

特集：新型車（デミオ EV）

23

デミオ EV の電子式巻線切り替えモータドライブの開発

Development of Motor-Drive with Electronic Winding Change System for Demio EV

佐藤 隆之^{*1}
Takayuki Sato

新富 将克^{*2}
Masakatsu Shintomi

瀬尾 宣英^{*3}
Nobuhide Seo

要約

電気自動車（EV）の普及促進には、航続距離は重要な改善課題の一つである。この課題に対して、このたび開発した「デミオ EV」では電子式巻線切り替えモータドライブシステムを採用し、効率を向上させること、およびシステム自体を小型軽量化することで航続距離改善を図っている。この巻線切り替えとは、低速回転用と高速回転用の異なる二つのモータ巻線を電子デバイスにより切り替えるシステムである。二つのモータ巻線はそれぞれの割り当て回転範囲において高効率に設計されており、二つを巻線切り替え機構で切り替えることによって広範な領域で高効率を実現している。また巻線を切り替える際に発生するトルクショックを抑制する制御を織り込んでおり、切り替えを感じさせない走行フィールを実現している。本稿ではこれら巻線切り替えシステムおよび巻線切り替え時の制御について述べる。

Summary

For the popularization of EV, the short driving range is one of the most important task. To improve this task, Mazda's DEMIO EV adopts the electronic winding change system that makes to improve its efficiency and reduce its size and weight. This winding change system consists of two windings for low and high speed range, and switches the windings by the electronic devices. The each winding is designed to be high efficiency at the each speed range. Therefore, with coupling two windings, the high efficiency is realized on the wide speed range. In addition, the torque pulsation suppression control technology which is actuated when winding is changed enables seamless dynamic performance. The electronic winding change system and the control at winding changed are explained in this paper.

1. はじめに

近年の環境意識の高まりに伴って、走行中に二酸化炭素を排出しない電気自動車（EV）への関心が強くなってきている。自動車各社の取り組みにより一般ユーザへの認知度は向上したが、更なる普及には航続距離の延長が望まれている。このたび開発した「デミオ EV」では電子式巻線切り替えモータドライブシステムを採用して効率を向上させること、およびシステム自体を小型軽量化することで航続距離延長に貢献している。また巻線切り替え時のトルクショック等を抑え

る制御を織り込むことによって伸びやかでストレスのない走行フィールを実現した。その開発内容を報告する。

2. 巻線切り替えシステム

2.1 巻線切り替えとは

EV 用をはじめとする電気駆動用モータに対する要求性能として、低速回転域では段差乗り越えなどの対応のため高トルクが必要であり、かつ高速巡航に対応するため高回転も可能でなければならない。しかしながらこの高トルクと高回転という要件は相反する性質がありモータ構造は異

*1~3 電気駆動システム開発室
Electric Drive System Development Office

なってくる。例えば高トルクに対応する場合は巻線数を増やす必要があるが、一方の高回転域ではその増やした巻線と永久磁石によって大きな誘起電圧が発生して所望のトルクや回転数に到達できないことがある。またその逆の高回転域でのトルク、回転数を達成するために巻線数を低減すると低速での高トルクを発生できないことがある。一つのモータで銅損と鉄損のトレードオフを探り、この高トルクと高回転の要件を両立させることは可能ではあるものの、その際は高効率な運転エリアが縮小する傾向となる。

