

エネルギー回生方式による モータサージ抑制ユニットの開発

中村 政宣

近年、工作機械等の高精度化と高速動作に伴うインバータのスイッチング速度の高速化に加え、電力効率改善のための適用電源電圧の上昇に伴い、インバータ駆動ケーブルと駆動負荷であるモータのインピーダンスの違いから生じるサージのレベルが大きくなり、周辺回路に誤動作を与えたり、モータのコイルの絶縁劣化を発生させて、モータ寿命に影響を与えている。これに対し従来はインバータと駆動線の間にはフィルタを使用し、動力信号波形のサージを鈍らせてサージエネルギーを熱として消費させることで対策としている。しかし、この方式では駆動電力増大に伴い、フィルタ内の部品であるコンデンサやコイルなどに形状が大きい大電力対応品を使う必要があり、設置スペース、価格、サージ抑制に伴う消費電力の増加が問題となっている。

本稿では首都大学東京の清水教授と共同開発した従来フィルタ方式ではなくサージエネルギーをインバータに回生させることで小型、低消費を実現した回生形サージ抑制ユニット（ecoサージμ）についての開発状況について述べる。

サージ対策の必要性

図1にサージ発生状況と従来のサージ対策を示す。

(1) サージ発生要因と大きさ

サージはモータ駆動系の駆動ケーブルとモータ間のインピーダンスの相違による反射が原因で発生する。

駆動ケーブルの特性インピーダンス (Z_c) はシールド有無や導体径で違いがあるが60~100Ω、モータのインピーダンス (Z_m) は1kΩを越えるのが一般的である。このインピーダンス差による反射係数 γ は

$$\gamma = (Z_m - Z_c) / (Z_m + Z_c) \quad ①$$

からほぼ1となる。

すなわち、インバータ波形の高域部分（立ち上がり）で全反射が発生する。

このためAC400Vでインバータ駆動した場合、AC400Vの中間直流電圧最大値680Vの2倍の1360Vがモータ端に加わることになる。

(2) サージによる影響

エナメル線を使用したモータ内のコイルは一般的には

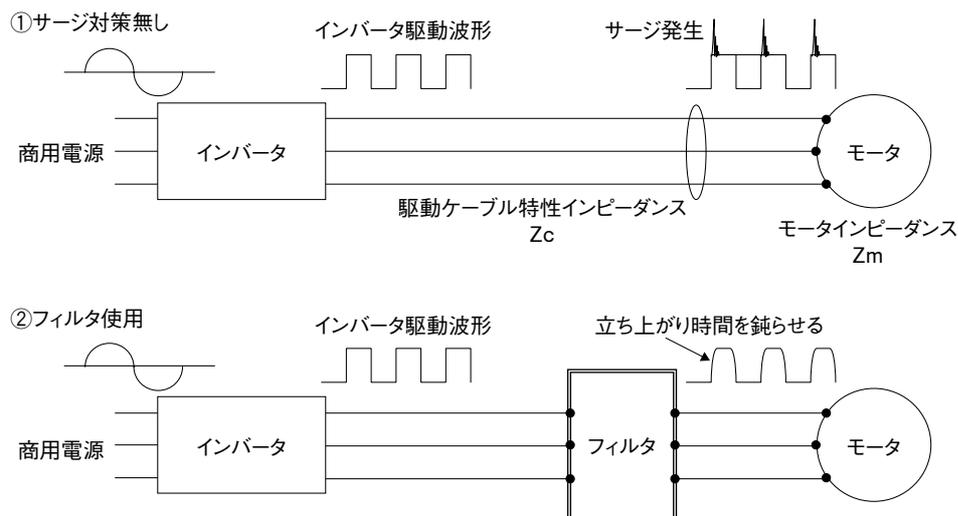


図1 サージ発生状況と従来対策

素線間で1KVを越えるとコロナ放電が発生し、絶縁材料が浸食され絶縁耐力が低下して絶縁破壊を起こす。

このためモータ寿命が大幅に短くなり、ある日突然モータが焼損で止まるという事故を引き起こす。

またこの大きなサージエネルギーは周辺の機器にノイズとして影響を与えシステムの誤動作も引き起こす。

(3) 今後の傾向

現在、自動車市場、FA市場等で消費電力低減のために電源電圧の上昇やインバータの単位時間当たりの電圧上昇 dV/dT を大きくすること、すなわちインバータ出力信号の立ち上がり時間の高速化を検討している。

