

# ブラシレスモータ EPS システム 1 相断線故障時アシスト制御の開発

## Development of Brushless Motor EPS Assist Control for Disconnection Failure

野澤哲也 T. NOZAWA 新谷泰規 Y. SHINTANI 玉泉晴天 T. TAMAIZUMI  
日比淑江 T. HIBI 板本英則 H. ITAMOTO

When failure occurs in an electric component of an electric power steering (EPS) system, measures are taken to stop assist control. After the failure occurs, EPS results in no assist. In such case, the driver must steer the vehicle by torque only, which places a burden on the driver. In order to alleviate this burden, we have developed EPS assist control for a failure in which only one of the three phases is unable to supply power to a motor in the brushless motor EPS.

**Key Words:** steering system, EPS, brushless motor, functional safety

### 1. はじめに

燃費向上に貢献できる電動パワーステアリング(EPS)が、環境意識の高まりから急速に普及している。EPSは前軸荷重、いわゆる軸力が小さい軽自動車から搭載がスタートした。現在はEPSのアシスト出力向上に伴い、中型車、さらには大型車にも搭載が進んでいる。

一方で、機能安全に関するISO26262の規格化によって、電子制御システムに対して安全に関する解析・設計・製造のアセスメントが求められている。この中でEPS故障時の影響について解析が必要となってきている。EPSは故障発生時、アシスト出力を停止させ故障による影響を遮断する事により安全状態へ移行する。結果的には、アシスト出力が失われ運転者の操舵トルクは増加し、運転者に負担をかける状況になっている。

そこで故障発生後に出来るだけアシスト出力を継続し運転者負担を軽減することを開発の目的とした。本報では、ブラシレスモータを搭載したEPSにおいて、モータライン断線などで、3相のうち1相のみモータに電力供給ができなくなった場合でも操舵トルクアシストを継続できる制御方法について紹介する。

### 2. EPSのアシスト制御

EPSは、軸力に対して運転者の操舵トルクを軽減するために、モータからのアシストトルクを操舵トルクに応じて付加するシステムである(図1)。運転者が操舵

するとその操舵トルクの大きさをトルクセンサで検知する。トルクセンサで検知された値に応じて、アシスト電流値を演算する。このアシスト電流値に従った電流をモータへ流し、アシストトルクを発生させる。このアシストトルクによって、運転者の操舵トルクが軽減される(図2)。

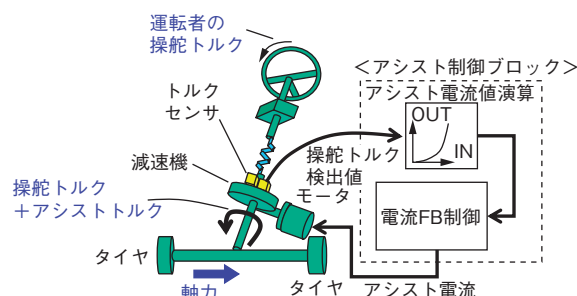


図1 EPSアシスト制御方法の概略

Schematic diagram of EPS assist control method

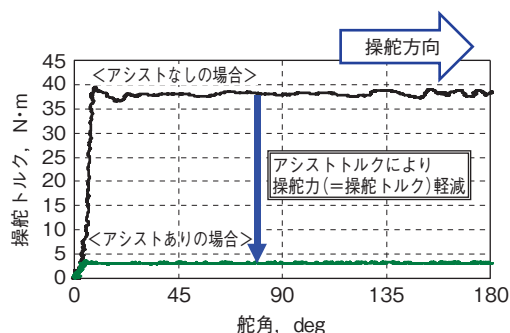


図2 操舵時の操舵トルクとアシストトルクの状況  
Conditions of steering torque and assist torque at the time of steering

### 3. ブラシレスモータの通電方法

アシストトルク、すなわちモータトルクを発生させるブラシレスモータへは、通常、式(1)を用いて各相のモータ駆動回路に通電している。

$$\begin{pmatrix} I_u \\ I_v \\ I_w \end{pmatrix} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \times I_q \times \begin{pmatrix} \sin \theta_e \\ \sin(\theta_e + 120) \\ \sin(\theta_e - 120) \end{pmatrix} \quad \dots(1)$$

