かご形誘導電動機のロータインピーダンス

Rotor Impedance of Squirrel-cage Induction Motors

男* 1 油 俊 Toshio Koike

要

アルミダイカストロータの回路定数の性質をロータスロット絶縁を考慮した場合について調べた。付加的な ロータインピーダンスはスキューインピーダンスというべきもので、すべりに対する変化は特殊かご形ロータ のときに類似する。普通かご形ロータでも、円線図法による特性算定には低周波拘束試験を行なって、インピ ーダンスの周波数変化特性を入れ、かつロータの温度換算も行なう方法が適している。

本文ではスロット絶縁とロータ定数の関係を簡単に知る近似式などを、また二重かご形ロータや単相機のと きの定数式をも示した。

1. 緒 言

アルミダイカストロータは小中容量のかご形誘導電動機に広く用 いられている。このロータに特有の性質として、ロータバーと鉄心 スロット面との絶縁が不じゅうぶんなことによるスキュー効果の複 雑な現象がある。この絶縁を考慮したときの漂遊損など空間高調波 が関係する事項については、多くの研究により明らかにされてい 3(1)~(8)

び単相機のような非対称のときの算式を述べる。

2.1 等価定数の計算式

旨

基本波の等価回路定数は Rossmaier 氏, 園山氏らが求めているよ うに、スロット絶縁抵抗を考慮したときの等価二次電流を求めるこ とが基本になる。

絶縁抵抗を考慮したときの電圧式は

$$\dot{V} = \dot{I}_1 \left\{ r_1 + jx_1 + \frac{jx_{h_1}}{\dot{Z}_l + 2r_r} (r_2 + 2r_r + jSx_2) \right\}$$

わが国では,三相誘導電動機の特性算定にはT形等価回路などに よる円線図法が広く用いられている。これら円線図法で求められる 特性はほぼ実測特性に対応し、多くの場合、実用上じゅうぶんな結 果が得られている。しかし、スキューされたロータでバーと鉄心間 の絶縁が不じゅうぶんなときには、ロータ側のインピーダンス特性 が特異なものになるので適用に注意を要することがある。

このロータインピーダンスの特性については、複素スキュー係数 として検討されているが(3)(9)(10), じゅうぶんなデータは明らかに されていない。

円線図法の中では、ロータ抵抗と漏れリアクタンスのとり方に理 論的に根拠の明確でないところがある。拘束試験時の入力を一次と 二次の銅損と考えて抵抗値を算定し,測定温度における抵抗値をそ のまま75℃の抵抗値とみなして計算している。一次抵抗値は75℃ に換算されるので,二次抵抗に不明項を集中させた形になる。リア クタンスも周波数変化をじゅうぶんに考慮したものにならない。

この欠点を補う改良法が提案されている(11)。そこでは低周波拘 束試験を行なって周波数変化特性を入れるようにするとともに,二 次抵抗の温度換算もするようになっている。

スキューされたスロット絶縁不じゅうぶんなロータでは、普通か ご形であっても等価ロータ定数の特性は特殊かご形ロータのときと 同じような傾向を持ち,前述の新算定法が適することが多い。実際 のロータは製作上のいろいろな影響を受け、単にスロット絶縁だけ をいってもじゅうぶんでないが、実用上はかなり有効な算定が可能 となる。

ロータ鉄心の表面短絡を考慮したときも同様の傾向があるが(12), 実用上存在することは少ないので,磁気飽和および空間高調波の影 響とあわせ、ここでは無視する。

$$+\frac{jx_{h_1}}{\dot{z}_{l}+2r_r}jSx_{h_2}(1-\eta^2\dot{K}^2)\bigg\}.....(1)$$

