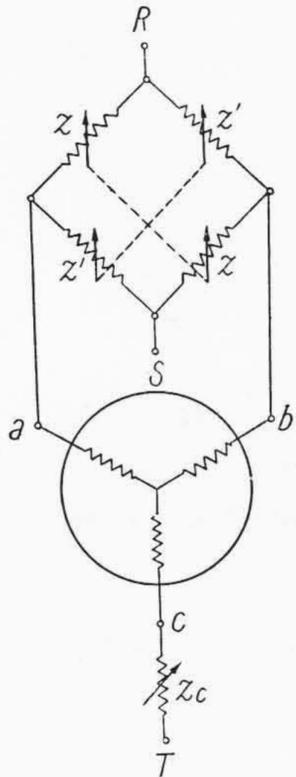
(7), (8) 式が一般式でこの二式より I_1, I_2 を求めて正相逆相トルクを計算する事が出来る。 z_c なるインピーダンスは正逆回転の原理からいけば不要のものであるが単相運転(停止)の際の電流を制限する意味からいつて是非必要なものである。

〔III〕 対称ブリッジの場合

実際に制御を行う場合には対称ブリッジを形成する。即ち $z_{a1}, z_{a2}, z_{b1}, z_{b2}$ は皆同形のリアクトルを用い直流通す巻線は z_{a1} と z_{b1}, z_{a2} と z_{b2} とをそれぞれ直列に接続するのでリアクタンスを変化せしめる場合でも

$$\left. \begin{aligned} z_{a1} &= z_{b1} (=z \text{ とおく}) \\ z_{a2} &= z_{b2} (=z' \text{ とおく}) \end{aligned} \right\} \text{ (第 2 図)}$$

の関係を常に満足せしめる。 $z + z' = Z$ とおくと(7), (8) 式は



第 2 図
バランスしたブリッヂによる制御回路
Fig. 2.
Controlling Circuits of
Balanced Bridge

$$\left. \begin{aligned} 3z'V - (2zz' + z_cZ)I_1 + a(zz' - z_cZ)I_2 &= 3I_1z_pZ \\ 3a^2zV + a^2(zz' - z_cZ)I_1 - (2zz' + z_cZ)I_2 &= 3I_2z_nZ \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

となる。これより I_1I_2 を求めると

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{3V}{D} \begin{vmatrix} z' & -a(zz' - z_cZ) \\ a^2z & 2zz' + z_cZ + 3z_nZ \end{vmatrix} \\ I_2 &= \frac{3V}{D} \begin{vmatrix} 2zz' + z_cZ + 3z_pZ & z' \\ -a^2(zz' - z_cZ) & a^2z \end{vmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

こゝに

$$D = \begin{vmatrix} 2zz' + z_cZ + 3z_pZ & -a(zz' - z_cZ) \\ -a^2(zz' - z_cZ) & 2zz' + z_cZ + z_nZ \end{vmatrix}$$

z, z', z_c がリアクタンスのみの場合

$$\left. \begin{aligned} z &= jx \\ z' &= jx' \\ z_c &= jx_c \end{aligned} \right\} \text{とおき、且つ} \left. \begin{aligned} z_p &= \frac{r_2}{s} + jX \\ z_n &= \frac{r_2}{2-s} + jX \end{aligned} \right\} \text{とする。}$$

一次抵抗は小さいものとして省略し、 X は一次リアクタンス及び二次停止時リアクタンスの和とする。 x_c としては x_1 と同形のリアクターを用いたとして、 $x_c = x$ とし更に

$$\begin{aligned} x_2 + 3xx' + 3(x+x')X &= A \\ x + x' &= B \end{aligned}$$

とおけば (10) 式は

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{3V}{D} \begin{vmatrix} ix' & -ax^2 \\ ja^2x & -A + j3B\frac{r_2}{2-s} \end{vmatrix} \\ I_2 &= \frac{3V}{D} \begin{vmatrix} -A + j3B\frac{r_2}{s} & jx' \\ -a^2x^2 & ja^2x \end{vmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