$I_u$  : U 相電流 [A]

$I_v$  : V 相電流 [A]

$I_w$  : W 相電流 [A]

$I_q$  : アシスト電流 [A]

$\theta_e$  : モータ電気角 [deg]

ブラシレスモータはモータ電気角位置に応じて各相に流す電流の大きさを変えることで、所定値のアシスト電流に応じたアシストトルクを発生させることができる(図3)。

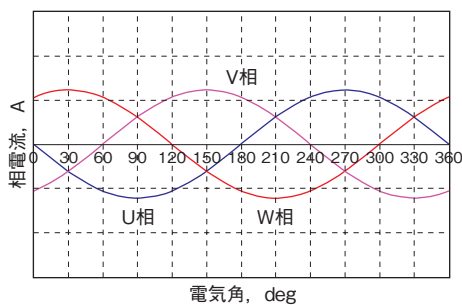


図3 ブラシレスモータの各相通電方法 (通常時)  
Conductivity method for each phase of brushless motor (during normal operation)

### 4. ブラシレスモータ駆動部の故障

ブラシレスモータ駆動部は、一般的にインバータ (MOS FET × 6 個)、ブリドライバ、相開放リレー、モータラインハーネスとコネクタ、および電流センサから構成されている(図4)。このようにブラシレスモータ駆動部は、多くの部品から構成され、また大電流 (50 アンペア以上) を通電することなどもあって、故障発生を無視することは出来ない。これまで、MOS FET のオープン故障やモータライン(インバータとモータの間)断線故障のような 3 相のうち 1 相のみ電源からモータに電力供給できなくなった場合は、アシスト出力を停止している。

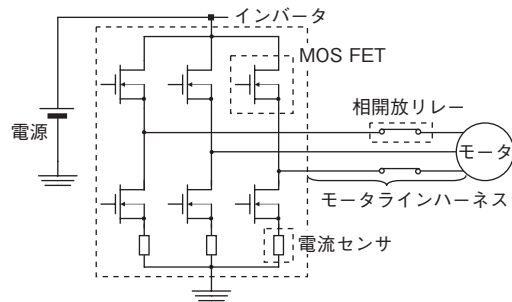


図4 電源からモータまでの回路図  
Circuit diagram from electric power supply to motor

### 5. 1相断線時アシスト制御

#### 5.1 ブラシレスモータ駆動部の 1 相断線故障時の通電方法

1 相断線故障したときにモータトルクを出力させるブラシレスモータの通電方法は、例として U 相に断線故障が発生した場合、ブラシレスモータのロータとステータのエネルギー関係式(2)と U 相断線条件式(3)から、式(4)が導かれる。

$$T \times \left( \omega \times \frac{\pi}{180} \right) = I_u \times V_u + I_v \times V_v + I_w \times V_w \quad \dots(2)$$

$$I_u = 0, I_v + I_w = 0 \quad \dots(3)$$

$T$  : モータトルク [N・m]

$\omega$  : モータ角速度 [deg/s]

$V_u$  : U 相電圧 [V]

$V_v$  : V 相電圧 [V]

$V_w$  : W 相電圧 [V]

$$I_u = 0, I_v = \frac{I_q}{\sqrt{2} \times \cos \theta_e}, I_w = \frac{-I_q}{\sqrt{2} \times \cos \theta_e} \quad \dots(4)$$

故障が発生した場合も、式(4)に従い V 相と W 相に電流を流せば(図5)、故障発生前とほぼ同様のモータトルクを得ることができる(図6)。ただし、電気角 90 度と 270 度において無限大の電流が必要とされる。

