対称位置短絡線をもつ電動パワーステアリング用 低騒音 DC モータのブラシ温度上昇の低減*

吉 桑 義 雄^{*1}, 今 城 昭 彦^{*1}, 大 穀 晃 裕^{*2}
田 中 俊 則^{*3}, 岡 崎 正 文^{*4}

Temperature Rise Reduction of Silent DC Motor Brushes for Electrical Power Steering with Short Circuit Wires in Symmetrical Position

Yoshio YOSHIKUWA^{*5}, Akihiko IMAGI, Akihiro DAIKOKU,
Toshinori TANAKA and Masafumi OKAZAKI

^{*5} Advanced Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation,
8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki-shi, Hyogo, 661-8661 Japan

As the output of DC motors for electrical power steering becomes higher, noise reduction and temperature rise reduction are increasingly demanded. We previously proposed the short circuit wires is symmetrical position and realized a noise reduction, but the characteristics of the motor are affected by the resistance of the short circuit wires. Therefore, we then examine the relationship between the resistance of the short circuit wires and the brush current and the winding current in detail. As a result, it was proven that the level of the exciting force is large when the resistance is large, and that the maximum value of the brush temperature rise is large when the resistance is small. And we propose a brush current control method which minimizes the maximum value of the brush temperature rise. As a result, by controlling the electric power consumption of a homopolar brush equally, we can decrease the maximum value of the brush temperature rise.

Key Words: Measurement and Control, Electric Equipment, Noise, DC Motor, Brush, Current, Temperature Rise, Reduction, Electrical Power Steering

1. 結 言

自動車の電動パワーステアリングは、運転者が発生するトルクに対して電動機を用いて動力補助をおこなう装置である。従来の油圧式では油圧ポンプを常に高圧に保つ必要があるのに対し、応答性のよい電動式ではハンドル回転時のみ駆動力を発生すればよい。そのため電動パワーステアリングの方がシステム全体としての効率がよくなり、燃費が 3~5%向上する^①ことから、その市場は急速に拡大しつつある^②。

電動機には安価な DC モータをよく用いるが、モータの電流値は一般的に大きく、巻線やブラシでは多くのジュール熱が発生する。巻線は熱容量の大きなコアと接触しているため温度上昇は比較的小さいが、ブラシは熱容量が小さいため温度上昇が大きい。モータは自動車内の高温環境下に設置され、またモータ内部は

密閉されているので放熱などの効果はあまり期待できず、ブラシの温度は極めて高くなる。ブラシは樹脂製のブラシ保持器に設置するため、ブラシが高温になるとブラシ保持器が溶融する可能性がある。このような観点から、電動パワーステアリング用 DC モータのブラシ温度上昇に関する検討は重要である。

中型車や大型車を対象とした高出力 DC モータでは、モータ構造を 4 極の重ね巻方式とすることが多い^③。正極および負極のブラシ数は各 2 個であるが、製造誤差などの影響で同極性のブラシと整流子の接触状態が不均一な場合、巻線電流およびブラシ電流は不均一になる。モータ回転時の巻線電流分布が回転軸に対して非対称になると、半径方向に加振力が発生して騒音の原因となるため、筆者らは対称位置の整流子片間を結ぶ対称位置短絡線を提案して低騒音化を図っている^④。しかし対称位置短絡線をもつ DC モータでは、巻線電流分布の不均一は緩和されるが、ブラシ電流の不均一は大きくなる。

自動車のハンドルを大きく切って保舵する場合には、モータは回転しないためブラシと整流子の接触状態が長時間変わらず、特定のブラシに大電流が流れ続ける

* 原稿受付 2004 年 12 月 20 日。

^{*1} 正員、三菱電機(株)先端技術総合研究所(〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1)。

^{*2} 三菱電機(株)先端技術総合研究所。

^{*3} 三菱電機(株)姫路製作所(〒670-8677 姫路市千代田町 840)。

^{*4} 正員、三菱電機(株)姫路製作所。

E-mail: Yoshikuwa.Yoshio@wrc.melco.co.jp

可能性がある。ブラシ保持器が溶融しないためには、電流の大きいブラシのジュール熱を低減して温度上昇を抑制する必要がある。すなわち、温度上昇が最大となるブラシの温度上昇を低減することが必要である。

