

電動パワーステアリング用補助電源システムの開発

Development of Auxiliary Power Supply System for Electric Power Steering

佐藤文彦 F. SATO 東 真康 M. HIGASHI 杉山豊樹 T. SUGIYAMA

When employing an electric power steering (EPS) system on a large vehicle, issues include an increase in the electric power load of the vehicle during stationary steering (steering while parked), and lowering of assist torque responsiveness due to lack of electric power.

An auxiliary electric power supply system for EPS is being developed to solve these issues.

The purpose of this system is to achieve a high power output EPS system which compensates momentarily required electric power with an auxiliary power supply.

This report describes an outline of the higher power output system and vehicle test results of the auxiliary electric power supply system, as well as application development to lower the vehicle power supply load and ensure safety within the redundant power supply system.

Key Words: electronics and control, electric power steering, auxiliary power supply system, high power output

1. はじめに

近年、環境への配慮から自動車の電動化が進んでおり、電動パワーステアリング（EPS）においても小型車から大型車（SUV、ワンボックスカーなど）へ搭載ニーズが拡大している。しかしながら、大型車にEPSを搭載する場合には車両重量増加によりステアリング軸力が大きくなることから、すえ切り操舵（停車時の操舵）時の車両電源の負荷増大や、急操舵時のアシストトルクの追従性低下を考慮する必要がある。また、仮にEPSの入力電力が瞬断された場合は、大型車では大きな操舵力変化が突然発生するため、操縦性の低下による走行時の安全性確保も課題の一つになると考えられる。

以上のことから、以下の三つの機能を実現するEPS用補助電源システムの開発に取り組んでいる。

- 1) EPS 高出力化……………急操舵時のアシストトルクの追従性確保
- 2) 電力ピークカット……………すえ切り操舵時の車両電源負荷の平準化
- 3) 電源バックアップ……………電源二重化によるEPS機能維持

本報では、まず補助電源システムによるEPS高出力化の開発内容と評価結果について述べる。また最後に、

その技術の応用展開として電力ピークカット、電源バックアップ機能の概要を述べる。

2. 大型車へのEPS搭載の課題

2.1 車両電源の負荷増加

EPSのシステム構成を図1に示す。電子制御ユニット（ECU）は、操舵トルクやモータ角度を検出するセンサの検出値に基づいてモータを制御し、運転者の操舵負担を軽減するため、操舵に応じたアシストトルクを出力する。また、EPSに必要な電力は、他の車載電装品と同様に車両電源（オルタネータ、バッテリー）から供給されている。

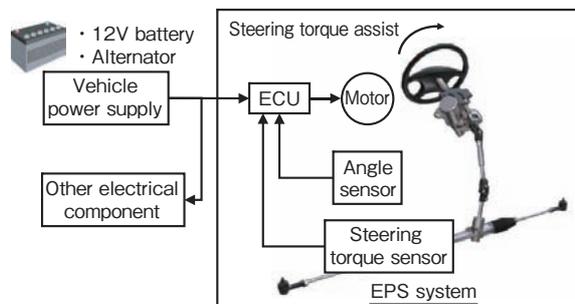


図1 EPSシステムブロック図
EPS system block diagram

これら車載電装品の最大消費電力を測定した結果を図2に示す。これより、電装品の中において、EPSの最大消費電力は、直進走行時に最小であるが、すえ切り操舵時は最大となっていることが分かる。このすえ切り操舵時の電力は、車両重量の重い大型車になる程、大きなアシストトルクが必要となるため、一時的に増加する。これは車両電源の負荷増加の要因となり、大型車へEPSを搭載する際に対策すべき課題の一つとなっている。