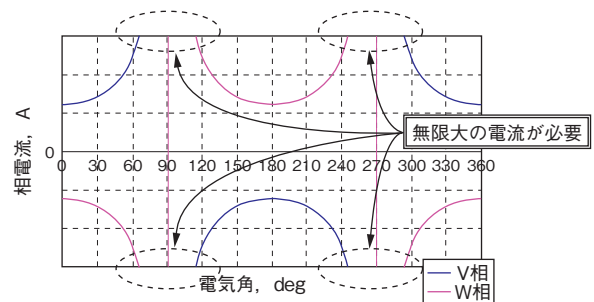


図5 ブラシレスモータの各相通電方法 (U相故障時)  
Conductivity method for each phase of brushless motor (when U-phase fails)

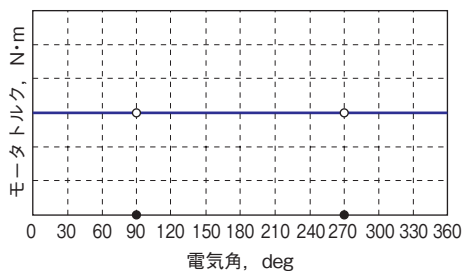


図6 U相故障時のモータトルク  
Motor torque when U-phase fails

### 5.2 1 相断線故障時の通電方法の課題

現実には、モータに定格電流値が存在し、各相のモータ電流を制限する必要があり、モータへ無限大の電流を流すことはできない。すなわち各相のモータ電流に制限がかかることになり、結果、モータ出力トルクが制限され、アシストトルクが不足する領域が発生する(図7)。操舵を行うには、図7のようにある電気角領域(電気角90度前後、270度前後)では操舵トルクを大きく補う必要(アシスト不足領域)があり、結果的に操舵トルクが急激に変化し、ひっかかりを感じるという課題がある。

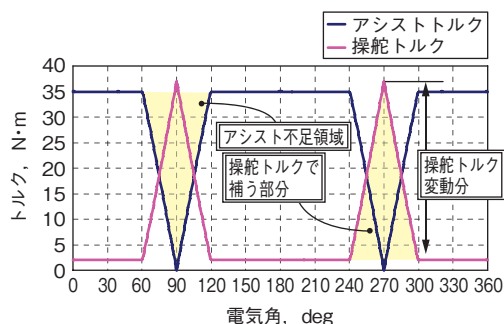


図7 電流制限した場合のアシストトルクと操舵トルク  
Assist torque and steering torque when current is restricted

## 6. 1 相断線故障時の通電方法の対策

上記課題に対して、各相の電流指令値を演算する際に、電気角の位相を $\alpha$ 度調整(式(5))(図8)することにより対策した。

$$I_u = 0, I_v = \frac{I_q}{\sqrt{2} \times \cos(\theta_e + \alpha)}$$

$$I_w = \frac{-I_q}{\sqrt{2} \times \cos(\theta_e + \alpha)} \quad \dots(5)$$

$\alpha$  [deg]: 電気角位相調整量

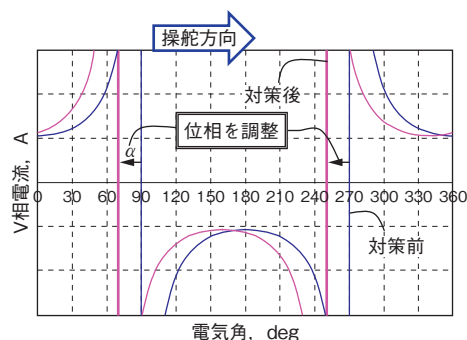


図8 対策前後のモータ通電方法

Motor conductivity method before and after measures are taken

上記の方法に従い通電した結果、対策前のモータトルクと比較して対策後のモータトルクにおいて、アシストが大きい領域(A領域)と操舵方向と逆のトルクを発生する領域(B領域)が発生する(図9)。A領域では、モータ回転運動にエネルギーを蓄えることができ、モータ回転速度を増加させることができる。B領域では、モータ回転に勢いがなく、アシストゼロ点を飛び越えることができなくても、操舵方向と逆にモータを回転させ、再びA領域に戻ることができる。以上より、A領域でエネルギーを蓄えモータ回転速度に勢いをつけ、勢いが不足すればB領域により、再びA領域に戻され、再度モータ回転速度をさらに勢いをつけることができる。これらを繰り返すことにより、アシストゼロ点を飛び越えることができ、運転者のひっかかり感を低減できる。