そこで本論文では、対称位置短絡線をもつ低騒音 DC モータを対象に、ブラシ温度上昇の最大値を低減する方法について示す。まず巻線電流とブラシ電流に対する対称位置短絡線の影響について検討する。次にブラシ電流を制御してブラシ温度上昇の最大値を最小にする方式を提案し、実験によりその効果を示す。

2. DC モータの電流分布

供試モータの仕様は、極数 4、整流子片数 22、重ね巻方式とした。モータの巻線図およびブラシと整流子が接触する部分の断面図を図 1 に示す。ブラシ A, B は正極、ブラシ C, D は負極であり、整流子内の c1～c22 は整流子片を示している。ブラシの幅は整流子片の幅と同寸法に設計しており、各ブラシは 1 枚または 2 枚の整流子片と接触する。

DC モータの回路モデルを図 2 に示す。ここで I は端子電流、 I_A, I_B, I_C, I_D はそれぞれブラシ A, B, C, D の電流、また例えば I_{AC} は正極ブラシ A と負極ブラシ C の間の巻線電流を示している。また R1～R22 は隣接

Fig.1 Winding diagram and cross-section of the commutator

Fig.2 Model of the DC motor circuit

する整流子片間の巻線を示す。図の点線で囲む部分は電機子を示し、電機子内部の巻線は 4 個の並列回路を構成している。なお、ブラシ温度上昇の最大値はハンドル保舵時に特に大きくなるため、本論文ではモータ静止状態について検討することとし、巻線のインダクタンスは無視して抵抗のみを考慮する。

図 2 において正極ブラシ A は 2 枚の整流子片 c1, c2 と接触し、ブラシ B は 2 枚の整流子片 c12, c13 と接触している。また負極ブラシ C は 1 枚の整流子片 c7 と接触し、ブラシ D は 1 枚の整流子片 c18 と接触している。このとき電機子内部の 4 個の並列回路において、正極ブラシと負極ブラシ間の巻線数はいずれも 5 個であり、ブラシ間の抵抗は等しいので巻線電流 $I_{AC}, I_{AD}, I_{BC}, I_{BD}$ は均一になる。したがって、ブラシ電流 I_A, I_B, I_C, I_D も均一になるので、同極性のブラシで発生するジュール熱は同等になる。

次に同極性のブラシと整流子片の接触枚数が異なる場合について検討する。例えば図 2 においてブラシ A と整流子片 c1 が非接触になる場合、ブラシ A は 1 枚の整流子片 c2 と接触し、ブラシ B は 2 枚の整流子片 c12, c13 と接触した状態になる。このとき正極ブラシ A と負極ブラシ D 間の巻線数は 6 個となり、ブラシ間の抵抗が大きくなるため、巻線電流 I_{AD} は他の巻線電流 I_{AC}, I_{BC}, I_{BD} と比べて小さくなる。したがって、巻線電流分布は回転軸に対して非対称になる。またこのとき正極ブラシ A と B の電流 I_A と I_B を比較すると、ブラシ電流 I_B の方が I_A より大きくなる。したがってこの状態でハンドルを保舵すると、ブラシ B で発生するジュール熱が大きくなる。

以上のように、同じ極性のブラシにおいて、ブラシと整流子片の接触枚数が等しい場合、巻線電流およびブラシ電流は均一になる。一方、ブラシと整流子片の接触枚数が異なる場合、巻線電流およびブラシ電流は不均一になる。

3. 対称位置短絡線の影響

対称位置短絡線をもつ DC モータの巻線電流およびブラシ電流について検討する。同極性のブラシと整流子片の接触枚数が異なる場合について、対称位置短絡線の抵抗をパラメータとして電流を計算する。

解析に用いた回路モデルを図 3 に示す。正極ブラシにおいてブラシと整流子片の接触枚数が異なるモデルであり、ブラシ A は 1 枚の整流子片と接触し、ブラシ B は 2 枚の整流子片と接触している。また負極ブラシ C, D はともに 1 枚の整流子片と接触している。

