

新しい起動回路方式のコンデンサ電動機

Capacitor Motor with New Starting Circuit

小 池 俊 男*
Toshio Koike

内 容 梗 概

コンデンサ起動ラン形電動機を小形化するにあたり、問題となる接点溶着についてこれを避ける方式を検討し、その結果を適用することにより諸特性も含めて満足な結果を得た。

両コンデンサ間に補助巻線の一部を入れることによって、放電電流が大幅に低減されるとともに、コンデンサの選定と巻線配分の関連づけにより運転特性全般から見て有利な設計が展開できることも示した。

1. 緒 言

コンデンサ起動ラン形電動機は、コンデンサ起動形電動機に比較すると、特性上幾多の長所をもって従来より数多く使用されてきている。

コンデンサ電動機では起動電流の制限によって定格出力 400W 程度が最大のものとなる。この最大級の出力のものとして従来よりコンデンサ起動ラン形 400 W 4 極電動機を多数製作してきたが、今回最近の技術進歩に伴う電動機の小型化傾向に合わせた鋼板わくの 400W 4 極電動機を新しく汎用品化した。

この新汎用品の設計製作に際しては、小型化に起因する大きな問題として起動用コンデンサを開閉する遠心力スイッチの安定動作があり、これについて種々検討した。すなわち電動機の小型化に伴って遠心力スイッチを小型化する必要がある、スイッチの機能に制約が加わるのでコンデンサ残留電荷の放電による接点の溶着の問題が起こる。これを補うために補助回路について検討し、設計諸元との総合的見地から定めた方式を採用している。この結果、最も小形で安定した長寿命の電動機を開発することができたので、その検討結果などについて述べる。

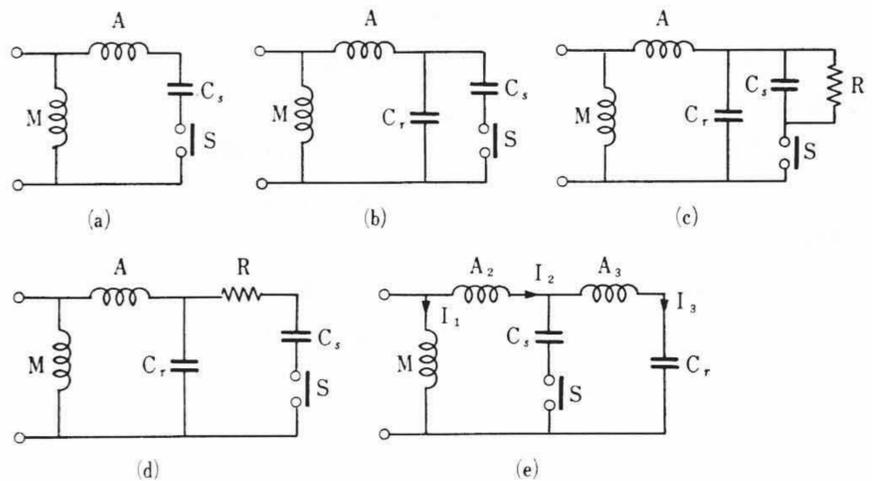
2. コンデンサ電動機の小型化と問題点

汎用コンデンサ電動機は、コンデンサ起動形(第1図(a)以下R形と呼ぶ)とコンデンサ起動ラン形(第1図(b)以下Q形と呼ぶ)に大別される。Q形はR形に比べて、運転時の力率がよいこと、起動回路から運転回路への切り換え時のトルクが大きいこと、騒音、振動が小さいことなどを長所としている。そして力率がよいことと補助巻線にも負荷能力ができて電気部分を小型化できるので、特性基準を同等にとるときは、運転用コンデンサを追加するという経済的な負担はほとんどなくなる程度になるのが普通である。第1表は 400 W 4 極汎用コンデンサ電動機について、R形とQ形の特性を比較したものである。電動機の電気部分の大きさを(固定子鉄心外径 D)²×(鉄心長 L)で表わした比率をみると小型化の程度がよくわかる。外形寸法的にみると第2図のようになり、コンデンサの収納位置による差と特性の差を考えれば、ほぼ同等に近いものになっていることがわかる。

