ヒステリシス電動機の瞬時過(不足)励磁後の特性とその解析

正員 湧井 源二郎 (茨城大)

非会員 西野 茂 (茨城大)

1. ま え が き

表題の瞬時過(不足)励磁とは、入力電圧 V_i で同期速度運転されているヒステリシス電動機の入力電圧を連続的に変えて最高(最低) nV_i ($n>1$ のときは過励磁, $n<1$ のときは不足励磁で、以下 n を過(不足)励磁率と呼ぶことにする)まで変えて、また連続的に元の V_i にもどすことをいう。

同じ V_i の電圧で運転しても、過励磁した場合は、しない場合に比較して同期脱出トルク(従って同期最大出力)は大きく増加し、入力電流は減少し、従ってこの種の電動機の主たる損失である固定子銅損は大幅に減少することから、効率も大きく増大する。この現象は Roters 氏によって、初めて実験結果が報告された⁽¹⁾。Roters 氏は、過励磁による特性変化の原因は回転子が永久磁石化されるため、トルクの増大は、回転子に永久磁石をもった普通の同期電動機としての動作が加わるためであると述べている。これは O'Kelly 氏ら⁽³⁾⁽⁴⁾も全く同様なことを述べており、後述するようにこれらは明らかに間違っている。

筆者らは、既に瞬時過励磁ばかりでなく、瞬時不足励磁についても実験を行ない、また瞬時過励磁後の回転子内の磁気特性を回転子の直流ヒステリシスループを基礎にして、実験的に求める方法を提案し、トルクの増大、入力電流減少の原因を考察したが、不十分であった⁽²⁾。ところで、ヒステリシス電動機は周知のように回転子リング(永久磁石材で構成される)内の磁気ヒステリシス現象によってトルクを発生する。そして同期脱出時、回転子一極対についての $B-H$ 関係は、直流ヒステリシスループで表わされ、そのループ表面積がトルクに比例し、次式で与えられる。

$$T = (pV_r/2\pi) \oint B dH \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 T : 同期脱出トルク、 p : 極対数、 V_r : 回転子リング(第13図参照)の体積、 B, H : 回転子リング内の任意の点の磁束密度、磁界の強さ、 $\oint B dH$: ヒステリシスループ面積

ここで、同期速度運転時の回転子内の任意の点の B, H の値は、周知のように時間と共に変化せず一定となる。従って、前記した瞬時過励磁した場合と、しない場合の回転子一極対についての $B-H$ 関係(ヒステリシスループ)は、回転子リングの磁気ヒステリシス現象のため、当然大きく異なってくるが予想できる。結局、ループ面積に比例したトルクなども変わるはずである。この現象はヒステリシス電動機に特有な現象で、それ自身非常に興味があるが、その他に電動機特性改善にも大いに利用できる。

本論文では、まず回転子リングの磁気定数(残留磁束密度 B_r と保磁力 H_c)や回転子リングの厚さ t_r (第13図)などが変化した試料電動機について、瞬時過励磁による特性変化を実測して具体的に改善の程度を明らかにする。次に、瞬時過(不足)励磁後の回転子の $B-H$ 関係をリングの直流ヒステリシスループから簡単に求める方法を提案し、得られたループから磁気定数(透磁率とヒステリシス角)⁽²⁾⁽⁶⁾を求める。この定数を既に求めてある等価回路⁽⁶⁾に適用して、電動機特性を計算し、試料機の実測結果と比較してよく一致することを確かめる。またこれからトルク、効率、力率、入力電流など一連の特性変化の原因を明らかにする。

2. 試料電動機の実験結果

(2.1) 試料電動機

(1) 固定子 三相2極で固定子寸法は、内径 51.20 mm, 軸方向の長さ 26.00 mm で、その他の仕様は脚注に示すとおりである*。

(2) 回転子 試料回転子は第1表に示すように磁気定数およびリング厚さの異なる5種である。この

Performance of Hysterisis Motor after Short-duration over-excitation (underexcitation) and its Analysis. By Genjiro Wakai, Member & Shigeru Nishino, Non-member (Faculty of Engineering, Ibaraki University).