点線で示した 11 本の抵抗は対称位置短絡線であり、幾何学的対称位置にある整流子片間を接続している。ブラシと整流子間の抵抗は接触面の被膜や導電面積によって変わるなど複雑⁹なため、接触電圧降下として与える。電圧降下の値はブラシの極性によって異なり、ここでは実測結果⁹をもとに正極ブラシ側で 0.4V、負極ブラシ側で 0.2V とした。また端子電流 I は 15A とし、整流子片間の巻線 R1~R22 の抵抗はそれぞれ 50m Ω とした。

Fig.3 Model of the DC motor circuit with short circuit wires in symmetrical position

まず巻線電流について検討する。対称位置の巻線電流分布を比較するため、ここでは図 3 における巻線 R7~R11 の電流の平均値を $I_{bc'}$ とし、これらと対称位置にある巻線 R18~R22 の電流の平均値を $I_{ad'}$ とする。対称位置短絡線の抵抗をパラメータとして計算した $I_{ad'}$, $I_{bc'}$ の解析結果を図 4 に示す。図の横軸は対称位置短絡線の抵抗を整流子片間の巻線抵抗で正規化した値であり、対数目盛で表示している。また図の縦軸は電流である。図 4 より、巻線電流は対称位置短絡線の抵抗に依存して変わることがわかる。対称位置短絡線がない場合の巻線電流について、図 4 において短絡線の抵抗が十分大きいとしてよみると、 $I_{bc'}$ は 3.91A, $I_{ad'}$ は 3.26A であり、 $I_{bc'}$ は $I_{ad'}$ の 1.2 倍になる。また短絡線の抵抗が小さい方が巻線電流の差は小さくなり、短絡線の抵抗が極めて小さい場合、電流 $I_{ad'}$ と $I_{bc'}$ はともに 3.75A で等しくなる。なお、巻線 R2~R6 の電流の平均値および巻線 R13~R17 の電流の平均値は、いずれも $I_{bc'}$ と同じ値になる。

対称位置短絡線の抵抗が異なる 2 種類の試作モータおよび短絡線がないモータを用いて、端子電流 15A、回転数 600rpm 駆動時の半径方向加振力を実験装置⁹で測定した。モータ回転数と整流子片数で求められる整流周期成分 220Hz の加振力測定結果を図 5 に示す。

図の横軸は対称位置短絡線の抵抗を整流子片間の巻線抵抗で正規化した値であり、試作モータの短絡線抵抗正規化値は 0.2 および 2 である。また短絡線がないモータの短絡線抵抗正規化値を 1000 として示している。図 5 より、対称位置短絡線の抵抗が小さい方が加振力は小さくなることからわかる。また短絡線抵抗正規化値が 0.2 のモータの加振力は、短絡線がないモータの加振力の約 1/10 となっている。したがって、対称位置短絡線は加振力低減効果があるといえる。

Fig.4 Analytical results of the current in the windings

Fig.5 Excitation force measured by the experimental apparatus

次にブラシ電流について検討する。対称位置短絡線の抵抗をパラメータとして、正極ブラシ A, B の電流 I_A , I_B を計算および実験で求めた結果を図 6 に示す。図 6 より、ブラシ電流は対称位置短絡線の抵抗に依存して変わることがわかる。また計算結果と実験結果はほぼ同じ傾向を示しているといえる。

対称位置短絡線がない場合のブラシ電流について、図 6 において短絡線の抵抗が十分大きいとしてよみると、ブラシ A の電流 I_A は 7.2A、ブラシ B の電流 I_B は 7.8A であり、 I_B は I_A の 1.1 倍になる。また短絡線の抵抗が小さい方がブラシ電流の差は大きくなり、短絡線の抵抗が極めて小さい場合、図 6 よりブラシ A の電流 I_A は 3.8A、ブラシ B の電流 I_B は 11.2A となり、