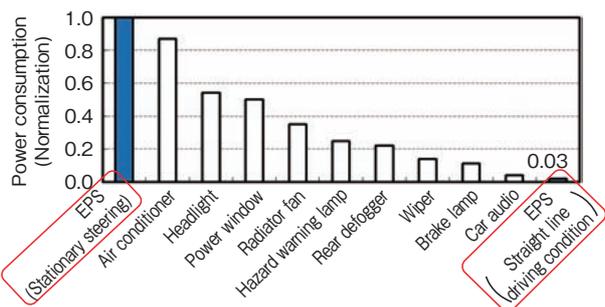


図2 最大消費電力の比較^{1), 3)}

Comparison of maximum electric power consumption^{1), 3)}

2.2 アシストトルクの追従性低下

アシストトルクの追従性の確認を目的に実車試験を行った。この試験では、すえ切り操舵にて、ステアリングホイール (SW) を左右に切り返しながら徐々に操舵速度を増加させた時の操舵速度と操舵トルクを測定した。この試験結果を図3に示す。この結果から、操舵速度が増加するにつれて、操舵トルクの最大振幅の絶対値 (たとえば①, ②, ③) も増加することが分かる。その結果を図4に示す。運転者の操舵速度がある値を超えた場合、SWが重くなり、軽快な操舵が困難となることが分かる。これは運転者の速い操舵に対して、アシストトルクの追従性が低下したことが原因である。以上のような現象は大型車において発生する可能性が高く、運転者の操舵負担を低減するためにも、アシストトルクの追従性を考慮した設計が不可欠となる。

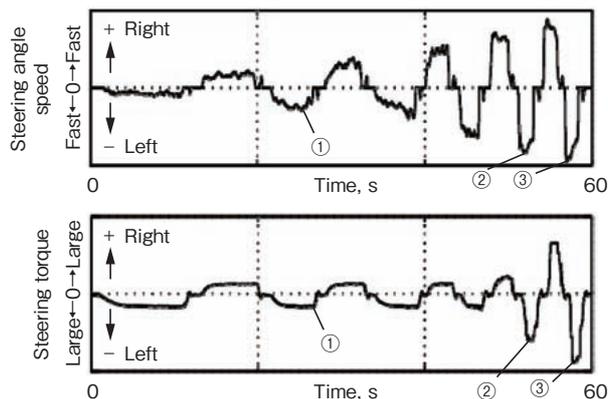


図3 操舵速度と操舵トルクの時系列グラフ³⁾

Steering angle speed and steering torque transition³⁾

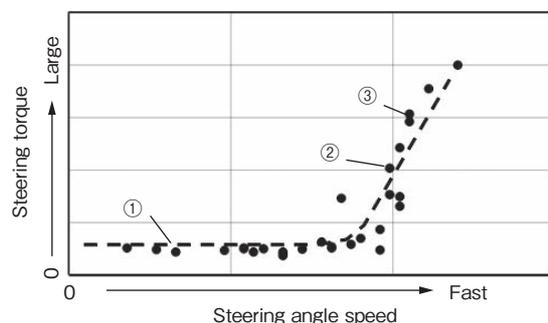


図4 操舵速度と操舵トルクの最大値プロット³⁾

Peak value plot of steering torque against steering angle speed³⁾

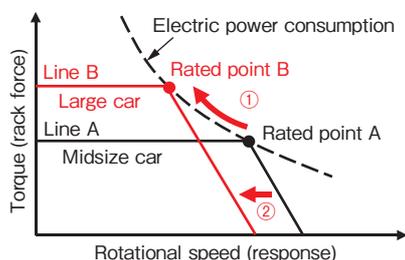
3. 補助電源システム

3.1 高出力化の原理

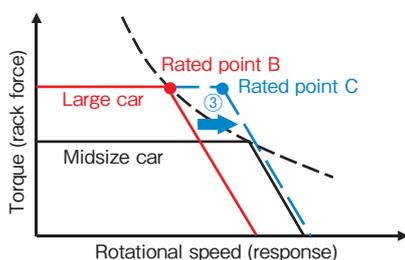
アシストトルクの追従性低下により、操舵トルクが増大する現象をEPSモータの回転速度とトルクの特徴図 (N-T 特性図) を用いて説明する。図5(a)で、中型車向けEPSモータのN-T特性図 (実線A) と車両電源から供給可能な最大電力 (破線) が交わる点 (定格点A) が定格トルクでの最大回転速度となる。ここで大型車に対応するために、定格トルクを増大 (実線B) させると、定格点がAからBに変化 (矢印①) する。その結果、定格トルクでの最大回転速度が低下 (矢印②) するため、大型車では中型車に比べ、アシストトルクの追従性が低下し、操舵トルクが増大することになる。

一般的に、モータ回転速度は誘起電圧に依存しており、アシストトルクの追従性を向上させるためには、モータの印加電圧を増加させる方法 (高電圧化) が考えられる。ここで、印加電圧を増加させた場合の特性図を図5(b)に示す。電圧を増加させると、定格点がBからCに変化 (矢印③) し、定格トルクを維持したまま回転速度を