湧井源二郎: 正員, 茨城大学工学部電気工学科

西野 茂: 非会員, 茨城大学工学部大学院修士課程(現在, 日立製作所多賀工場)

第 1 表 試料回転子の諸数値
Table 1. Specifications of sampled rotors.

試料	磁気定数		寸法(外径×内径×長さ) (単位: mm)
	B_r (kG)	H_c (Oe)	
1	9~10.5	120	50.2*×42.0*×26.0
2	"	160	"
3	"	200	"
4	"	300	"
5	"	200	50.2×36.5×26.0

回転子は固定子と組み合わせるとギャップの長さはいずれも 0.5mm で比較的大きく、空間高調波磁束の影響は小さいと考えられる。

〈2・2〉 実験結果 第 1 図～第 3 図に過励磁率 n をパラメータにして測定例を示す。図では瞬時過(不足)励磁後の特性と、これを行なわない場合の特性を比較のために併記した。また、第 4 図、第 5 図は第 1 図～第 3 図から瞬時過(不足)励磁した場合と、これを行なわない場合の実測値の比を求めたもので、特性変化の程度が明らかとなる。なお、実験はすべて 50 Hz で行なった。これらの図から次のことがわかる。

(1) 瞬時過励磁によって同じ入力電圧 V_L のときの脱出力トルク(出力), 効率, 力率が大きく増加し、特

第 1 図 過(不足)励磁後の脱出力トルク, 電流特性
Fig. 1. Pull-out torque and current characteristics after overexcitation (underexcitation).

* 巻線: 1,840 巻数/相, 9/12 ピッチ, 巻線係数 $k_{w1}=0.8848$, 漏れインピーダンス $r+jx=168+j172 \Omega$ (50 Hz, 35°C), 固定子鉄損抵抗 $R_i=17 k\Omega$

第 2 図 過(不足)励磁後の効率特性
Fig. 2. Efficiency characteristics after overexcitation (underexcitation).

第 3 図 過(不足)励磁後の力率特性
Fig. 3. Power factor characteristics after overexcitation (underexcitation).

第 4 図 トルク比 ($T_{(n)}/T_{(1)}$), 効率比 ($\eta_{(n)}/\eta_{(1)}$) 特性

Fig. 4. Torque ratio ($T_{(n)}/T_{(1)}$) and efficiency ratio ($\eta_{(n)}/\eta_{(1)}$) characteristics.

にこの傾向は低電圧範囲で顕著である。逆に電流は減少する。

(2) 過励磁率 n を大きくするほど特性の改善の程度は大きくなる。

第5図 力率比 ($pf(n)/pf(1)$), 電流比 ($I(n)/I(1)$) 特性

Fig. 5. Power factor ratio ($pf(n)/pf(1)$) and current ratio ($I(n)/I(1)$) characteristics.

(3) 瞬時不足励磁によって、逆に脱出トルク、効率、力率は減少し、電流は増加するが、その変化の程度は比較的小さい*。

(4) 第1図～第5図はいずれも無負荷、同期速度で運転している電動機を瞬時過(不足)励磁した後で、負荷をかけて同期脱出時の特性を測定したものであるが、これは同期速度で脱出トルク以下の任意の負荷がかかっている状態で瞬時過励磁した後、更に負荷を増して同期脱出させても、脱出時のトルク、電流などは、全く第1図～第5図の値と変わらないことを実験的に確かめることができた(この結果は後で解析の際に用いられる)。

(5) 瞬時過(不足)励磁後の特性は瞬時過(不足)励磁を行なう回数には全く関係なく同じであること、いい換えると瞬時過励磁は1回行なえば十分であることを確かめた⁽⁷⁾。