一方Q形の欠点として、起動用コンデンサ切離し用の遠心力スイッチの接点寿命上不利になることがあげられる。Q形では運転用、起動用のコンデンサ回路の抵抗分が小さいために接点の開閉時には、大きな電流が流れ接点の寿命を著しく低下させるおそれがあり、R形のとときに比較すると数分の一程度になる。

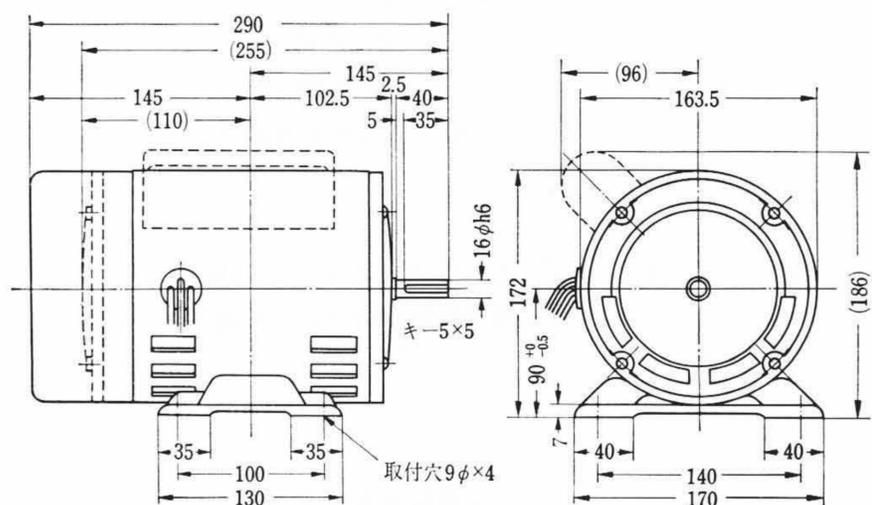
遠心力スイッチには、動作機構からいって、径方向移動形と軸方向移動形がある。電動機を小型にまとめるには後者が適している

* 日立製作所習志野工場



M: 主巻線, A: 補助巻線, Cr: 運転用コンデンサ, Cs: 起動用コンデンサ, S: 遠心力スイッチ接点, R: そろ入抵抗

第1図 コンデンサ電動機の起動回路



(点線形状および括弧内寸法はR形のととき)

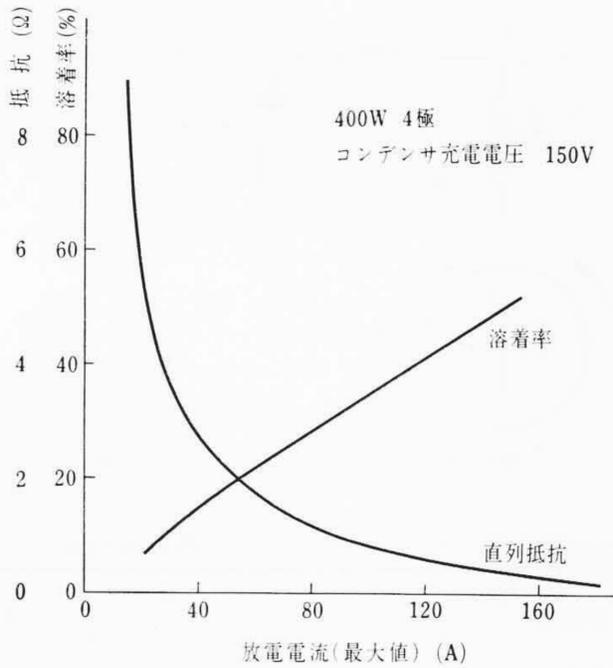
第2図 日立鋼板わく 400W 4 極コンデンサ電動機外形図

第1表 日立鋼板わく400W 4 極コンデンサ電動機特性 (100V)