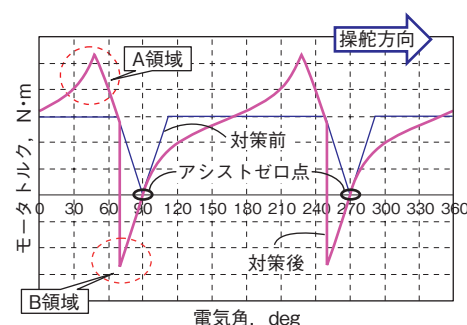


図9 対策前後のモータトルク

Motor torque before and after measures are taken

## 7. 実機検証結果

図10中の電気角990度、1170度、1350度がアシストゼロ点に相当する。ある方向(図10の左から右)へ操舵すると、あるモータ回転速度以上になるまでアシストゼロ点でモータ回転した後に操舵方向にモータ角が進むことが分かる。

図11より、従来のEPSでのアシスト停止時と比較して操舵トルクが小さくなっており、運転者の負担が軽減できていることが分かる。また図12にあるように、操舵時に発生する振動により、運転者は故障発生の方が得られ、異常を感知する効果が期待できる。

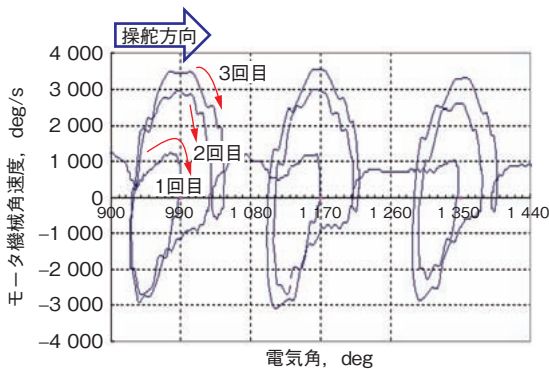


図10 アシスト継続時のモータ回転 (U相故障時)  
Motor rotation when assist continues  
(when U-phase fails)

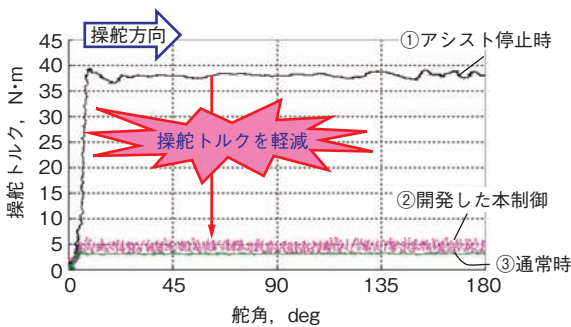


図11 検証結果  
Results of effect verification

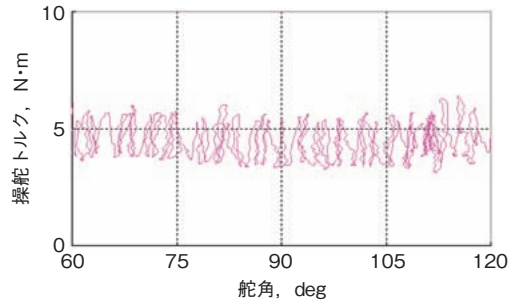


図12 アシスト継続時の操舵トルク (図11の拡大)  
Steering torque when assist continues  
(enlarged view of Fig. 11)

## 8. おわりに

本報では、ブラシレスモータ EPS において、ブラシレスモータの3相のうち1相に電力供給できなくなった場合にもアシストを継続できる EPS アシスト制御について述べた。今後、EPS の搭載が大型車へ普及していく事が考えられる。そこで故障時においてもできるだけ運転者負担を軽減するという観点から、今後も EPS システム全体で故障時にアシストを継続させる技術の開発が期待されている。

## 筆者



野澤哲也\*  
T. NOZAWA



新谷泰規\*  
Y. SHINTANI



玉泉晴天\*  
T. TAMAIZUMI



日比淑江\*  
T. HIBI



板本英則\*  
H. ITAMOTO

\* ステアリング事業本部 システム開発部