増加させることができる。これにより、速い操舵領域におけるアシストトルクの追従性低下を対策することが可能となる。



(a) 基本特性³⁾
(a) Basic characteristics³⁾



(b) 電圧加算時の特性³⁾
(b) Characteristics with addition of electric voltage³⁾

図5 EPS アシストモータの N-T 特性
N-T characteristics of EPS assist motor

3.2 システム構成

高電圧化の方法としては、まず車両電源自体を高電圧化する方法が考えられる。しかしながら筆者らは、車両電源を変更することなく、現状の 12V 車両電源で高出力（高電圧）化が可能な EPS のニーズもあると考えており、EPS 専用の補助電源を別途搭載することにした。そのシステムブロック図を図6に示す。このシステムは、補助電源とその充放電を行う ECU を車両電源と EPS 間の電源ラインに配置する構成としている。

充放電 ECU は、EPS や車両電源の状態を監視しており、EPS の電力が不足状態になると放電回路を動作させ、補助電源の電力を EPS の入力電力に瞬時に加算する。一方、補助電源の電力不足が発生しないように、補助電源電圧が低下すると充電回路を動作させ、車両電源から充電を行う。これにより、前述した車両電源の負荷増加とアシストトルクの追従性低下の二つの問題が解決する。

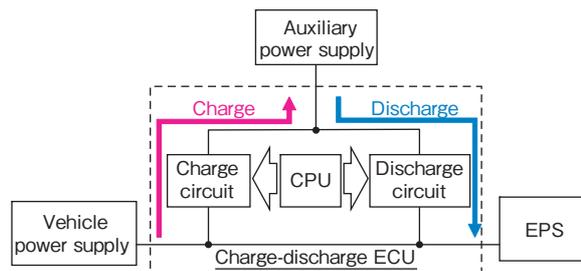


図6 EPS 用補助電源システムブロック図³⁾
Block diagram of auxiliary power supply system for EPS³⁾

3.3 補助電源の選定

すえ切り操舵は、主に駐車や車庫入れの場面で行われる。その際の操舵速度は速く、連続して操舵される傾向がある。このような場合でも、継続して操舵力アシストを行うためには、急速充電が可能な蓄電デバイスを補助電源に用いる必要がある。そこで、車両搭載で実績のある鉛バッテリー、リチウムイオンバッテリーおよびキャパシタの3種類の蓄電デバイスを比較検討した。その結果を表1に示す。表1より、出力密度が高く、急速充電が可能で、かつ充電サイクル寿命が長いキャパシタを採用することにした。

表1 蓄電デバイスの比較¹⁾
Comparison of electric power storage devices¹⁾

	Capacitor	Lead battery	Li-ion battery
Energy density, Wh/kg	4~5	25~35	40~70
Output density, W/kg (25℃)	1 800~2 000	300~400	1 500~2 000
(-15℃)	900~1 100	200~300	300~500
Cycle life, cycles	100 000 <	500 <	1 000 <

3.4 充放電制御方法

前述したように、すえ切り操舵は連続して実施され、ある一定の操舵速度で操舵した場合、すえ切り操舵力是一般的に SW 操舵角の増加に応じて大きくなり、EPS に必要な電力は増加する。そこで、図7に示すように EPS の消費電力を常に監視し、そこに電力しきい値を設けた。EPS の消費電力が電力しきい値を超える場合には、キャパシタから電力を供給し、電力しきい値以下の場合には、車両電源からキャパシタへの充電を行う。つまり、1回の操舵において、その都度、充放電を行う制御を実施した。その結果、エネルギー密度の小さいキャパシタでも、操舵力アシストの効果を連続操舵におい

て持続させることが可能となった。その結果を図8に示す。充電制御なしの場合は、すえ切り操舵を繰り返すごとに、キャパシタ電圧が急低下している。これに対し、充電制御を行った場合は、20回の連続すえ切り操舵においても、キャパシタ電圧は維持されており、キャパシタの電力不足は発生していないことが分かる。