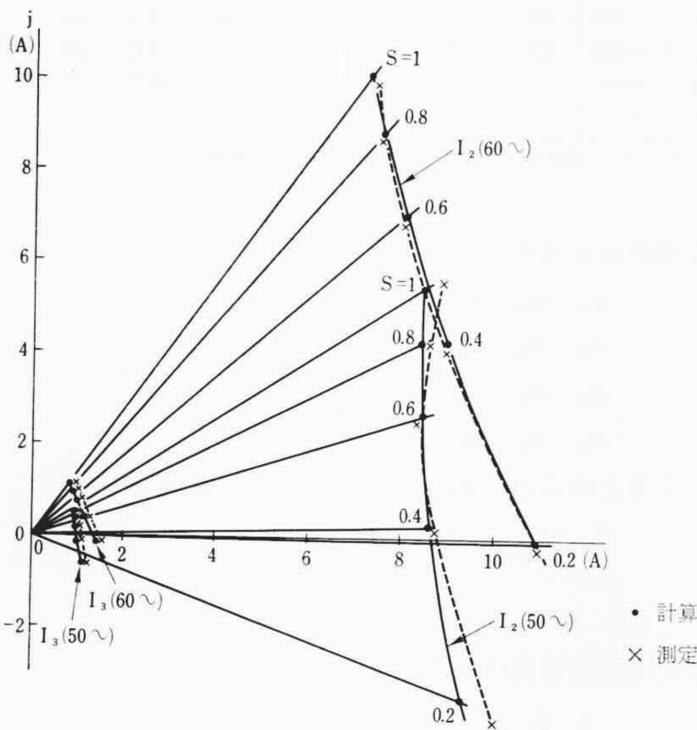
周波数 (Hz)	JIS-C 4203	R 形		QA形	
		50	60	50	60
全負荷電流 (A)	9.5 以下	7.5	7.0	5.8	5.4
効 率 (%)	62 以上	71.5	73.0	75.5	77.0
力 率 (%)	62 以上	74.5	78.5	92.0	97.0
停動トルク (%)	175~300	210	190	230	215
起動トルク (%)	200 以上	255	295	300	325
起動電流 (A)	33 以下	32.5	31.5	32.0	31.5
温度上昇 (°C)	60 以下	29	24	29	26
D ² L 比		100		82	

が、耐溶着性は機構的に前者がすぐれている。今回のものは電動機の小型化その他の理由により後者を採用したので、接点寿命をR形に近くするにはなんらかの配慮を必要とした。

Q形回路では次の場合に接点の溶着のおそれが生ずる。



第3図 溶着率と電流の関係



400W 4極, $\alpha_{12}=1.25$, $\alpha_{13}=0.3$, $C_r=30 \mu F$, $C_s=250 \mu F$
第4図 補助巻線電流のすべりに対する変化

- (1) 遠心力スイッチが動作して接点が開くとき、接点の躍動のために起電用コンデンサにある充電電荷が抵抗分の小さい運転用コンデンサ回路に流れ瞬時に大電流となり接点の溶着につながる。
- (2) 電源を切って後の接点閉時に大電流が流れ接点の溶着につながる。

R形では、巻線のインピーダンスにより電流が抑制されて大きな電流が流れない。第1図(c), (d)には溶着を防ぐ種々の方式を示してあるが、いずれも一長一短あり確実性、経済性の点で十分といえない。

第1図(e) (この方式を以下QA形と呼ぶ) のように補助巻線の一部をコンデンサ間に入れこれをコンデンサ定格との兼合いで、補助回路全般の設計で消化すると、最も経済的で効果も確実である。

接点閉時の溶着は一般に考えられているように、閉時の非常に大きな電流のために接触抵抗が高いと、接点があたかも点溶着を受けたようになり、特にこの大電流による電磁力がまた溶着現象を助長することで説明される。

溶着についての実験例を第3図に示す。これは第1図(d)の回路において、起電用コンデンサを直流で充電しておきこれを放電させたときの接点の溶着状況を示したものである。直列抵抗の増加と