ここに、 V = 端子電圧, $r_1 = -次抵抗$, $x_1 = -次漏れリアクタン$ ス, $I_1 = -$ 次電流, $S = \tau < 0$, $x_{h_1}, x_{h_2} = -$ 次および二次の励磁リ アクタンス, r_r=バーに換算したエンドリングの抵抗

$$\eta = \frac{\sin \frac{p\pi}{N_2}}{\frac{p\pi}{N_2}}, \quad \dot{Z}_{l} = r_2 + jS(x_2 + x_{h_2})$$

p=極対数, N_2 =ロータスロット数, x_2 =バーの漏れリアクタン ス, Z1=バーのインピーダンス

等価スキュー係数 K は次式で表わされる。

$$\dot{K}^{2} = \frac{\dot{Z}_{l} + 2r_{r}}{\dot{Z}_{l} + p^{2}\beta^{2}r_{q}} \left(1 - (\dot{A} + \dot{B}) \frac{\sinh\frac{1}{2}(\sqrt{-} + jp\beta)}{\sqrt{-} + jp\beta} - (\dot{A} - \dot{B}) \frac{\sinh\frac{1}{2}(\sqrt{-} - jp\beta)}{\sqrt{-} - jp\beta} \right) \dots (2)$$

ここに,

$$\dot{A} = \frac{r_r \cos\frac{p\beta}{2} - p\beta r_q \sin\frac{p\beta}{2}}{r_r \cosh\frac{1}{2}\sqrt{-} + r_q \sqrt{-} \sinh\frac{1}{2}\sqrt{-}},$$
$$\dot{B} = -j \frac{r_r \sin\frac{p\beta}{2} + p\beta r_q \cos\frac{p\beta}{2}}{r_r \sinh\frac{1}{2}\sqrt{-} + r_q \sqrt{-} \cosh\frac{1}{2}\sqrt{-}}$$
$$\sqrt{-} = \sqrt{\dot{Z}_l/r_q}, \quad \beta = \frac{2\pi}{N_2} \cdot C$$

2. 等価ロータ定数の計算

ロータバーと鉄心間の絶縁抵抗を考慮したときの回路解析法は, Rossmaier 氏, Odok 氏らによって明らかにされている。この解析 手法を展開させ, Weppler 氏らが等価回路定数としての対応づけを している。ここでは、これらの結果を簡単に記し、二重かご形およ 日立製作所習志野工場

42

 $C=\mu-g, r_q=i$ に換算 した絶縁抵抗,(1)式は基本波電圧式,基本波磁界に対するスキュー の影響を表わし、 K がスキューの影響を示し、絶縁が完全のときは 普通のスキュー係数と一致する。 ロータバー電流は,

 $\dot{I}_{2} = -j \frac{Sx_{h_{2}}}{\dot{Z}_{1} + 2r_{r}} \frac{2m_{1}}{N_{2}} w_{1}k_{w}\eta^{2} \dot{K} \dot{I}_{1} \dots \dots \dots \dots \dots (3)$

かご形誘導電動機のロータインピーダンス 769



ロータ回路と等価回路 図1







スロット絶縁の影響の大きいのは,前と同様(11)式の第3項およ び(13)式である。これらにより二重かご形特性はさらに助長される 傾向となる。特に、二重かご形の電動機では Xh1 の値が大きいこと が多いので影響が大きい。



図2 二重かご形ロータのスロットと等価回路

ここに, $m_1 = -$ 次相数, $w_1 = -$ 次一相巻数, $k_w = -$ 次巻線係数, 一次換算のロータ電流は,

(1)式をロータ電流を入れた電圧式にすると、

$$\dot{V} = \dot{I}_1(r_1 + jx_1) + jx_{h_1}(\dot{I}_1 + \dot{I}_{2'})$$

 $O = \dot{I}_{2'} \left\{ \frac{r_{2'}}{S} + jx_{2'} + jx_{h_1} \left(\frac{1}{\eta^2 \dot{K}^2} - 1 \right) \right\} + jx_{h_1}(\dot{I}_1 + \dot{I}_{2'}) \right\} \dots (5)$
ここに、 $r_{2'} = \dot{\alpha}(r_2 + 2r_r), \quad x_{2'} = \dot{\alpha}x_2, \quad \dot{\alpha} = 4m_1 w_1^2 k_w^2 / N_2 \cdot \dot{K}^2$
(5)式を書直し、