となる。こゝに

$$D = \begin{vmatrix} -A + j3B\frac{r_2}{s} & -ax^2 \\ -a^2x^2 & -A + j3B\frac{r_2}{2-s} \end{vmatrix}$$

これよりトルクは

$$T = T_1 - T_2 = 3 \left(I_1^2 \frac{r_2}{s} - I_2^2 \frac{r_2}{2-s} \right) \text{ (同期ワット)}$$

として求められる。

$s=0$ のとき

$$\frac{T}{3} = -\frac{18V^2x^2r_2}{9B^2r_2^2 + 4A^2}$$

$s=1$ のとき

$$\frac{T}{3} = \frac{9V^2r_2}{\{A^2 - x^4 - 9B^2r_2^2\}^2 + 36A^2B^2r_2^2} \{9x'B^2r_2^2 + (x'A - x^3)^2 - 9B^2x^2r_2^2 - (Ax - x^2x')^2\}$$

更に $x=x'$ のときは $T=0$ にして

$$\begin{aligned} |I_1| &= |I_2| \\ &= \frac{3V\sqrt{36r_2^2 + 9(x+2X)^2}}{\sqrt{\{4(2x+3X)^2 - x^2 - 36r_2^2\}^2 + 576(2x+3X)^2r_2^2}} \end{aligned}$$

$s=2$ のとき

$$\frac{T}{3} = \frac{18V^2x'r_2^2}{9B^2r_2^2 + 4A^2}$$

となる。

特別な場合として $x' = \infty$ とおけば

$$|I_1| = \frac{V}{\sqrt{(x+X)^2 + r_2^2/s^2}} \quad |I_2| = 0$$

即ち外部に x を挿入した三相对称回路となるが実際の可飽和リアクトルでは直流励磁を加えない場合でも交流電圧がかゝっているのでリアクタンスはそれ程大になることはなく $x' = \infty$ と見做す事が出来ない。

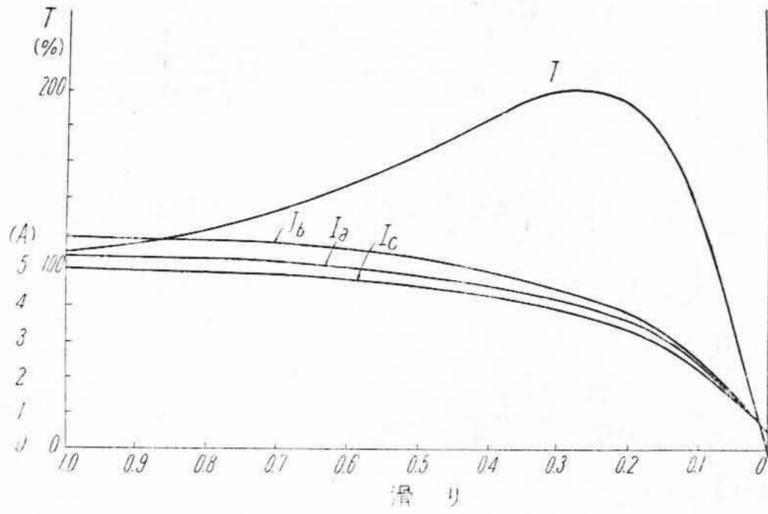
これ迄の計算は r_1 を無視したが無視出来ない場合には $\frac{r_2}{s}, \frac{r_2}{2-s}$ の代りに $r_1 + \frac{r_2}{s}, r_1 + \frac{r_2}{2-s}$ とおけばよい。

[IV] 計 算 例

1/2 HP 三相誘導電動機に就いて、各相電流、トルク等を計算する。 $r_1 = 3.5 \Omega, r_2 = 5 \Omega, X = 11 \Omega$ とする。直流励磁を行わない方のリアクタンスを $x' = 80 \Omega$, 励磁せる方を $x = 8 \Omega$ (従つて c 相リアクタンスも 8Ω) として滑り—トルク、及び滑り—電流曲線を求めると第 3 図 (次頁参照) のようになる。