Fig.6 Analytical and experimental results of the current in the brushes

ブラシ B にはブラシ A の 2.9 倍もの電流が流れることになる。

このように対称位置短絡線の抵抗が小さい場合には、多くの整流子片と接触しているブラシ側の電流が特に大きくなる。これは、ブラシと接触している整流子片から対称位置短絡線を経由して、非接触側の整流子片および巻線に電流が流れるためである。例えば図 3 はブラシ B が 2 枚の整流子片と接触した状態であり、ブラシ電流 I_B の一部は整流子片 c12 から対称位置短絡線を経由して、整流子片 c1 および巻線 R22 に流れている。

以上のように、対称位置短絡線の抵抗が大きい場合には、ブラシ電流の差は小さいが、巻線電流の差が大きくなる。したがってハンドル回転時に加振力が発生しやすくなる。また対称位置短絡線の抵抗が小さい場合には、巻線電流の差は小さくなるが、ブラシ電流の差が大きくなる。したがってハンドル回転時の加振力は低減できるが、ハンドル保舵時にブラシ温度上昇の最大値が大きくなる。そこで、対称位置短絡線の抵抗が小さいモータにおいて、ブラシ温度上昇を低減する方法について検討する。

4. ブラシ電流制御方式の検討

同極性のブラシと整流子片の接触状態が異なる場合、対称位置短絡線の抵抗が小さいモータではブラシ電流の不均一が特に大きくなる。そこで温度上昇が最大となるブラシの温度上昇を低減するために、従来の端子電流制御に対し、4 個のブラシそれぞれに流れる電流を制御するブラシ電流制御方式を検討する。

4・1 ブラシ温度上昇の最大値が最小となる条件

ブラシ電流制御をおこなう DC モータの回路モデルを簡略化して図 7 に示す。簡単にするため対称位置短

絡線の抵抗を 0Ω としており、すべての整流子片は対称位置短絡線で結ばれていることから、電機子の抵抗をまとめて R_0 、また電機子内の電流をまとめて端子電流 I と表す。ブラシ A, B, C, D の電圧をそれぞれ V_A , V_B , V_C , V_D とし、電機子がブラシ A または B と接触する部分の電圧を V_{AB} 、ブラシ C または D と接触する部分の電圧を V_{CD} とする。またブラシ A, B, C, D と整流子片間の抵抗をそれぞれ R_A , R_B , R_C , R_D とする。

Fig.7 Simple model of the DC motor circuit for brush current control

ブラシ A, B, C, D における消費電力をそれぞれ W_A , W_B , W_C , W_D とすると、以下のように表される。

$$W_A = R_A I_A^2 \quad (1)$$

$$W_B = R_B I_B^2 \quad (2)$$

$$W_C = R_C I_C^2 \quad (3)$$

$$W_D = R_D I_D^2 \quad (4)$$

また図 7 においてキルヒホッフの法則より、次式がなりたつ。

$$I_A + I_B = I_C + I_D = I \quad (5)$$

同極性のブラシ A, B における消費電力 W_A , W_B について、消費電力の最大値が最小となる条件を検討する。図 7 ではブラシ A, B が正極の場合の電流の向きを示しており、電流の大きさは、 $0 \leq I_A \leq I$, $0 \leq I_B \leq I$ とする。式(1),(2),(5)より、ブラシの消費電力 W_A , W_B とブラシ電流 I_A および端子電流 I の関係を図 8 に示す。ブラシ電流 I_A が小さい場合の消費電力最大値は W_B となり、ブラシ電流 I_A が大きい場合の消費電力最大値は W_A となるが、消費電力の最大値が最小となるのは、両者の消費電力が等しくなるときである。すなわち、同極性のブラシの温度上昇最大値が最小となる条件は、次式をみたすことである。

$$W_A = W_B \quad (6)$$

$$W_C = W_D \quad (7)$$

Fig.8 Electric power consumption in the brushes

4・2 ブラシ電流指令値の導出 モータのトルク設定値から求められる端子電流指令値を I^* とする。またブラシ A, B, C, D の電流指令値を $I_A^*, I_B^*, I_C^*, I_D^*$ とする。ブラシ温度上昇最大値が最小となる条件は式(6),(7)をみたすことであるから、式(1)~(7)を解くことにより、ブラシ電流指令値 $I_A^*, I_B^*, I_C^*, I_D^*$ は以下のように表される。