もに溶着率が著しく減ることがわかる。溶着そのものは、接点の材質、接点の躍動などによって異なるが、Q形回路のときには、諸条件を考慮しておく必要がある。

以下QA形回路の性質などについて調べる。

3. 二補助巻線回路の特性

3.1 特性計算式

第2図(e)の回路の性質を調べるに当たって、図示のように各巻線電流を定める。主巻線に対し補助巻線は空間的に90度偏位しているものとする。

正相電流(I_f)、逆相電流(I_b)を次のようにおくと

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_f &= \frac{1}{2} (\dot{I}_1 + \alpha_{12} \varepsilon^{-j\frac{\pi}{2}} \dot{I}_2 + \alpha_{13} \varepsilon^{-j\frac{\pi}{2}} \dot{I}_3) \\ \dot{I}_b &= \frac{1}{2} (\dot{I}_1 + \alpha_{12} \varepsilon^{j\frac{\pi}{2}} \dot{I}_2 + \alpha_{13} \varepsilon^{j\frac{\pi}{2}} \dot{I}_3) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

電圧式は

$$\left. \begin{aligned} \dot{V} &= (\dot{Z}_{rf} + jx_1 + r_1) \dot{I}_f + (\dot{Z}_{rb} + jx_1 + r_1) \dot{I}_b \\ \dot{V} &= \alpha_{12} \varepsilon^{j\frac{\pi}{2}} (\dot{Z}_{rf} + jx_1) \dot{I}_f + \alpha_{12} \varepsilon^{-j\frac{\pi}{2}} (\dot{Z}_{rb} + jx_1) \dot{I}_b \\ &\quad + \dot{I}_2 r_2 + (\dot{I}_2 - \dot{I}_3) \dot{Z}_s \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

電流式は、

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_s \dot{I}_2 - (r_3 + \dot{Z}_s + \dot{Z}_r) \dot{I}_3 &= \alpha_{13} \varepsilon^{j\frac{\pi}{2}} (\dot{Z}_{rf} + jx_1) \dot{I}_f \\ &\quad + \alpha_{13} \varepsilon^{-j\frac{\pi}{2}} (\dot{Z}_{rb} + jx_1) \dot{I}_b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 \dot{V} : 電源電圧

α_{12} , (α_{13}): 補助巻線 A_2 (A_3)の実効巻数/主巻線 M の実効巻数

\dot{Z}_s, \dot{Z}_r : 起動用および運転用コンデンサのインピーダンス

$\dot{Z}_{rf}, \dot{V}_{rb}$: 回転子の正相および逆相のインピーダンス

x_1 : 主巻線の漏れリアクタンス

r_1, r_2, r_3 : 主巻線および補助巻線 2, 3の抵抗

$\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$: 主巻線および補助巻線を通る電流

\dot{I}_f, \dot{I}_b : 正相および逆相電流

(1)~(3)式より諸特性はすべて求められるが、ここでは補助巻線電流 \dot{I}_2, \dot{I}_3 の位相、振幅の関係をみるために、静止時を考える。

$$\frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_2} = \frac{-\alpha_{12} \alpha_{13} (\dot{Z}_{rf} + jx_1) + \dot{Z}_s}{\alpha_{12} \alpha_{13} (\dot{Z}_{rf} + jx_1) + r_3 + \dot{Z}_r + \dot{Z}_s} \dots\dots\dots (4)$$

普通のコンデンサ電動機の定数関係からみると、 \dot{Z}_s, \dot{Z}_r は他の項より大きいので、(4)式は次の近似式で表わされる。

$$\frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_2} \doteq \frac{\dot{Z}_s}{\dot{Z}_s + \dot{Z}_r} \doteq \frac{C_s}{C_s + C_r} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C_s, C_r は起動用、運転用のコンデンサの容量すなわち、 \dot{I}_2, \dot{I}_3 の大きさは、コンデンサ容量の比率で表わされ、電流間の位相差がないことを示している。電流間の位相差がほとんどないという性質は巻線実現上有利な条件となる。