第6図～第8図は、回転子リングの磁気定数(B_r と H_c)のうち B_r が9~10.5kGではほぼ一定で、 H_c をパラメータ(第1表参照)とした場合の瞬時過励磁による特性変化の様子を示したものである。図から次の3点が注目される。

(i) 瞬時過励磁による脱出トルク、効率の増大は保磁力 H_c が大きくなるほど顕著となる(最高5倍以上、第7図参照)。

(ii) 第8図から力率は最初 H_c の増大とともに改善の程度が小さくなるが、200Oeを越えると逆に H_c 。

第6図 過励磁後の脱出トルク特性 (H_c : パラメータ)

Fig. 6. Pull-out torque characteristics after overexcitation.

第7図 トルク比 ($T(2)/T(1)$), 効率比 ($\eta(2)/\eta(1)$) 特性

Fig. 7. Torque ratio ($T(2)/T(1)$) and efficiency ratio ($\eta(2)/\eta(1)$) characteristics.

第8図 電流比 ($I(2)/I(1)$), 力率比 ($pf(2)/pf(1)$) 特性

Fig. 8. Current ratio ($I(2)/I(1)$) and power factor ratio ($pf(2)/pf(1)$) characteristics.

*: 瞬時不足励磁後の特性は、同期脱出すると回転子内一極対についての B - H 関係(ヒステリシスループ)は通常励磁の場合にもどるので、一度脱出したのが再び同期に引き込まれることになる。不足励磁後の特性は最初の脱出点を示す。

第 9 図 過励磁後の脱出トルク特性
(リングの厚さ: パラメータ)

Fig. 9. Pull-out torque characteristics after overexcitation.

第 10 図 過励磁後の効率, 力率特性
(リングの厚さ: パラメータ)

Fig. 10. Efficiency and power factor characteristics after overexcitation.

第 11 図 トルク比 ($T_{(2)}/T_{(1)}$) 特性
Fig. 11. Torque ratio ($T_{(2)}/T_{(1)}$) characteristics.

と共に改善の程度が大となる。一般に低電圧範囲で改善が大きい。

(iii) 第 8 図から電流については、一般に入力電圧の低い範囲で減少の程度が大きい、 H_c に対しては複雑である。

第 9 図～第 11 図は、リングの厚さ t_r をパラメータにした場合の瞬時過励磁による特性変化を実測したものである。第 9 図から、 t_r が大なるほど脱出トルク T が大きい、これは (1) 式から磁気特性 ($= \oint B dH$) が等しくとも、 T は V_r に比例することから明らかである。しかし、第 10 図の $n=1$ (破線) をみると、効率 η 、力率 pf は t_r によってそれらの最大値はほとんど変わらない (最大値のときの V_L の値は異なるが)。これは $n=2$ の場合も同様である。これは瞬時過励磁による特性変化が第 3 章で明らかにされるように、ヒステリシス特性にだけ依存するためである。

但し、第 11 図から明らかなように、同じ V_L で比較すると t_r が大きいほど T の改善の程度は大となる。これは η , pf などについても同様な傾向であるので図は省略する。これは t_r が大きいほど同じ V_L のときの B が小さく、 B が小さく飽和していないほど T , η などの改善の程度が大きくなることは、第 14 図、第 17 図、第 1 図～第 3 図から容易に理解される。

このように瞬時過(不足)励磁により特性の変化がみられるが、次にその原因を明らかにするために定量的に解析してみる。

3. 等価回路による特性解析

〈3.1〉 等価回路 ヒステリシス電動機の解析は、一般に空間高調波磁束の影響が小さくて無視できる場合は、比較的簡単に既に幾つか報告⁽⁵⁾⁽⁶⁾されており、よく知られている。ここでは、普通採用されているように回転子内の磁気ヒステリシスをだ円近似する方法をとる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この方法は、筆者の一人によっても既に求められているので誘導は省略し、等価回路だけを表示すると、三相電動機について第 12 図のようになる。

ここで、 $r+jx$: 固定子漏れインピーダンス、 jx_s :

第 12 図 ヒステリシス電動機の等価回路

Fig. 12. Equivalent circuit of hysteresis motor.