$$I_A^* = \frac{\sqrt{R_B}}{\sqrt{R_A} + \sqrt{R_B}} I^* \quad (8)$$

$$I_B^* = \frac{\sqrt{R_A}}{\sqrt{R_A} + \sqrt{R_B}} I^* \quad (9)$$

$$I_C^* = \frac{\sqrt{R_D}}{\sqrt{R_C} + \sqrt{R_D}} I^* \quad (10)$$

$$I_D^* = \frac{\sqrt{R_C}}{\sqrt{R_C} + \sqrt{R_D}} I^* \quad (11)$$

式(8)~(11)において、ブラシと整流子間の抵抗 R_A, R_B, R_C, R_D は電圧と電流の関係から求める。図7の簡易回路モデルにおいて以下の関係がなりたつ。

$$V_A - V_{AB} = R_A I_A \quad (12)$$

$$V_B - V_{AB} = R_B I_B \quad (13)$$

$$V_{CD} - V_C = R_C I_C \quad (14)$$

$$V_{CD} - V_D = R_D I_D \quad (15)$$

$$V_{AB} - V_{CD} = R_0 I \quad (16)$$

ここで未知数は $R_A, R_B, R_C, R_D, V_{AB}, V_{CD}$ である。ブラシと整流子間の抵抗に関して、ブラシの極性による違いを次式で与える。

$$\frac{R_A + R_B}{R_C + R_D} = \alpha \quad (17)$$

この α の値は実験で求めておき、端子電流の大きさやモータの回転方向によって設定する。

式(12)~(17)を解くことにより、ブラシと整流子間の抵抗 R_A, R_B, R_C, R_D は以下のように求められる。

$$R_A = \frac{V_A - V_{AB}}{I_A} \quad (18)$$

$$R_B = \frac{V_B - V_{AB}}{I_B} \quad (19)$$

$$R_C = \frac{V_{AB} - V_C - R_0 I}{I_C} \quad (20)$$

$$R_D = \frac{V_{AB} - V_D - R_0 I}{I_D} \quad (21)$$

ここで

$$V_{AB} = \frac{\frac{V_A}{I_A} + \frac{V_B}{I_B} + \frac{\alpha(V_C + R_0 I)}{I_C} + \frac{\alpha(V_D + R_0 I)}{I_D}}{\frac{1}{I_A} + \frac{1}{I_B} + \frac{\alpha}{I_C} + \frac{\alpha}{I_D}} \quad (22)$$

なお、式(17)の α は温度等の条件によって多少変化するが、式(8)~(11)のブラシ電流指令値に与える影響は小さいため、実用上問題ないと考えられる。

ブラシ温度上昇の最大値を最小にするためのブラシ電流制御のブロック線図を図9に示す。モータの4個のブラシにはPWMインバータから電圧が与えられる。電流検出器を用いて3個のブラシ電流 I_B, I_C, I_D を測定し、式(5)から残りのブラシ電流 I_A を求める。またPWMインバータのスイッチング周期に対するオン時間の比と電源の電圧値から、ブラシの電圧 V_A, V_B, V_C, V_D を求める。次にブラシの電流と電圧の値を用いて、式(18)~(22)からブラシと整流子間の抵抗 R_A, R_B, R_C, R_D を求める。またブラシと整流子間の抵抗および端子電流指令値 I^* を用いて、式(8)~(11)からブラシ電流指令値 $I_A^*, I_B^*, I_C^*, I_D^*$ を決める。そしてPI制御器によりブラシ電流計測値との誤差が小さくなるように電流制御をおこなう。