本開発では一つのモータでこれらの要求性能を満足させるための手段として巻線切り替え技術を用いている。その内容について述べる。

Fig.1 に本開発で採用した電子式巻線切り替えの概念図を示す。

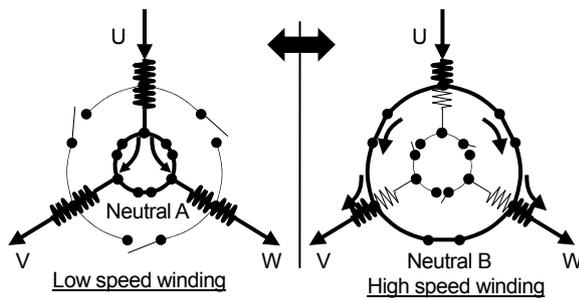


Fig.1 Conceptual Diagram of the Electric Winding Change

開発したモータは永久磁石同期モータであるが、そのステータ巻線は回転数に応じて電子デバイスによって巻線数が選択可能な構造となっている。具体的には高速用と低速用の二つの中性点を備えておりこれを切り替えている。例えば低速回転時はスター結線の中心側の中性点 A (Neutral A) を導通させて全巻線を使用し高トルクを発生する。これを低速巻線 (Low speed winding) と称する。一方で高速回転時にはそれぞれ三相の巻線途中の中性点 B (Neutral B) を導通させて短い巻線のスター結線を構成し、ロータ内の埋込永久磁石による誘起電圧の影響を低減して高回転特性を実現している。これを高速巻線 (High speed winding) と称する。これら低速巻線、高速巻線はそれぞれの使用範囲で高効率となるように設計されており、巻線切り替え機構で両巻線の高効率部分を連結することにより従来の永久磁石同期モータよりも広い回転数範囲で高効率なモータドライブが可能となっている (Fig.2)。

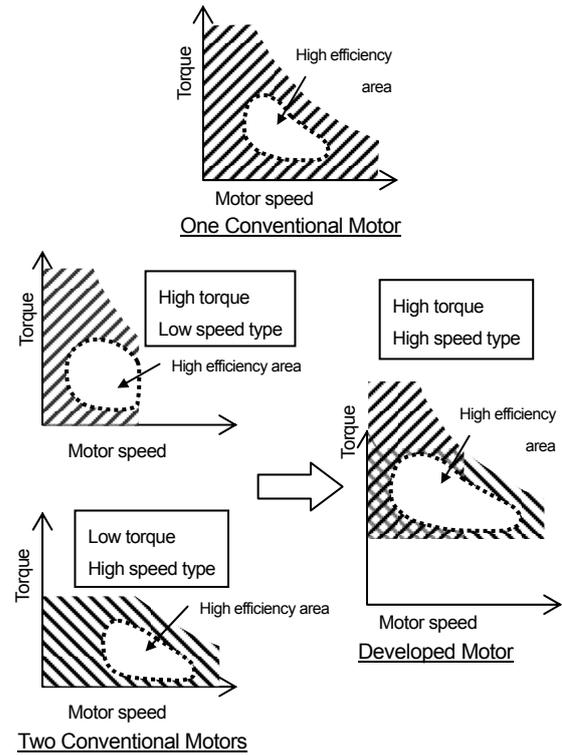


Fig.2 Torque-Speed Characteristic of the Traction Motor

2.2 巻線切り替え機構の小型軽量化

本開発以前の巻線切り替えシステムは内部の電子デバイスの振動耐久性を考慮してそれらを許容環境下であるインバータ内部に搭載していた。これにより、Fig.3 の Neutral A と B、それらにつながる電力ケーブルインバータ内に引き込むことになりケーブル本数が増えるため筐体が大きくなり重量も増加していた。

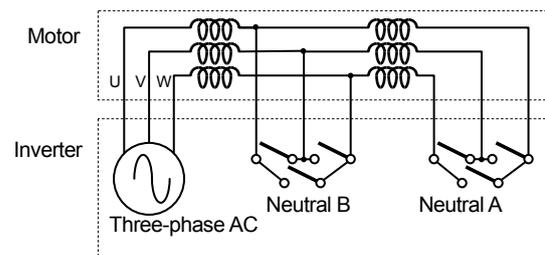


Fig.3 Motor-Drive Structure of Previous System

一方デミオ EV では航続距離改善の観点から巻線切り替え機構をモータ側に搭載することによってシステムの小型軽量化を図っている (Fig.4)。

デミオ EV では、モータの振動環境の見極めを行い巻線切り替え部の耐久性向上を図った。実際に耐久試験路を走行し、その振動波形を計測し FFT 解析および頻度解析を行ってモータ振動要件の定量化をした。そしてその振動環境下で十分な耐久性を確保するため電子デバイスの軽量部品への置換を進めた。また比較的重量のある部品は耐久性

の高いレイアウト配置へ見直しを行った。これによりモータ筐体内に搭載することが可能となり、インバータ～モータ間の電力ケーブルは以前のシステムでは9本あったものを Fig.4 に示したようにインバータからの三相交流電源線 (Three-phase AC) の3本のみとすることができた。またインバータ、モータは電力ケーブルを削減することによって筐体構造を簡素化でき、軽量化合計で約7kgの重量低減を達成、高出力高效率でありながら小型軽量化が実現できた。