この計算に依ると $s=1$ に近づくると実測値と離れて来る。というのはこの計算に於いて x 及び x' を一定としているに対し実際には電流に依つてリアクタンスも変化するからでありこの点の補正が必要である。

この例の場合、逆相トルクは正相トルクの 1/100 程度であり殆ど問題にならないが逆相電流は正相の 10~15% となる。



第 3 図 リアクトルにより制御された 1/2 HP 電動機 の 特性

Fig. 3. Characteristics of 1/2 HP Induction Motor Controlled by Reactors

次に $x = x'$ とした場合即ち単相運転となつた場合を考える。 $x = x' = 80 \Omega$ とすると $T_{max} = 10\%$ で電動機は直ちに停止する。この場合

$$I_a = I_b = 15\% \times \text{定格電流}$$

$$I_c = 30\% \times \text{定格電流}$$

となる。これ等電流の抵抗損失の概念を得るためにこれの自乗平均をとると定格電流の 21% となる。停止中は冷却効果が利かないから停止時間の長い用途に対しては温度上昇の点は電動機的设计に当つて留意せねばならぬ事柄である。実際に使用した電動機は 60 分定格のものであるが上記値にて連続停止の状態での温度上昇試験結果は 50°C 以下におさまっている。

[V] z_c の 検 討

z_c は停止時の電流を制限する為に挿入されるものである。従つて z_{a1} 等と同じく停止時には非常に大なる値をとり、運転時には小なる値をとるよう変化せしめるのが有利であるがこの値も選定宜しきを得ないと不平衡が大きくなり電流のみ大きくなつてトルクが得られない場合が出てくる。(10), (11) 式には正相電流 I_1 を決定する項に逆相インピーダンスの要素が入つており、逆相電流の場合も同様で非常に複雑な形となつており、この式は実際の設計計画に当つては煩に耐えない。又製作に当つては z_c も $z_{a1}z_{a2}$ 等と全然同一品を用いることが望ましい。

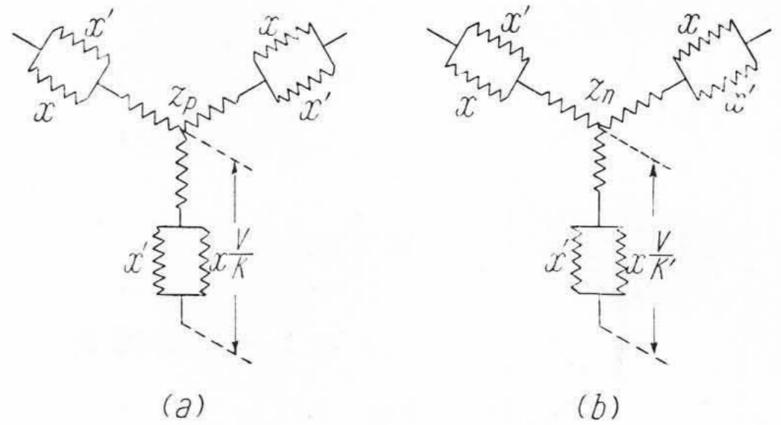
これ等の諸点を考慮に入れて (11) 式を考察すると

$$z_c = \frac{zz'}{z+z'}$$

となるようにすれば式も極めて簡単になり而も上記の諸点を満足する事が判る。

[VI] $z_c = \frac{zz'}{z+z'}$ の 場 合

この式の意味は z_c として z と z' とを併列に入れる



第 4 図 正相及び逆相の等価回路

Fig. 4. Equivalent Circuits of Positive and Negative Phases

事であつて $zz' = z_c Z$ であるから (9) 式より直に

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{Vz'}{zz' + z_p Z} \\ I_2 &= \frac{a^2 Vz}{zz' + z_n Z} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