第 13 図 ヒステリシス電動機の断面図

Fig. 13. Cross section of hysteresis motor.

ギャップ励磁リアクタンス

$$jx_p = j12\omega_0\mu_0(k_{w1}N_1)^2 L/\pi p A_{-p}$$

 $\dot{Z}_{H2}$: 回転子の等価インピーダンス

$$\dot{Z}_{H2} = r_{H2} + jx_{H2}$$

$$= |\dot{Z}_{H2}| \sin \alpha_2 + j|\dot{Z}_{H2}| \cos \alpha_2$$

$$|\dot{Z}_{H2}| = 12\omega_0\mu_2(k_{w1}N_1)^2 LB_{-p}/p\pi A_{+p}B_{+p}$$

..... (2)

$$A_{\pm p} = (r_3/r_2)^p \pm (r_3/r_2)^{-p}, B_{\pm p} = (r_2/r_1)^p \pm (r_2/r_1)^{-p}$$

R_i : 鉄損等価抵抗 [文献(6)では R_i を省略], ω_0 : 電源の角周波数, L : 回転子の軸方向の長さ, k_{w1} : 固定子巻線係数, N_1 : 固定子 1 相あたりの巻数, p : 極対数, r_3, r_2, r_1 : 第 13 図参照, μ_2, μ_2^*, α_2 : リングの正規透磁率, 比透磁率およびヒステリシス角, μ_0 : 空気の透磁率

上記(2)式および〈2・1〉節の諸数値を第 12 図の等価回路に適用すると、電動機の動作特性を計算することができるが、瞬時過(不足)励磁後の動作特性を求めるためには、まず瞬時過(不足)励磁後の回転子一極対についての $B-H$ 関係 (ヒステリシスループ) を求める必要がある。次にこれを求めてみよう。

〈3・2〉 過(不足)励磁後の回転子内のヒステリシスループ ヒステリシス電動機の同期脱出時、回転子リング内一極対についての $B-H$ 関係は、瞬時過(不足)励磁しない場合は、前記したように直流ヒステリシスループで表わされ、これは既知であるから、これから瞬時過(不足)励磁後のヒステリシスループを求める。

〈2・2〉節の実験結果の(4)で明らかにしたように、瞬時過(不足)励磁は無負荷で行なっても、脱出トルク以内の任意の負荷で行なっても、その後の同期脱出時特性はいずれも等しくなることが実験的に確かめられたので、次の方法で瞬時過(不足)励磁後の脱出時の $B-H$ ループを求める。

第 14 図はその説明図である。ここではまず、同期脱出トルクを負った状態で過励磁する場合を考える。図の L_1 は過励磁前の回転子一極対についての $B-H$ ループで、回転子内の最大磁束密度は B_m である。これ

第 14 図 過励磁後の回転子内のヒステリシスループの求め方

Fig. 14. A drawing method of hysteresis loop inside rotor after overexcitation.

を 2 倍の磁束密度に過励磁する (以下、磁束密度の過(不足)励磁率は n' で示す) と、回転子内一極対についての $B-H$ 関係は、 $2B_m$ を最大値とする直流ループ L_2 で表わされる大ループとなる。次に元の B_m にもどすと回転子上の点 $A, C, D, \dots$ は図のように移動して、それぞれ $A', C', D', \dots$ のような位置に落ち着く*。結局過励磁前のループ L_1 は瞬時過励磁後ループ L_1' のような太い破線のループに変化する。図から次の点が注目される。