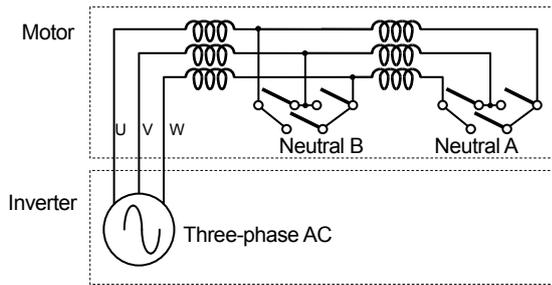


Fig.4 Motor-Drive Structure of DEMIO EV

3. 巻線切り替え制御技術

3.1 巻線切り替え時のトルクショックと過大電流の抑制

(1) トルクショックや過大電流の発生原因

モータを制御するインバータ内の制御ループは、モータを等価な回路定数 (L_d, L_q, R, K_e) として内部に持っており、目標トルクを発生させるために回路定数に基づいてモータに流す電流の大きさや位相を適切に制御している (Fig.5, 式 (3・1))。

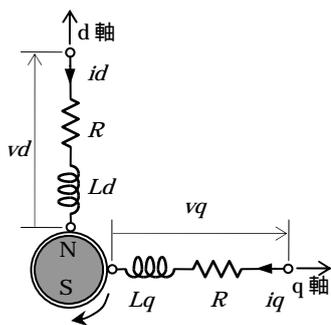


Fig.5 d-q Equivalent Circuit Model of Motor

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega K_e \end{bmatrix} \quad (3\cdot 1)$$

v_d : d 軸電圧, v_q : q 軸電圧, R : 巻線抵抗,
 ω : 角速度, L_d : d 軸リアクタンス,
 L_q : q 軸リアクタンス, i_d : d 軸電流, p : d / dt ,
 i_q : q 軸電流, K_e : 誘起電圧定数

デミオ EV は巻線切り替え機構を有しているため、モータ回路定数は低速巻線と高速巻線の2種類あり、巻線切り替えの際にインバータ内の制御ループの回路定数 (Controller parameter) の切り替えを行っている (Fig.6)。

実際の巻線切り替え時には、制御ループの回路定数 (Controller parameter) は巻線切り替え指令 (Controller command) と同時に瞬時に切り替わるものの、実機側の巻線状態 (Winding state) はソフトウェアの構造上の制約により巻線切り替え指令 (Controller command) から最大で1制御周期遅れて切り替わる。これは制御ループが一定周期で動作しているのに対し、巻線切り替え制御は三相電流位相に連動しているためである。この間は制御ループの回路定数 (Controller parameter) と実機側の巻線状態 (Winding state) には乖離が生じている。この乖離により q 軸電流フィードバック値 (i_q feed back) との偏差が大きくなりインバータ内の制御ループは過大な電流指令値 (i_q reference) を発することになる。そして次の制御周期で巻線側は高速巻線に切り替わり、インピーダンスの低い高速巻線に電流が一気に流れ込み、q 軸電流 (i_q) がオーバーシュートしてこれによりトルクショックが発生、また過大電流が発生する (Fig.6)