なる簡単な関係が得られ I_1 は z_p , I_2 は z_n のみによつて定まる事になる。 xx' 等を代入し且つ

$$\frac{x}{x'} + 1 = k$$

$$\frac{x'}{x} + 1 = k'$$

とおけば

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{V/k}{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right) + j\left(\frac{x}{k} + X\right)} \\ I_2 &= \frac{a^2 V/k'}{\left(r_1 + \frac{r_2}{2-s}\right) + j\left(\frac{x'}{k'} + X\right)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

I_1 の式は外部に $\frac{x}{k}$ 即ち $\frac{xx'}{x+x'}$ なるリアクタンスを挿入し、 $\frac{V}{k}$ なる電圧を加えた等価回路で表わされ (第 4 図(a)), I_2 に就いても同様である。(第 4 図(b))

I_2 の式中 $2-s$ の代りに s とおけば

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{k'}{k} = \frac{x'}{x}$$

となる故正相の電流曲線又はトルク曲線が求められれば逆相電流はその $\frac{x}{x'}$ 倍、トルクは $\frac{x^2}{x'^2}$ 倍して、滑りに対し裏返して直に求められる。

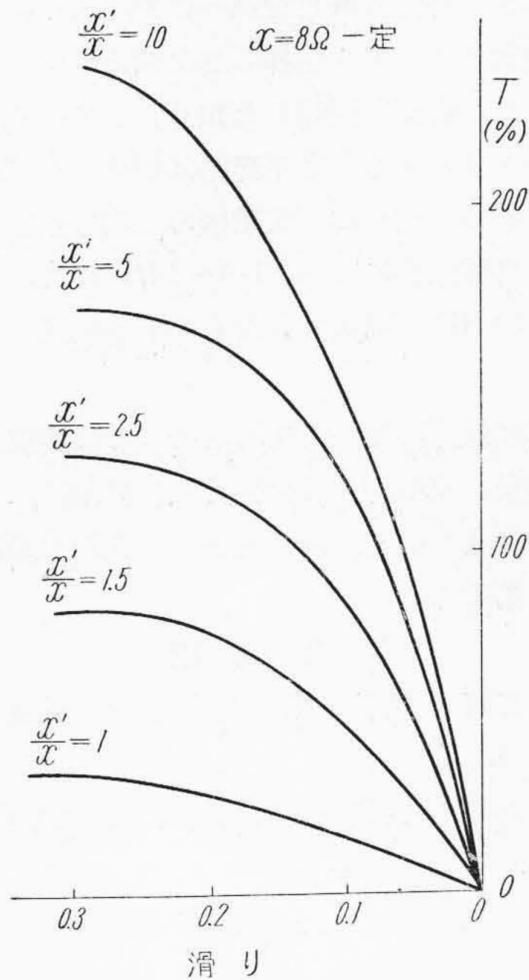
(13)式より通常の誘導機と同じく特性を求める事が出来る

正相トルク最大の滑り

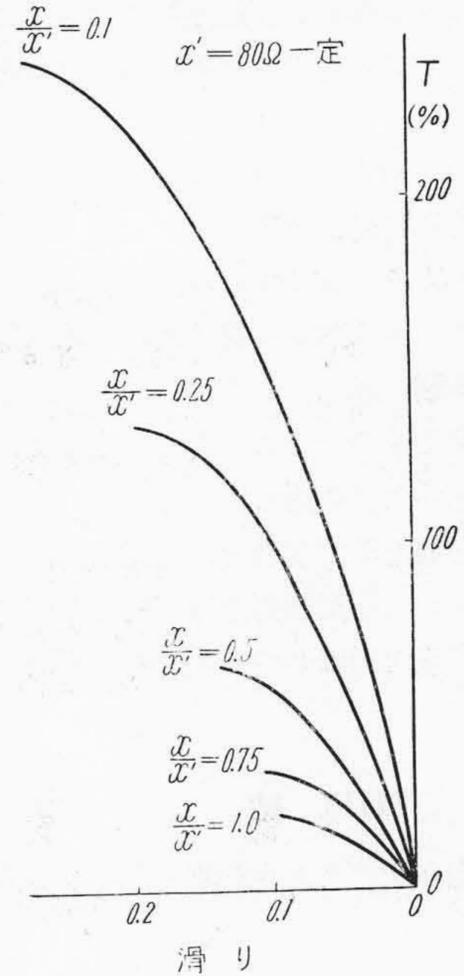
$$= \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + \left(\frac{x}{k} + X\right)^2}} \dots\dots\dots (14)$$