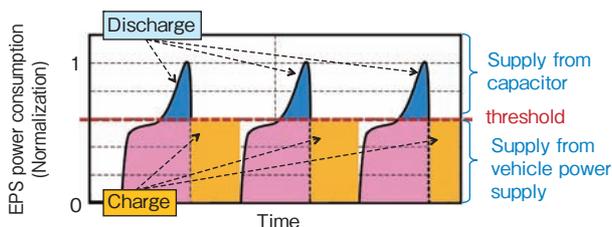


図7 消費電力グラフ (充放電制御)¹⁾
Transition of electric power consumption (Charge-discharge control)¹⁾

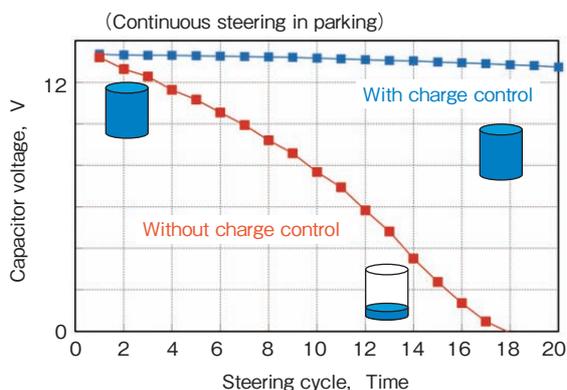


図8 充電制御によるキャパシタ電圧変化¹⁾
Capacitor voltage transition with/without charge control¹⁾

3.5 放電制御の課題と対策

放電制御方法は、前述のEPSの消費電力が電力しきい値を超えた場合に、キャパシタの電圧をEPSの入力電圧に加算し、瞬時に高電圧化することになるが、操舵中に電圧を急激に変化させることによる操舵感への影響が心配される。そこで、操舵トルクへの影響を確認するため、実車に開発システムを搭載し、すえ切り操舵中のEPSの入力電圧と操舵トルクの測定を行った。その測定結果を図9に示す。

この図に示すように、EPSの入力電圧の急激な電圧上昇により、操舵トルクに変動が発生することが確認できた。また、このトルク変動は運転者が実際に操舵した際に違和感として感じられた。そこで、対策として、図10に示すように操舵速度に応じてEPS電力を予測し、放電電圧を滑らかに変化させる制御方法を検討した。

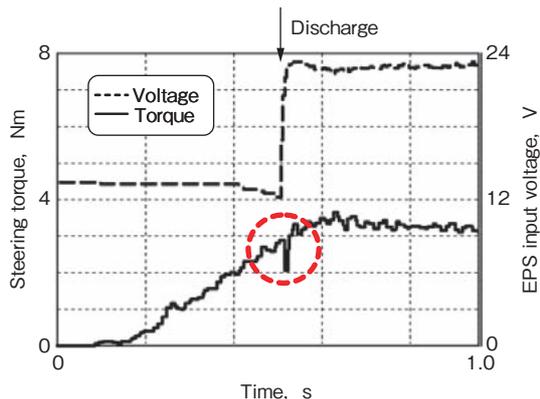


図9 制御切替時の操舵トルク変動 (対策前)³⁾
Steering torque fluctuation at change of control (before countermeasure)³⁾

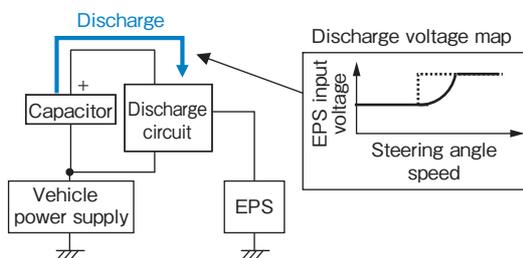


図10 放電制御における課題対策案³⁾
Proposed countermeasure for discharge control³⁾

4. 実車評価試験

4.1 トルク変動対策の効果確認

前節で述べたトルク変動対策を考慮した放電制御を実車に導入し、測定した結果を図11に示す。この図は、図9に示した実車測定結果と同様の試験条件で測定したEPSの入力電力と、操舵トルクの時系列データであるが、図9で見られた操舵トルクの変動が抑制できていることを確認できた。また、実際に操舵した際にも運転者に違和感を与えることなく、スムーズな操舵が可能となった。