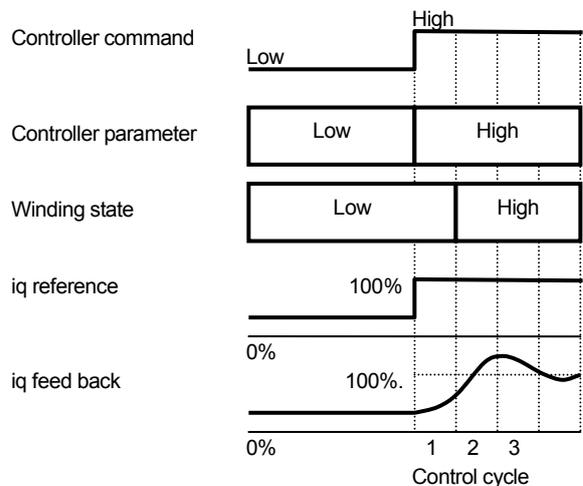


Fig.6 No-Countermeasure Against Deference on the Control

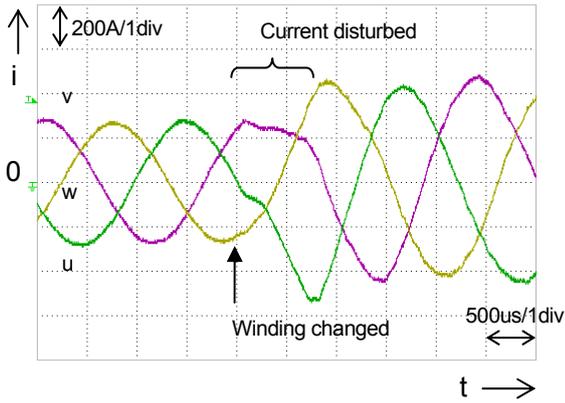


Fig.7 Disturbed 3-Phase AC of Motor

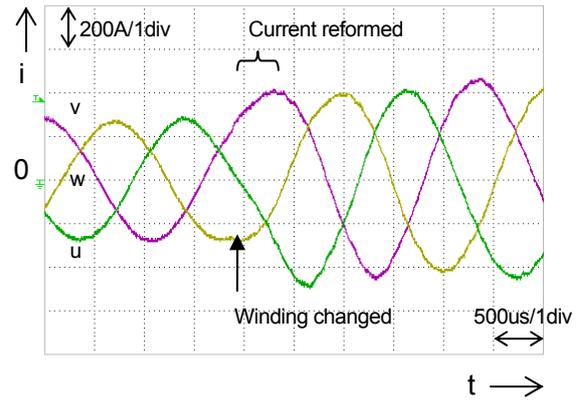


Fig.9 Reformed 3-Phase AC of Motor

(2) トルクショックや過大電流への対応

トルクショックや過大電流の原因である q 軸電流 (iq) のオーバershootをなくすため、最適な指令値の立ち上げ特性を設計した。

制御ループの回路定数と実際の巻線状態の乖離は正は構造上困難であるため、制御ループの過大な電流指令値 (iq reference) に対する対策を講じることにした。当初、巻線切り替え指令 (Controller command) と同時に電流指令値を一気に引き上げていたものを複数ステップに分けて段階的に引き上げる制御を開発した (Fig.8)。Fig.9 に対策後の改善された波形を示す。

上記は低速巻線から高速巻線への遷移に対する制御であるが、逆方向の高速巻線から低速巻線への遷移においても過大電流指令によるトルクショックが発生するため同様の制御を織り込んでいる。

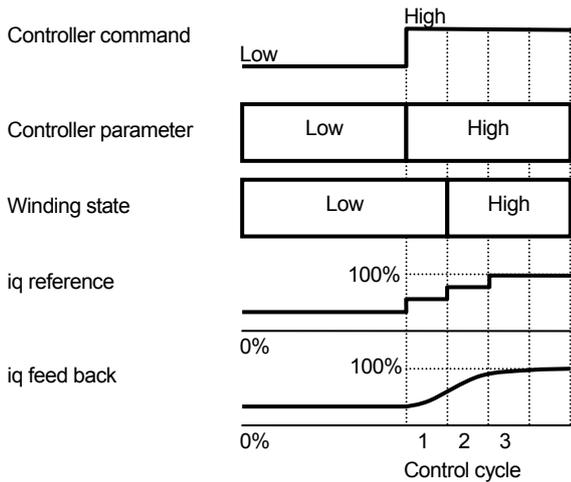


Fig.8 Taking Countermeasure Against Diference on the Control

3.2 巻線切り替え時の弱め磁束制御最適化

(1) 電流位相ずれによるトルクショック

EV では駆動用バッテリーが低 SOC (State of Charge) 状態になるとそれに伴ってバッテリー出力電圧が低下する。そのため低速巻線から高速巻線に切り替わった直後でも、ある電圧以下では弱め磁束制御を行う必要がある。切り替え指令と同時に回路定数 (Ld, Lq, R, Ke) が低速巻線から高速巻線に切り替わるため、モータ電流も瞬時にステップ状に切り替わる必要があるが、回路定数の変化に追従しないと電流位相ずれを起こす。このように位相ずれにより過渡的に電流が変化した場合、モータに対して余分な電流が流れたことになり、この乖離が原因で巻線切り替えのタイミングで不要なトルクショックが発生する。