$$T_{1 \max} = \frac{3V^2/k^2}{2\left\{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{x}{k} + X\right)^2}\right\}} \dots\dots\dots (15)$$

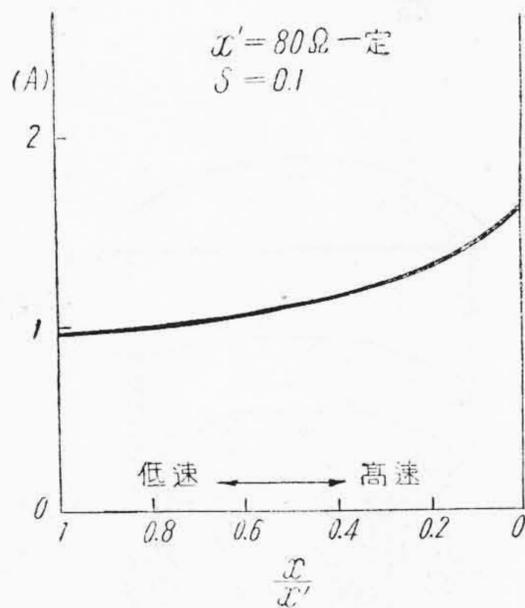
$T_{1 \max}$ を得る滑りに於ては T_2 曲線は略水平に近いのでこれは近似的に T_{\max} の滑りと一致する。



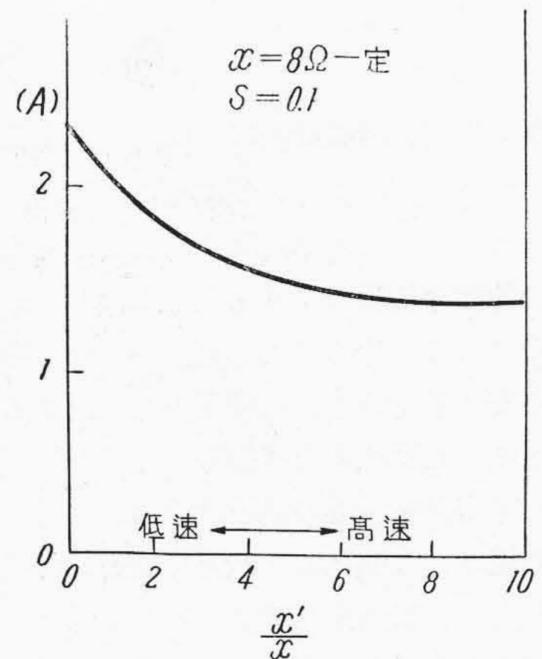
第5図 種々のリアクタンス値に対するトルク特性 $x < x' = 80 \Omega$
 Fig. 5. Torque Characteristics at Various Value of Reactance $x < x' = 80 \Omega$



第7図 種々のリアクタンス値に対するトルク特性 $x' > x = 8 \Omega$
 Fig. 7. Torque Characteristics at Various Value of Reactance $x' > x = 8 \Omega$



第6図 種々のリアクタンス値に対する電流特性 $x < x' = 80 \Omega$
 Fig. 6. Current Characteristics at Various Value of Reactance $x < x' = 80 \Omega$



第8図 種々のリアクタンス値に対する電流特性 $x' > x = 8 \Omega$
 Fig. 8. Current Characteristics at Various Value of Reactance $x' > x = 8 \Omega$