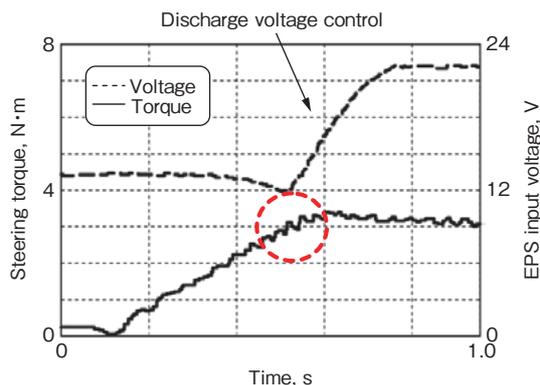


図11 制御切換時の操舵トルク変動 (対策後)³⁾
Steering torque fluctuation at change of control (after countermeasure)³⁾

4.2 高出力化の効果確認

高出力化の効果を確認するため、前述の図4と同様にアシストトルクの追従性の評価試験を実施した。また、すえ切り操舵時の追従性を2倍に向上させることを目標に、キャパシタを複数個直列に接続した。ここで、試験結果を図12に示す。このグラフは操舵速度を変化させた際の最大操舵トルクをプロットしたものである。この結果より、放電制御がある場合は、ない場合と比較して、より速い操舵速度まで操舵トルクの増加が生じていないことが分かる。このように、キャパシタからの電力補助により、約2倍の追従性向上が確認できた。

次に、開発システムの応用展開例として、電力ピークカットと電源バックアップ機能について紹介する。

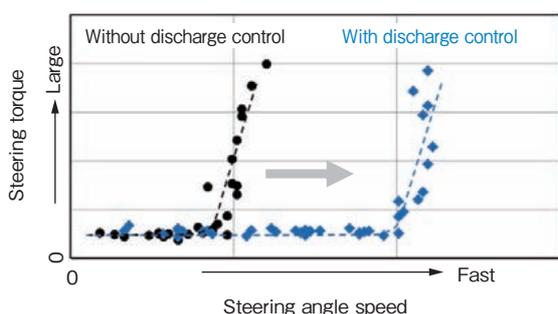


図12 操舵速度と操舵トルクの測定結果³⁾
Measurement results of steering angle speed against steering torque³⁾

5. 応用展開

5.1 電力ピークカット

すえ切り操舵時に車両電源からの持ち出し電力が一時的に増大するが、これに対して、電力ピークカットは、キャパシタから電力を供給することで、車両電源の負担が軽減されることを目的としている。ここで、図13に実車ででの評価結果を示す。この評価結果は、高出力化の実車評価試験同様、キャパシタを複数個直列に接続し、すえ切り操舵時のピーク電力を50%に低減することを目標に試験を実施した結果である。この図は横軸に時間、縦軸に車両電源からの供給電力(実線)と操舵速度(破線)を示しており、キャパシタからの電力補助がある場合の電力(開発システム)は、電力補助がない場合の電力(従来システム)と比較して、車両電源からの供給電力が平準化され、最大電力に対し約50%の電力ピークカットが実現できていることを確認した。

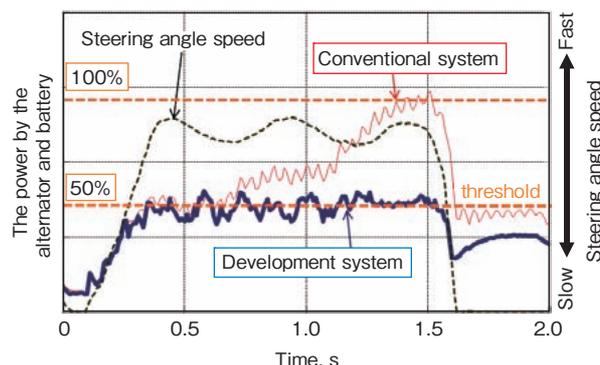


図13 消費電力の測定結果¹⁾
Measurement results of power consumption¹⁾

5.2 電源バックアップ

次に、電源バックアップ機能は車両電源系の異常時にEPSへの供給電力が瞬断された場合などに操舵トルク変動を発生させることなく、スムーズに補助電源へ切り替え、一時的にEPS機能を維持することを目的としている。試験方法は、旋回保舵中に、EPSの入力電力を意図的に遮断させ、その機能評価を実施した。試験結果を図14に示す。