そのバッテリー電圧が低い状態での低速巻線から高速巻線への切り替え時のモータ電流波形を示す (Fig.10)。

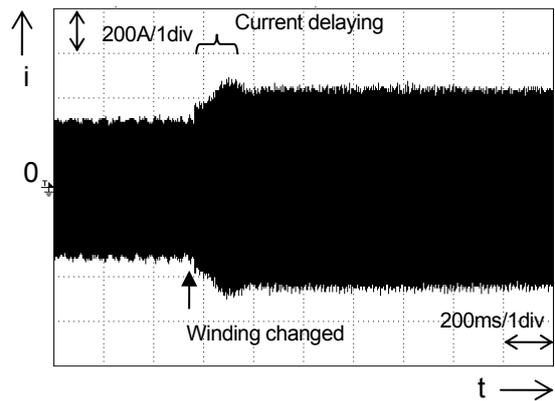


Fig.10 Motor Current Before Turning the Flux-Weakening Offset Block

(2) 電流位相の最適化

低バッテリー電圧状態下での低速巻線から高速巻線への切り替えにおいて、モータ電流が過渡的に変化する原因は弱め磁束制御の位相に直接関わる d 軸電流 (i_d) 電流の応答性の改善を行った。具体的には dq 軸電流算出ブロック (d-q current calculation block) に電流位相最適化を図るための弱め磁束補正ブロック (flux-weakening offset block) を追加した (Fig.11)。このブロックは高速巻線に切り替わった際の電流位相角を予測しておき、切り替わった際に瞬時に補正するフィードフォワード制御である。それは dq 軸電流算出ブロック (d-q current calculation block) から出力される低速巻線 d 軸電流値指令値 ($i_d \text{ ref1}$) に d 軸電流位相補正 ($i_d \text{ ref2}$) を加えて高速巻線側の d 軸電流指令値 ($i_d \text{ reference}$) を生成する (Fig.12)。

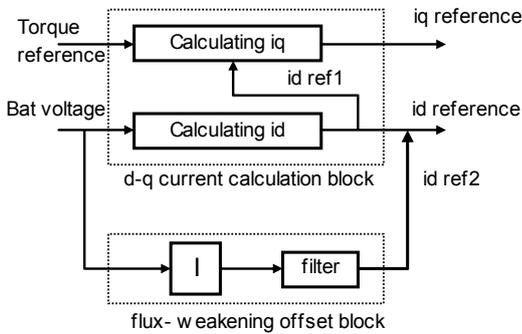


Fig.11 d-q Current Calculation with Flux-Weakening Offset Block on Changing Winding “Low” to “High”

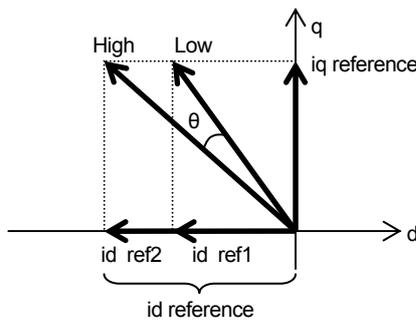


Fig.12 Motor Current Vector Diagram of Each Winding Status at Changing Winding

弱め磁束補正ブロック (flux-weakening offset block) を追加した場合のモータ電流波形を示す (Fig.13)。

巻線切り替え直後にモータ電流が瞬時に立ち上がっている状況が確認できる。これは切り替え直後に高速巻線の回路定数に合致した電流に供給できていることを表している。また実車においてもトルクショックを感じさせない切り替えができていたことを確認できた。

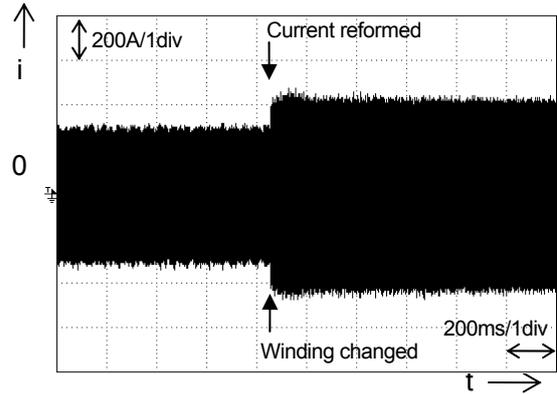


Fig.13 Motor Current after Turning the Flux-Weakening Offset Block

4. あとがき

このたびのデミオ EV のモータドライブシステムは (株) 安川電機と共同開発したものである。電子式巻線切り替え方式を採用して、かつ巻線切り替え時のトルクショックを抑える制御技術を織り込むことにより、小型高効率でスムーズな走行を可能にするモータドライブシステムを開発することができた。今後もこの技術を発展させ環境への負担が小さい車両開発を通じて社会に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 若山ほか：水素燃料電池ハイブリッドシステムの開発, マツダ技報, No27, pp.31-35 (2009)

著者



佐藤 隆之



新富 将克



瀬尾 宣英