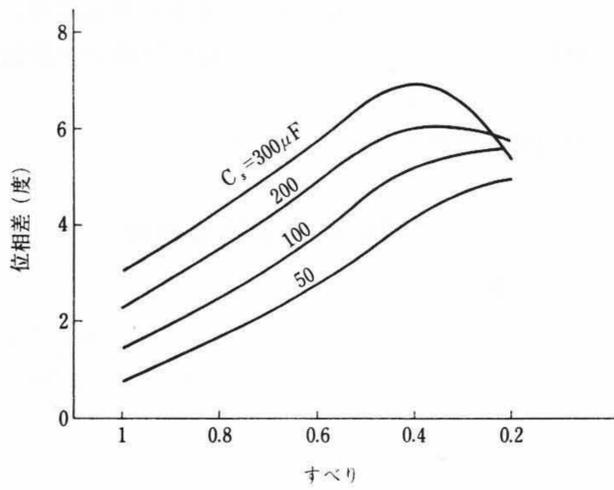
3.2 補助回路の設計

(5)式から推定されるような性質は、巻線分布について次の指針を与える。補助巻線 A_3 の巻線分布については単独で考えないで、補助巻線 A_2 との合成で考えて決めればよい。起動時においては、補助巻線 A_3 の巻線分布の影響は少なく、運転時において補助巻線 A_2 と A_3 は同等になる。

一般の電動機では、 $C_s : C_r = 8 : 1$ 程度であるから、補助巻線 A_3 を簡単な巻線で実現しても、その高調波分の影響は非常に少ないことがわかる。

補助巻線 A_3 を効果的にするには、だいたい次の目安をおくとよい。

- (1) コンデンサの電圧、容量の選定から $\alpha_{12} = 1.1 \sim 1.3$, $\alpha_{12} +$



第5図 補助巻線電流の位相差とすべり

$\alpha_{13}=1.5\sim 1.6$ 程度にする。

(2) 抵抗分を約 1Ω 程度確保する (第2図参照)。

400 W 級電動機では、(1)の事項は一般的にいえる比率であり、この値をとるとおのずから(2)を確保できて好都合となる。

このようにQA形回路にすると、コンデンサ選定上の問題にうまく合わせられる利点がある。起動用、運転用コンデンサはおのおの規格によって、電圧などが定められており、その選定は限られている。この限られた範囲内で定格を十分に使うのに補助巻線 A_2, A_3 の分割比を関連させて考えると経済設計が可能になる。

3.3 補助巻線電流の性質

補助巻線 A_2, A_3 の電流を400 W 4極電動機について計算および測定した例を第4図に示す ($\alpha_{12}=1.25, \alpha_{13}=0.3, C_r=30 \mu F, C_s=250 \mu F, r_1=1.2\Omega, r_2=3.5\Omega, r_3=1.0\Omega, x_1=(x_r)=1.2\Omega$)。

電流比はほぼコンデンサ容量比になっていて、すべりの変化に対してもこの関係が保たれている。また位相差もほとんど変わらないことがわかる。測定の結果もこれと同様の変化をしており、トルク特性などへの影響はみられない。

起動用コンデンサ容量を変えたときの電流位相の状況は第5図に示すとおりで、容量を大幅に変えても、位相差はほとんど変わらないことを示している。したがってこの結線方式は、広範囲にわたって適用することが可能であり、与えられた仕様に対して有利な設計ができる可能性をもっている。

4. 接点閉時の過渡電流

QA形回路にしたとき、コンデンサ放電電流がどうなるかを調べるために、回転子が一定速度で回転しているとき、接点Sが閉じた場合の過渡現象を解析する。

4.1 過渡現象解析

第6図のように回転子回路を含めて考える。次の仮定をおく。

- (1) 接点閉路は零時間で行なわれる。
- (2) 磁束およびアンペアターン波は正弦的である。
- (3) 回転子は電氣的に対称である。

第6図の回路について電圧式を示すと次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{主巻線軸: } a_{11}i_1 + a_{12}i_s + a_{13}i_y + a_{14}i_x &= 0 \\ \text{補助巻線軸: } a_{21}i_1 + a_{22}i_s + a_{23}i_y + a_{24}i_x &= 0 \\ \text{回転子Y軸: } a_{31}i_1 + a_{32}i_s + a_{33}i_y + a_{34}i_x &= 0 \\ \text{回転子X軸: } a_{41}i_1 + a_{42}i_s + a_{43}i_y + a_{44}i_x &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