$$O = \dot{I}_{2'} \left\{ \frac{r_{2}^{*}}{S} + j(x_{2}^{*} + x_{2\sigma}^{*}) \right\} + jx_{h_{1}}(\dot{I}_{1} + \dot{I}_{2'}) \dots (6)$$

$$\dot{K}^2 = K^2 \varepsilon^{j_T}$$
とおいて等価なロータインピーダンスを求めると,

$$r_{2}^{*} = (r_{2} + 2r_{r}) \alpha \cos \gamma + S x_{2} \alpha \sin \gamma + S x_{h_{1}} \frac{\sin \gamma}{\gamma^{2} K^{2}} \quad \dots (7)$$

$$x_{2\sigma}^* = x_{h_1} \left(\frac{\cos \gamma}{\eta^2 K^2} - 1 \right) \dots (9)$$

(7)~(9)式で、等価なロータ抵抗、スロット漏れリアクタンス およびスキューリアクタンスを含む高調波漏れリアクタンスが計算 される。これらのうち、スロット漏れに対するスロット絶縁の影響 は小さく、影響の大きい項は(7)式の第3項および(9)式である。

2.2 二重かご形ロータの定数

二重かご形ロータについて、図2(a)のスロット形状を例にとっ て等価ロータ定数を求める。

上下のバー間の相互作用を入れて、バー全体のインピーダンスを 普通かご形のときのバーのインピーダンスに対応するものと考え る。バーのインピーダンスを図2(b)の等価回路で示すとき、 Aと (B)間のインピーダンスは⁽¹³⁾

2.3 単相電動機の定数

主巻線と補助巻線が電気的空間角 π/2 をおいて配置されている単 相電動機の場合には、非対称磁界となるので、正相および逆相磁界 にわけて考える。主巻線電流 Imと補助巻線電流 Iaによって形成さ れる磁界を考えて主巻線相の電圧式をとると,

ここに, 第1項は主巻線の一次インピーダンス電圧, 第2項は正 相電圧,第3項は逆相電圧を表わしている。添字 p は正相, n は逆 相を表わしている。a=主巻線対補助巻線の実効巻数比, wm=主巻 線の一相実効巻数である。

一次および二次の正相および逆相電流は,

以下(4)~(6)式と同様の関係よりロータのインピーダンスが得ら れる。ロータ抵抗について示すと,

$$r_{2p}^{*} = (r_{2} + 2r_{r}) \alpha_{p} \cos \gamma_{p} + Sx_{2} \alpha_{p} \sin \gamma_{p} + Sx_{h1} \frac{\sin \gamma_{p}}{\eta^{2} K_{p}^{2}} r_{2n}^{*} = (r_{2} + 2r_{r}) \alpha_{n} \cos \gamma_{n} + (2 - S) x_{2} \alpha_{n} \sin \gamma_{n} + (2 - S) x_{h1} \frac{\sin \gamma_{n}}{\eta^{2} K_{n}^{2}}$$
 (17)

単相電動機の場合,正相定数については,三相対称機のときと同



ここに、 $x_{3}'=x_{3}-x_{34}$, $x_{4}'=x_{4}-x_{34}$, $x_{34}=相互リアクタンス$, 前 出のバーのインピーダンス $\dot{Z}_1 = r_2 + jS(x_2 + x_{h_2})$ と対比すると、

3.1 スロット絶縁抵抗 バーと鉄心間のインピーダンスはほとんどその間の接触抵抗であ

43

770日 立 評 論

VOL. 53 NO. 8 1971

表1 対 象	機	D	概	要	
--------	---	---	---	---	--

出 _(kW) 力	極 数	ステータ スロット数	ロータ スロット数	鉄 心 長 (mm)
3.7	2	24	34	110
1.5	4	36	44	90
3.7	6	36	46	120