この図より、左図に示す従来システムでは、車両電源からの電力を遮断(図中①)させた場合にEPSの機能が動作しなくなり、アシストトルクが失われ、運転者の操舵トルクが増加していることが分かる(図中②)。

これに対して、右図に示す補助電源システムを搭載し

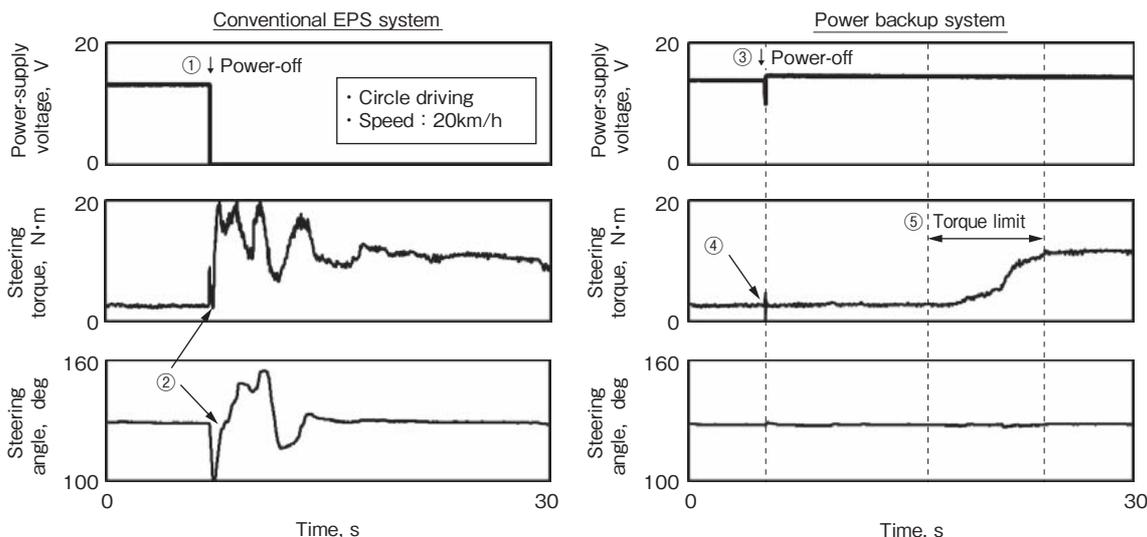


図14 電源遮断試験結果
Power-off test results

た場合においては、電力遮断の瞬間にキャパシタへ電源切換えを行うことで、EPSへの供給電力を遮断せず、EPS機能維持を可能とし、操舵トルクの急激な変動を抑制（図中④）することで、運転者への影響を緩和していることが分かる。

6. おわりに

補助電源としてキャパシタを搭載した充放電 ECU を試作し、高出力化の機能について評価を実施した。その結果、12V 車両電源の持ち出し電力を増やすことなく、一時的にキャパシタから電力供給することで、急操舵時の操舵力アシストの追従性向上を確認した。この結果は、大型車へ EPS を搭載する際に課題となっていた電力不足対策への一つの提案になったと考えている。今後は、大型車領域への EPS 適用範囲拡大を目指し、本開発システムの機能向上を図っていききたいと考えている。

また、補助電源を用いた技術の応用展開として、すえ切り操舵時の最大電力を低減できる電力ピークカットや電源遮断時の操舵トルクの急変を防止できる電源バックアップ機能について紹介した。今後は、これらの機能についても、さらなる検討を進め、本開発システム全体の最適化を図っていききたいと考えている。

参考文献

- 1) 篠田智史, 東 真康, 杉山豊樹「補助電源搭載電動パワーステアリングの開発」『自動車技術会春季学術講演会前刷集』, No. 4-14, 20145065, p.1-3(2014)
- 2) 電気学会・42V 電源化調査専門委員会『自動車電源の42V 化技術』オーム社 p.85-86
- 3) 佐藤文彦, 東 真康, 杉山豊樹「電動パワーステアリング用補助電源システムの開発」『自動車技術会春季学術講演会前刷集』, No. S307, 20155307, p.1625-1628(2015)

筆者



佐藤文彦*
F. SATO



東 真康**
M. HIGASHI



杉山豊樹*
T. SUGIYAMA

* 技術本部 先行開発センター

** 研究開発本部 先進技術創生研究部