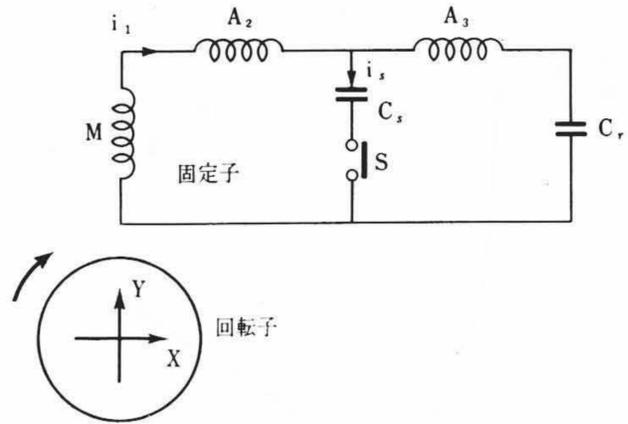
ここに、 a_{ik} : 微分演算子 p を含む回路のインピーダンスに対応する表式

i_j : 各回路の過渡電流

(6)の解を

$$i_1 = I_1 \varepsilon^{pt}, i_s = I_s \varepsilon^{pt}, i_y = I_y \varepsilon^{pt}, i_x = I_x \varepsilon^{pt} \dots\dots(7)$$

とし、これを(6)式に入れ、 $I_1 = I_s = I_y = I_x = 0$ なる解以外の解を有



第6図 過渡電流計算回路

第2表 多項式の根 ($P_i = \alpha_i + j\beta_i$)

P_i	R形回路		Q形回路						QA形回路	
	α_i	β_i	$r=0$		$r=0.5$		$r=1.5$		α_i	β_i
P_1	12.9	236	13.9	233	13.9	233	13.9	233	14.5	232
P_2	12.9	-236	13.9	-233	13.9	-233	13.9	-233	14.5	-232
P_3	-273	-420	-272	-395	-272	-395	-274	-395	-272	-392
P_4	-273	420	-272	-395	-272	395	-272	395	272	392
P_5	—	—	-73179	—	-35889	—	-18571	—	-1978	8007
P_6	—	—	—	—	—	—	—	—	-1978	-800

(注) r : 運転用コンデンサに直列につながる抵抗

する条件式を求めると、

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = 0 \dots\dots(8)$$

これをまとめると、 p についての6次の方程式となる。

$$\sum_{i=1}^7 D_i p^{7-i} = 0 \dots\dots(9)$$

ここに、 D_i : p に無関係な表式

求める過渡電流は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} i_{1t} &= \sum_{i=1}^6 I_{1i} \varepsilon^{p_i t}, & i_{st} &= \sum_{i=1}^6 I_{si} \varepsilon^{p_i t}, \\ i_{yt} &= \sum_{i=1}^6 I_{yi} \varepsilon^{p_i t}, & i_{xt} &= \sum_{i=1}^6 I_{xi} \varepsilon^{p_i t} \end{aligned} \right\} \dots\dots(10)$$