(3.7kW 2極, 50Hz, S=1) ロータインピーダンスと絶縁抵抗 図4











(1.5 kW 4極 S=1, C=1.3 f=電源周波数) 図5 ロータインピーダンスと絶縁抵抗

る。したがって、スロットごとや鉄心積厚方向におけるばらつきも 出やすく一様な分布はしていない。また空隙(げき)面に近い部分は ロータ外周の機械加工の影響を受けやすく,ばらつきを助長する傾 向がある。これらのばらつきを少なくするのに、また抵抗値を大き くするのに、一般には熱的あるいは化学的な処理をしている。

抵抗の大きさに影響を及ぼす要素としては、電流の大きさ、遠心 力,温度,スキュー度,スロット寸法と加工度などがあり,それぞ れについてその影響度を考えておく必要がある。

接触抵抗の測定法には, エンドリングを取り除いて, 隣接するバ ー間に電流を流して電圧を測定する方法がある。図3はこの方法に よる測定結果例である。同一ロータにおける抵抗の範囲は10倍前 後の幅になる。

3.2 ロータ定数の計算

スロット絶縁を考慮したときのロータインピーダンスのうち,絶 縁抵抗の影響の大きい抵抗と高調波漏れリアクタンスを2の結果か ら計算した。計算の対象は表1に示す小容量機ですべて普通かご形 ロータである。







3.2.2 すべりとの関係

図5と同じ計算結果をロータ周波数(すべりと対応)との関係で みると図7(a),(b)のようになる。特殊かご形のときの特性と 非常に類似していることがわかる。この傾向を示す絶縁抵抗の範 囲はかなり広く,実用上ほとんどの場合多少なりともこの傾向を 持つと考えられる。

単相機のように, 逆相周波のある場合には, 逆相定数はすべり が大きいところにくるから, 逆相損失が通常の計算よりかなり多 くなる。

3.2.3 スキュー度との関係

スキュー度との関係をみると図8のようになる。通常のスキュ - 度の範囲は C=1~1.5 前後であるから,影響が大きいことがわ

3.2.1 絶縁抵抗との関係

44

スロット絶縁抵抗と定数の関係は図4~6に示すとおりである。 バーに換算する前の絶縁抵抗 r_a* が 10⁻⁴Ω 前後の領域で抵抗は 最大となり, リアクタンスは変化率がもっとも大きくなる。 一般に無処理ロータの絶縁抵抗はこの領域にあることが多いの で、定数の変化が激しくなる。

かる。

3.3 拘束定数との比較

ロータ定数とスキュー度および絶縁抵抗との関係をロータ拘束試 験から得られる定数から調べる。拘束試験ではロータを拘束し、定 格周波数の定格電流に近い電流を流し、電圧と入力を測定する。こ の結果から、抵抗分とリアクタンス分を求め、ロータ抵抗は拘束抵 抗から一次巻線抵抗を除いたものとする。

		無 処 理	処理
インビーダン	(Ω) \nearrow	1.56	1.85
抵	抗 (Ω)	0.693	0.765
リアクタン	\mathcal{A} (Ω)	1.393	1.687
二 次 抵	抗 (Ω)	0.425	0.499

表2 拘束定数とロータ処理

表3 拘束定数とスキュー度

		(3.7 kW 2	極, 50 Hz)
ス キ ュ ー 度 C	0	1.0	1.7
インピーダンス (Ω)	1.144	1.206	1.296
抵 抗 (Ω)	0.592	0.629	0.697
リアクタンス (Ω)	0.980	1.028	1.092
二 次 抵 抗 (Ω)	0.310	0.347	0.415

3.3.1 スロット絶縁との関係

無処理および絶縁処理したロータを同一ステータに入換えたと きの値を示したのが表2である。スロット面に耐熱絶縁皮膜を付 けて絶縁抵抗を高くしたロータでは、抵抗、リアクタンスともに 大きくなっている。拘束定数がこのような差になる r_q* の範囲を 図 6 でみるとと、 $0.2 \times 10^{-4} \sim 0.2 \times 10^{-3} \Omega$ となる。