(1) 過励磁後のループ L_1' の面積は L_1 の面積よりかなり大きくなる。

(2) ループの先端 A は瞬時過励磁後は A' のように第 2 象限に移るかあるいは第 2 象限に近くなる (第 16 図参照)。

第 15 図は試料リング (第 1 表の試料 1) の直流ヒステリシスループであり、これから上記の方法で過励磁後のループを描くと第 16 図のようになる。第 15 図、第 16 図のループをだ円ループで近似するために周知のように磁束密度分布 B を正弦波として H のひずみ波を求め、その基本波 H_1 を求めると、 B と H_1 との位相差としてヒステリシス角 α_2 , B と H_1 の最大値の比として透磁率 μ_2 が求められる。求めた結果を第 17 図に示す。図では不足励磁の場合の値 (求め方は後述) も併記した。図で次の点が注目される。

(i) 過励磁後の比透磁率 $\mu_{2(2)}^*, \mu_{2(1.5)}^*$ は過励磁前の $\mu_{2(1)}^*$ に対し大きく、特に磁束密度 B の低い範

*: L_2 のループで上昇曲線上の C, D, F 点などはマイナーループ上を下降して、それぞれ C', D', F' 点に落ち着くが、下降曲線上の点 G は L_2 上を下降して、 G' 点に落ち着く点に注意されたい。

第 15 図 試料リングの直流ヒステリシスループ
Fig. 15. DC hysteresis loops of sampled rotor.

第 16 図 過励磁後の回転子のヒステリシスループ
Fig. 16. Hysteresis loops inside rotor after overexcitation.

囲で非常に大となる。

(ii) 過励磁後のヒステリシス角 $\alpha_{2(2)}$, $\alpha_{2(1.5)}$ は過励磁前の $\alpha_{2(1)}$ に対し、かなり大きく (最大値で 110° 大) なり、 $B_m = 1.5 \text{ kG}$ 以上では $\alpha_{2(2)}$ は 90° を越える。従って、(2) 式の x_{H2} は 1.5 kG 以上では負となり、キャパシティブリアクタンスとなる点に特に注目したい。〈3・3〉節に詳述するが、過励磁後の力率が格段に改善されるのは (ii) のためであり、効率が改善されるのは (i), (ii) のためである。

次に瞬時不足励磁後のヒステリシスループの求め方について説明する。この場合も同期脱出時について求める。第 18 図は求め方の説明図で、不足励磁前の回転子一極についての $B-H$ 関係が、実線のループ L_v (ACD 側は破線と重なる) で表わされるとすると、磁束密度 B_m を $1/2$ に減じたときのループ上の点 A , C , D は図のように移動して、それぞれ A' , C' , D' , ... に落ち着く*。更に磁束密度を元にもどすと、 A' , C' ,

第 17 図 瞬時過(不足)励磁後の磁気定数
Fig. 17. Permeability μ and hysteresis angle α after over-and underexcitation.

第 18 図 不足励磁後のヒステリシスループの求め方

Fig. 18. A drawing method of hysteresis loop inside rotor after underexcitation.

D' , ... 点はマイナーループ上に矢印のように移動して元の点 A, C, D 点にもどる。しかし、 F' 点はマイナーループ上を移動して F'' 点に落ち着き、元の点 F より内側の点となる。結局、瞬時不足励磁後のループは図の太い破線のような $L_{v'}$ になり、元のループ L_v よりその面積は、小さくなる。この瞬時不足励磁による面積減少の程度は、最大磁束密度 B_m が大きくなるほど大となることは容易に予想できる。

この不足励磁後のループは、マイナーループ F', F'' を、直流ループから直接求めることができないが、次のようにして測定することができる。第 19 図は直流ヒス

*: 上昇曲線上の点 $C, D, \dots$ はマイナーループ上を図のように下降して C', D' 点に落ち着くが、下降曲線上の点 F は主ループ上を F' 点に落ち着く。

第 22 図 試料電動機の同期脱出時特性 ($n=2$)

Fig. 22. Synchronous pull-out characteristics of sampled motor (overexcitation).