$I_{11}, \dots\dots$ などの積分定数を電流、電荷の初期条件より定めると過渡電流式が得られる。

(9)式の多項式の解は解析表示できないので、ここではデジタル計算機により数値計算して求めた。

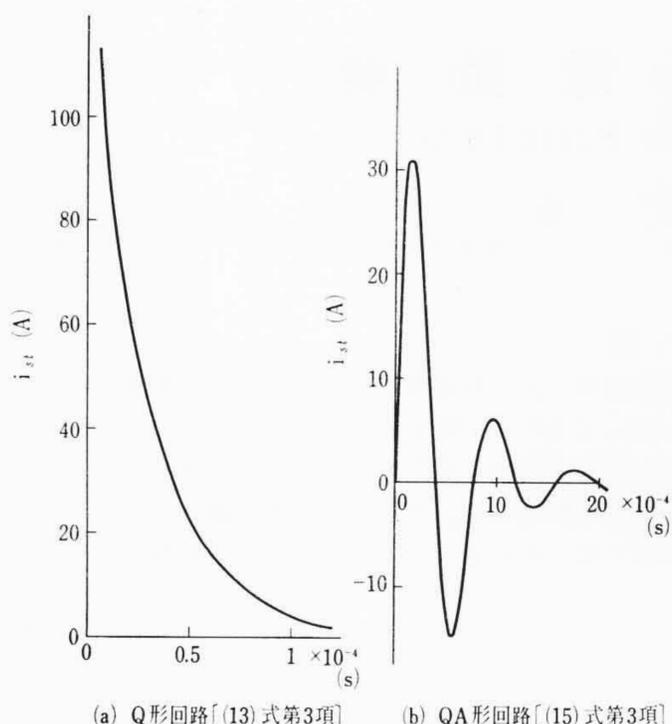
初期条件を与えるに際しては、実際には自励現象があって接点閉時直前において電流がすべて零とならないが、測定例からみてほとんど零になっているので簡単のために零としている。

なお、一般のR形回路の自励現象解析で示されているように、コンデンサ電動機では、遠心力スイッチの動作の行なわれるすべり0.2~0.3の範囲ではほとんど自励現象がある。これは(9)式の根に正の実数部のあることで表わされる。

4.2 過渡電流の計算と結果

まず、(9)式の根がどのような値かをみると第2表のようになる。(以下の定数は3.3のものに対応する)。これらの根をみると、各回路共通して発散項が2個あり、減衰項はR形では2個、Q形では3個、QA形では4個になっている。各場合に含まれる発散項は、電動機の自励を表わすものでいずれも同様な自励が発生することを表わしている。

Q形では、R形より実根が1個増し、その大きさは運転用コンデンサに直列につながる抵抗の増加とともに小さくなる。



第7図 接点電流の計算例

QA形になると、運転用コンデンサに直列につながるインダクタンスを含むインピーダンスがはいるので、根は複素数になる。

各場合とも、ほぼ共通な根は $p_1 \sim p_4$ である。 p_5, p_6 の根の差が回路の特長を表わすものであり、これらの根の形が接点閉時の電流の大きさに密接な関係をもつことが容易に推定される。

測定結果からみて、接点閉時の大電流は $p_1 \sim p_4$ の項ではなく、 p_5, p_6 の項である。したがって p_5 のみの根をもつQ形では、閉時の大電流から指数関数的に単純減少する分が溶着に結び付くと考えられる。QA形になると、閉時の零電流からはじまって高い周波数で減衰振動する分がどの程度の大きさになるかが決め手となる。

次にこれらの電流がどの程度になるかを計算した結果を第7図に示す。ここでは自励項および減衰項で小さい分については溶着に関係ないものとみなし省略している（残留電荷量：0.03 クーロン）。

各場合の電流計算式は次のようになる。

(1) R形回路のとき

$$i_{st} = 1.7 \epsilon^{12.9t} \sin 236t + 17.1 \epsilon^{-273t} \sin 420t \dots\dots (11)$$

(2) Q形回路のとき

$$i_{st} = 1.8 \epsilon^{13.9t} \sin 233t + 16.2 \epsilon^{-272t} \sin 395t \dots\dots (12)$$

$$i_{st} = 1.6 \epsilon^{13.9t} \sin 233t + 14.6 \epsilon^{-272t} \sin 395t + 135 \epsilon^{-35889t} \dots\dots (13)$$