 $(1.5 \text{ kW} 4 \overline{\text{W}} 50 \text{ Hz}, \text{ S}=1)$

図8 ロータインピーダンスとスキュー度



3.3.2 スキュー度との関係

ロータのスキュー度を変えたときのインピーダンスの変化例を 示すと表3になる。スキュー度を増すに従ってインピーダンスが 大きくなっている。これに対応した r₄*の値を図4でみるとほぼ $0.8 \times 10^{-4} \Omega$ のあたりとなる。

以上の例でみられるように、 ロータのインピーダンスは複雑な変 化をする。設計, 製作諸元の影響など諸要素を考えて定数を評価す る必要がある。

4. 結果の検討

4.1 近似式による傾向

(7)~(8)式では直接的な見方ができないので,近似式により変 化傾向を調べる。

ロータ定数と絶縁抵抗の関係は図4~6からわかるように、ある 絶縁抵抗の領域で大きな変化をする。この領域を次に調べる。

4.1.1 抵 抗

ロータ抵抗の変化分は $x_{h_1} \sin \gamma / \eta^2 K^2$ の変化で決定づけられ る。 x_{h_1} は S = 1 のとき大きくなる。 r_q が小さく, S = 1 で x_l = $x_2+x_{h_2}$ が大きいときは $K^2 = 1$, また S < 1 になると sin r $\rightarrow 0$ と なる。

r_aが大きいときは,

ここに、ks=絶縁完全のときのスキュー係数 (18)式=(19)式から r_q を求めると,

ロータ集中定数回路 図 9

(20)式から次のことがいえる。

- (i) リアクタンスが大きいほど,抵抗最大となる絶縁抵抗(r_{am}) は大きい。
- (ii) すべりが小さくなるに従って ram は小さくなる。
- (iii) 周波数が高くなるに従って r_{qm} は大きくなる。
- (iv) 極対数ごとのロータスロット数が多いほど r_{qm} は大きくな る。
- (v) エンドリング抵抗が小さいほど r_{am} は小さくなる。

4.1.2 高調波漏れリアクタンス

このリアクタンスの変化は $\cos \gamma/K^2$ の変化で決定づけられる。 $\cos r = 1$ となるので、 r_q が小さいとき、 $r_2'' = r_2 + 2r_r$ とすると、

r_aが大きいときは,

$$K = k_s$$
(22)

以上より、高調波漏れ係数 $\sigma = (\cos \gamma / \eta^2 K^2 - 1) \ge r_q$ の関係をみ る。σがr。に対して変わる点を求めると、そのr。が小さくなるに 従ってσも小さくなる。(21)式=(22)式の関係から,

(18) 式より, r_q が小さいときはロータ抵抗が r_q と比例的変化を し、また(19) 式より ra が大きいときは逆比例的変化をすること がわかる。 ロータ抵抗が最大点となる ra の近似領域は(20) 式で 表わされる。これを図4の例で求めると $r_q^* = 0.65 \times 10^{-4} \Omega$ とな り、よく近似される。

定格運転点近くでS≪1のときは,



(23), (24)式から、リアクタンスの変化領域の性質についても、 r_{qm} のときと同様のことがいえる。

(23), (24)式で図4の例を計算すると、それぞれ $r_q^* = 1.2 \times 10^{-4}$,

45

772 日 立 評 論

1.3×10⁻⁵Ωとなり、変化点をよく近似することができる。

なお,スロット漏れリアクタンスの r_qに対する変化は非常に少なく無視できる程度である。

近似法として図9に示すように絶縁抵抗を集中定数としたときは 等価スキュー係数は,

この式は絶縁が比較的よいときに有用である。

以上の近似諸式から,絶縁抵抗とロータ定数の関係をスキュー度, すべりおよび諸要素をパラメータとしたときについて,多面的に傾 向を知ることができる。

4.2 一般特性への影響

スキューされたかご形ロータでは、バー内に誘起される電圧は軸 方向位置によってその位相が異なっているため、高調波リアクタン スの増加となって表わされる。スロット絶縁が完全なときは、これ がスキューリアクタンスとして考えられるが、不完全になってバー 間に横流が生ずると、等価的にはスキューインピーダンスというべ き形になり、抵抗分の増加につながる。