第 23 図 試料電動機の同期脱出時特性 ($n=0.5$)

Fig. 23. Synchronous pull-out characteristics of sampled motor (underexcitation).

時間と共に変化しない。これは回転子上からみたため、固定子側からみるときは電源周波数で交番する L_1' のループで表わされ、そのヒステリシス損に相当した入力電源から回転子に常に供給され、出力に変換されることになる。従って、負荷さえ一定ならば、瞬時過励磁後は大きな負荷を負って安定に動作できることになる。これは実験的にも確認された。従って、Roters 氏、O'Kelly 氏⁽⁴⁾らが、瞬時過励磁後の脱出トルクの増加は、回転子に永久磁石を用いた同期電動機としてのトルクが加わるためであると述べているのは誤りである。

上記したことから、瞬時過励磁は入力電圧（または電流）を連続して変える必要があること、また最高電圧に保つ時間は、一応、電源周波数の 1 サイクルに相当する時間でよいといえるが、数サイクルの時間保てば十分といえよう。

但し、瞬時過励磁後の特性は電動機の負荷急変などにより、回転子が振動し、瞬時的に同期速度の上下にはずれるようなことがあると、徐々に第 14 図のループ L_1' から L_1 にもどって、トルクは瞬時過励磁前の値に減少するようになる。従って、瞬時過励磁後の運転には次のような負荷が適しているといえよう。

(1) 負荷一定か、負荷が緩やかに変化する場合は大きな出力を負って高効率、高力率運転ができる。

(2) 同期時、瞬時過励磁しない前の脱出トルク以下の負荷で使用し、電流の減少、高効率、高力率で省エネルギー運転とする。

4. む す び

以上述べた瞬時過(不足)励磁後の電動機特性は、ヒステリシス電動機特有の現象でそれ自身大いに興味があるが、その他に瞬時過励磁現象は電動機の出力、効率、力率等あらゆる面で特性を大幅に改善する。また電動機に特別の加工を必要としない点も優れている。

瞬時過励磁現象を実際の電動機に適用するには、急激な負荷変化で同期を脱出したときに、自動的に再び瞬時過励磁することが必要となろう。そのためには、瞬時過励磁による入力電流の変化を検出することが便利と考えられるが、実際の方法は今後の課題としたい。

最後に、試作に御協力戴いた、オリエンタルモータ(株)の岩佐、米窪氏、東北金属(株)の矢崎氏他関係各位、ならびに実験に協力された卒研生の菊池、一ノ瀬両君、当研究室の久保田君に感謝致します。

(昭和 55 年 5 月 28 日受付、同 56 年 2 月 17 日再受付)

文 献

- (1) H. C. Roters: "The Hysteresis Motor-Advances which Permit Economical Fractional Horsepower Ratings", *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs*, 66, 1419 (1947)
- (2) 草刈・湧井:「ヒステリシス電動機の瞬時過不足励磁に対するトルク履歴現象に就て」, 岩手大学工学部研究報告, 13, 139 (昭 35-3)
- (3) 奥野, 他:「小形 2 相同期電動機の過励磁特性」, 昭 36 電氣四学会連大 No. 554
- (4) D. O'Kelly: "Hysteresis Motor with Overexcitation and Solid-state Control", *Proc. Inst. Elect. Engrs* 125, 288 (1978)
- (5) 宮入・片岡:「ヒステリシス電動機の基本等価回路」, 電学誌 85, 1740 (昭 40-10)
- (6) 湧井:「反動トルクをもったヒステリシス電動機とその解析法」, 電学論 B, 98, 781 (昭 53-9)
- (7) 草刈・湧井:「ヒステリシス電動機の同期脱出トルクについて」, 岩手大学工学部研究報告, 12, 62 (昭 34-3)