Fig.9 Block diagram of the brush current control method

5. ブラシ電流制御の実験

ブラシ電流制御で同極性のブラシの消費電力を等しくして、ブラシ温度上昇の最大値を低減する。ブラシ電流制御の駆動回路モデルを図 10 に示す。8 個のトランジスタを用いて 4 個のブラシ電圧を制御している。トランジスタ TA1, TB1, TC2, TD2 をオンにした場合は、ブラシ A, B は正極、ブラシ C, D は負極となり、図 10 の矢印の方向に電流が流れてトルクが発生する。またトランジスタ TA2, TB2, TC1, TD1 をオンにした場合は、ブラシ A, B は負極、ブラシ C, D は正極となり、逆方向のトルクが発生する。また図では省略しているが、ブラシ A, B, C, D 中の 3 個のブラシ電流を電流検出器で測定している。

Fig.10 Model of the brush current control driving circuit

ブラシ温度上昇の最大値はハンドル保舵時に特に大きくなるため、モータを固定して、ブラシと整流子の接触状態を一定として実験をおこなった。ブラシ A, B は正極、ブラシ C, D は負極であり、 α の値はブラシと整流子間の接触電圧降下の実測結果⁹⁾をもとに $\alpha=2$ とした。実験に用いたモータの対称位置短絡線の抵抗を整流子片間の巻線抵抗で正規化した値は 0.2 である。またサンプリング周波数は 10kHz、PI 制御の交差周波数は 30Hz である。

モータに端子電流 5A を 5 分間供給し、熱電対をブラシ表面に付けて正極ブラシ A, B の温度を測定した。端子電流制御による温度測定結果を図 11(a)に、またブラシ A, B の消費電力を等しくするブラシ電流制御による温度測定結果を図 11(b)に示す。図 11(a)の端子電流制御の場合、ブラシ A の温度はブラシ B の温度よりも大きく変化しており、単位時間あたりの温度変化を実験開始時の温度変化率でよみると 20K/min、また 5 分後の温度上昇は 29K である。一方で図 11(b)のブラシ電流制御の場合、ブラシ A, B の温度変化はほぼ同じ傾向であり、単位時間あたりの温度変化は 12K/min、また 5 分後の温度上昇は 18K である。したがって、ブラシ電流制御で同極性のブラシの消費電力を等しくすることにより、温度上昇の大きいブラシ A

の温度変化率および 5 分後の温度上昇を約 40%低減できたといえる。

(a) Terminal current control (b) Brush current control

Fig.11 Experimental results of the temperature rise reduction of the brushes

6. 結 論

対称位置短絡線をもつ DC モータの特性は、対称位置短絡線の抵抗に依存する。そこで対称位置短絡線の抵抗と巻線電流およびブラシ電流の関係について検討した。また各ブラシの電流を制御するブラシ電流制御により、ブラシ温度上昇の最大値の低減方法について検討した。その結果、以下の事項がわかった。

- (1) 対称位置短絡線の抵抗が大きい場合には加振力が発生しやすく、また対称位置短絡線の抵抗が小さい場合にはブラシ温度上昇の最大値が大きくなる。
- (2) ブラシ電流制御で同極性のブラシの消費電力を等しくすることにより、ブラシ温度上昇の最大値を約 40%低減できることを実験で確認した。

文 献

- (1) Yasuo Shimizu and Toshitake Kawai, Development of Electric Power Steering, *S4E Paper*, No.910014 (1991)
- (2) W.Ijiri, T.Daido and J.Y.Vourch, Development of Energy Saving Power Steering System, *FISITA Congress Technical Paper*, No.1998 (1998), 3094-3109.
- (3) 島崎保美, 電動パワーステアリングの市場・技術動向, 月刊トライボロジー, No.194 (2003), 22-24.
- (4) Toshinori Tanaka, Akihiko Daikoku, Akihiko Imagi and Yoshio Yoshikuwa, An Advanced Electrical Power Steering Motor (2), *S4E Paper*, No.2001-01-0483 (2001)
- (5) 吉桑義雄, 今城昭彦, 大穀晃裕, 田中俊則, 岡崎正文, 対称位置短絡線による電動パワーステアリング用直流機の低騒音化, 電気学会論文誌 D, 122-7 (2002), 736-743.
- (6) 一木利信, 電機用ブラシの理論と実際, (1978), 26-28., コロナ社