次に一般的な特性への影響について述べる。

4.2.1 始動特性

絶縁抵抗が小さいときは、ロータ抵抗が増し、高調波漏れリア クタンスが減少するので、始動トルクは増加し、始動電流もほと んどの場合大きくなる。 ロータ抵抗の変化と同様である。

普通かご形としての円線図計算では,多くの場合実際より悪く 計算される傾向がある。

4.3 円線図特性算定との関係

より実際に近い特性算定をするには、ロータ周波数の変化と定数 の関係、巻線温度を実際に近い形で考える必要がある。文献(11)で 提案されている方法は従来の算定法の改良として、アルミダイカス トロータの場合、普通かご形であっても有用といえる。

5. 結

アルミダイカストロータの回路定数の性質をスロット絶縁を考慮した場合について調べた。

言

付加的なロータインピーダンスはスキューインピーダンスという べきもので、絶縁抵抗、スキュー度など設計および製作諸元によっ て影響され、すべりに対する変化は特殊かご形ロータのときと類似 する。したがって、円線図法による特性算定には低周波拘束試験を 行なって、インピーダンスの周波数変化特性を入れ、かつロータの 温度換算を行なう方法が適している。

スロット絶縁度とロータ定数の関係を知るのに便利な近似式およ び二重かご形ロータや単相機のときの性質について簡単な解説を行 なった。

これらのデータは製品の精度向上とばらつきの低減に対して重要 なものである。日立製作所では、かかる面をじゅうぶんに配慮し、 より品質の安定した製品を提供するよう努力している。

直入始動のときのようにバー間電圧が高くかつバー電流の大きいときは、バーと鉄心間の絶縁は電気的および熱的な破壊現象も考えられる。そのときには磁気飽和と同じ傾向を示すことになる。 4.2.2 停動トルク

停動トルク付近になると,絶縁抵抗の影響は比較的小さくなる。 ただし,単相機のように逆相分のあるときには,その影響が大き くなる。

4.2.3 加速トルク一般

基本波トルクは特殊かご形ロータのときと同様な特性となる。 高調波トルクについては,絶縁抵抗によってかなり形の違った特 性を示すことが明らかにされている。

4.2.4 効 率

定格運転点付近でのロータ抵抗損失は基本波分についてはあま り影響されない。従来から種々調べられている高調波損失の影響 を考える必要がある。この高調波損失の絶縁抵抗に対する変化は

参考文献

- (1) V. Rossmaier: E u. M, 57, 249~255 (1939)
- (2) A. Odok: TAIEE, 77, $43 \sim 53$ (1958)
- (3) R. Weppler: A f. E, 50, $238 \sim 252$ (1966)
- (4) N. Christofides: PIEE, 112, 2317~2332 (1965)
- (5) 園山: 日立評論, 43, 1236~1241, 2034~2040 (昭 36)
- (6) V. Subba Rao, O. I. Butler: PIEE, 116, 737~751 (1969)
- (7) J. Chalmers, J. Richardson: PIEE, 113, 1597~1605 (1966)
- (8) 片木: 電学誌, 81, 1445~1448 (昭36)
- (9) H. Jordan ほか: E u. M, 84, 143~148 (1967)
- (10) J. Saupe: Elektrie, 24, 412~413 (1970)
- (11) 電気学会技術報告 83, 14~19 (昭 42)
- (12) H. Jordan, F. Taegen: ETZ-A, 81, 816~820 (1960)
- (13) R. Richter: Elektrische Maschinen, 4, 248~251 (Verlag Birkhäuser, 1954)