(3) QA形回路のとき

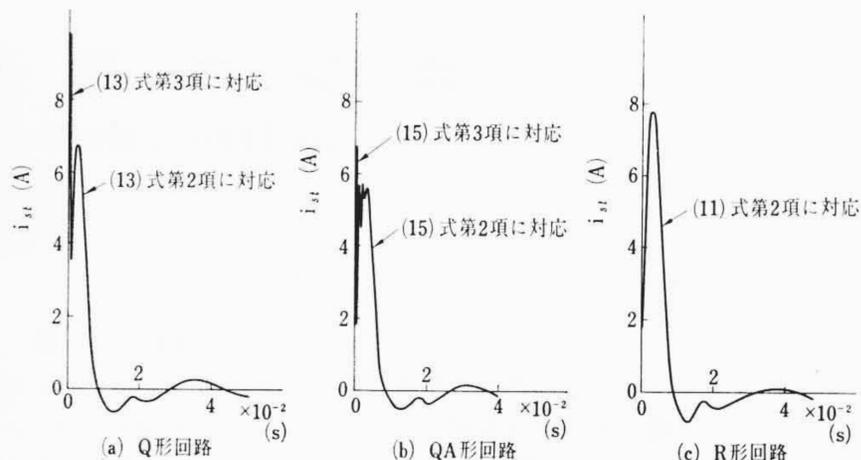
$$i_{st} = 1.8 \epsilon^{14.5t} \sin 233t + 16.0 \epsilon^{-272t} \sin 392t + 2.6 \epsilon^{-1978t} \sin 8008t \dots\dots (14)$$

$$i_{st} = 1.6 \epsilon^{14.5t} \sin 233t + 14.1 \epsilon^{-272t} \sin 392t + 36.4 \epsilon^{-1978t} \sin 8008t \dots\dots (15)$$

求める積分定数は複素数で解の形は上式で示されるような簡単な形でないが、簡単のために適当に省略している。

Q形では、閉時 $t=0$ から大きな電流が接点に流れることがわかる。これはほとんど両コンデンサ間に流れるものである。

QA形になると、これに対応するものが振動変化するようになり、その最大値もQ形のときに比べると大幅に小さくなる。第8図は各



第8図 接点電流の測定例

場合の接点電流の測定結果である（オシログラムを書き直したものの）。計算結果はこれらの傾向を明示していることがわかる。

以上よりR形では閉時にはほとんど大電流は流れず、接点容量が定常時に満足するものであれば、まったく問題にならないことがわかる。なおここではコンデンサの残留電荷が起動用コンデンサにのみある場合を示したが、閉時の電流の大きさは、この残留電荷の大きさに比例的に変化するし、また運転用コンデンサにある電荷についても似たような変化をする。このようにいろいろな条件をみて最悪の場合を考えておく必要がある。

5. 結果の検討

補助巻線を分割してその間に起動用コンデンサを入れるようにすると、設計的にきわめて満足なものになることは3および4の結果から明らかである。電動機の諸特性も第1表に示したとおりで、この種のものとしては理想的なものを得ることができた。

Q形として最も大きな問題になる遠心力スイッチの耐溶着性も、従来悪い条件下では、数千回以内で溶着していたが、新しい方式をとることによって、R形と同様に問題なく数十万回以上の寿命にすることができた。

補助巻線 A_3 は、ここでは1コイル/極で構成させたが、回路定数、要求される特性などによっては、さらにコイル数を減らすことが可能である。巻線仕様と過渡電流などとの関係については別途の機会に譲りここでは省略する。

6. 結 言

400 W コンデンサ起動ラン形電動機の小型化について述べ、その問題点としての接点溶着について検討し、新しい補助回路方式による解決法とその結果を概説した。この検討結果をもとに製作した汎用品は目標どおり、小型化することができるとともに、諸特性も良好であった。回路の解析結果より

- (1) コンデンサ回路の放電を抑制するために補助巻線を使うと効果的である。
- (2) 補助巻線の実現法は簡単であり、補助巻線の分割とコンデンサ定格の選定を関連づけると経済的な設計ができる。

参 考 文 献

(1) A. F. Puchstein, T. C. Lloyd: TAIEE 60, 958~62 (1941)
 (2) 森脇: 過渡現象計算法 (昭晃堂, 昭 31)