$x = x'$ となり更に静止の場合は $k = k' = 2, s = 1$ で

$$|I_1| = |I_2| = \frac{V/2}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + \left(\frac{x}{2} + X\right)^2}}$$

$$|I_a| = |I_b| = \frac{V/2}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + \left(\frac{x}{2} + X\right)^2}} \quad |I_c| = 2|I_a|$$

となる。

〔VII〕 T と $\frac{x}{x'}$ との関係

$x' = 80 \Omega$ を一定に保ち x を 0 から 8Ω 迄変化せしめた場合のトルク曲線を第5図に示す。(14)式で明かなように x を小なる値から大なる値に変化せしめると T_{max} の位置は s の小さい方に移動する。この事は速度変化範

囲が小さい事を意味し、正逆運転には適するが速度制御には適しない。この時の $s=0.1$ に於ける電流変化を第 6 図に示す。

銅損は $3(I_1^2 + I_2^2)(r_1 + r_2)$ で示されるから、こゝには I_1, I_2 の自乗平均をとつた。

逆に $x=8\Omega$ を一定に保ち x' を 80Ω から 8Ω に近づける場合のトルク曲線を第 7 図に、第 6 図と同様の電流変化を第 8 図に示す。この場合 T_{max} の位置は s の大なる方に移動するのでこの方が速度制御に適する。然し第 8 図に示すように電流は大となる。

従つて正逆運転には前者を、速度制御には後者の方法を用いばよい。速度制御を行う場合には x を適当に大きく選んで電流を制限しつつ $x' > x$ の範囲で制御するのがよい。

〔VIII〕 結 言

以上に可飽和リアクトルを使用する制御方式に於ける

電動機のトルク特性の解析を試み、実際応用に便利な第三相に適当なリアクトルを挿入した回路に就いて制御特性を明にした。最初に説明した如く、この方式は無接点制御を特長とするもので応用範囲は将来も多岐にわたる事が予想される。現在は主電動機の二次抵抗制御その他の制御用小型電動機に応用、1/4~2 HP 程度に使用しているが 5~10 HP 等漸次大きなものにも使用される傾向にある。

終りに本稿執筆に当つて指導を賜つた後藤設計部長、高木同副部長、泉制御器設計課長及び試験に尽力された制御器設計課藤木、吉岡両氏並びに検査課員諸氏に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 泉、吉岡：電流自動調整装置 26 回連合大会論文集 4. 25
- (2) 泉、吉岡：電弧炉の自動制御 日立評論 34, p. 1183.



特 許 第 194120 号

桑 山 正 俊

碍 子 型 遮 断 器

電路遮断に当り、消弧筒内に引成された電弧は、生成ガス圧力による油流により、噴油孔内に吹付けられ消弧を促進される。このとき噴面孔より上方にある油層は、噴出ガスの急激な膨脹により上方に突進し、頭部金具中に至り緩衝される。然るに遮断電流過大なる場合は、消弧筒上部の安全弁を開き、過剰圧力を放出するため、安全弁より上部の油層は上方に急激に加速押し上げられ、その反動として安全弁付近の油圧は急騰し、従つて安全弁より上昇油流と、噴油孔よりの上昇油流との経路が同一である場合には、噴油孔附近は上方に位置する安全弁からの放出油流の背圧を受けて油圧が異常に高まり、噴油孔を通して噴出する消弧油流の速度を抑圧鈍化する。この傾向は遮断電流の大なる程顕著となり、安全弁よりの放出油流を益々増大し、消弧筒の消弧性能を低下することになる。本発明はこの点に鑑み消弧筒の上部に隔壁を設けて、安全弁よりの放出油流と、噴油孔よりの噴出油流との上昇経路を、油面附近に至るまで別箇であるよう考慮したものである。かくすることにより安全弁よりの放出油流の背圧が、噴油孔よりの噴出油流の上昇速度を抑圧鈍化する欠点を一掃し、消弧筒の消弧性能を向上し、遮断容量を増大し得るものである。(滑 川)