さらに現状インバータの駆動素子であるIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) に替わる高速SiC (Silicon Carbide) 素子の開発が進んでいる。

このサージレベルはインバータ出力信号の立ち上がり時間と駆動ケーブル長で変化する。図2にインバータ出力信号の立ち上がり時間とケーブル長の関係を示す。

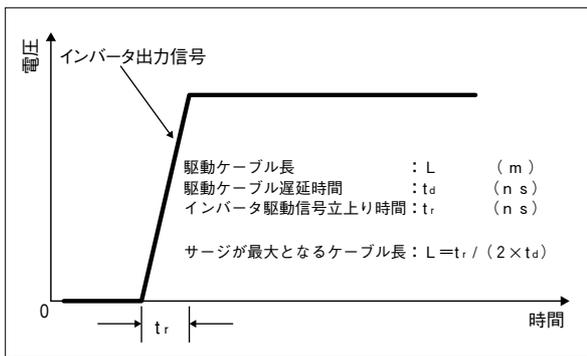


図2 インバータ出力信号とケーブル長

サージレベルが最大となるのはインバータ出力が立ち上がった状態にサージが重畳した条件となるのでインバータ出力信号の立ち上がり時間を t_r 、駆動ケーブルの伝搬遅延時間を t_d とするとサージレベルが最大となる駆動ケーブル長 L は

$$L = t_r / (2 \times t_d) \quad \text{②}$$

となる。

このことからインバータ出力信号の立ち上がり時間が早くなるとケーブル長が短くてもサージ影響が出るのが明確である。現在の汎用インバータの立ち上がり時間が一般的には100ns程度なので②式に当てはめると10m以上でサージレベルが最大になる。また現在高速化で検討されているインバータの立ち上がり時間は50ns以下とされているので5m以下でもサージレベルが最大になる。

このことから今後更にサージ対策の必要性は顕著になってくると考えられる。

従来対策の課題

これに対し、従来はインバータとモータ間にフィルタを挿入しインバータのPWM出力を鈍らせて対策を取っている。このためサージだけでなく駆動信号も鈍らされることから消費電力は大きくなり発熱が大きくなるので大電力部品（R、L、C）や放熱対策が必要になる。これにより、消費電力は勿論であるが、設置スペース、価格の問題が大きな課題となっている。

回生形サージ抑制ユニット (ecoサージ μ) の概要

回生形抑制ユニットの構成を図3（次ページ）に示す。

回生形サージ抑制ユニット（ecoサージ μ ）は回生形ユニット、サージ伝導線、回生出力線から構成される。

従来対策と違い、駆動ケーブルとは別にサージ伝導経路を設けて回生形ユニットを介してインバータ直流端子に接続している。モータ端電圧と直流端子電圧の電位

TIPS【解説】

AC400Vでのサージ最大電圧 V_{smax}

● 直流中間電圧最大値 V_{dmax}
AC400Vの電源仕様範囲はAC360～AC480Vなので
＝電源仕様最大値（480V） $\times \sqrt{2} = 680V$

● 駆動ケーブル／モータ間の反射係数 γ
 $\gamma = (Z_m - Z_c) / (Z_m + Z_c)$ ①
 Z_c ：駆動ケーブルの特性インピーダンス
 Z_m ：モータインピーダンス
で表される。
一般的な値である
 $Z_c = 100\Omega$ 、 $Z_m = 1K\Omega$
を当てはめると①式より γ は概ね1となる。

● 反射電圧（サージ電圧）最大値 V_{smax}
反射電圧は入力電圧に反射波が重畳したものである
反射電圧＝入力電圧（直流中間電圧） $\times (1 + \gamma)$
よってサージ最大電圧 V_{smax} は
 $V_{smax} = \text{直流中間電圧最大値} (V_{dmax}) \times 2$
 $= 680 \times 2 = 1360V$
となる。

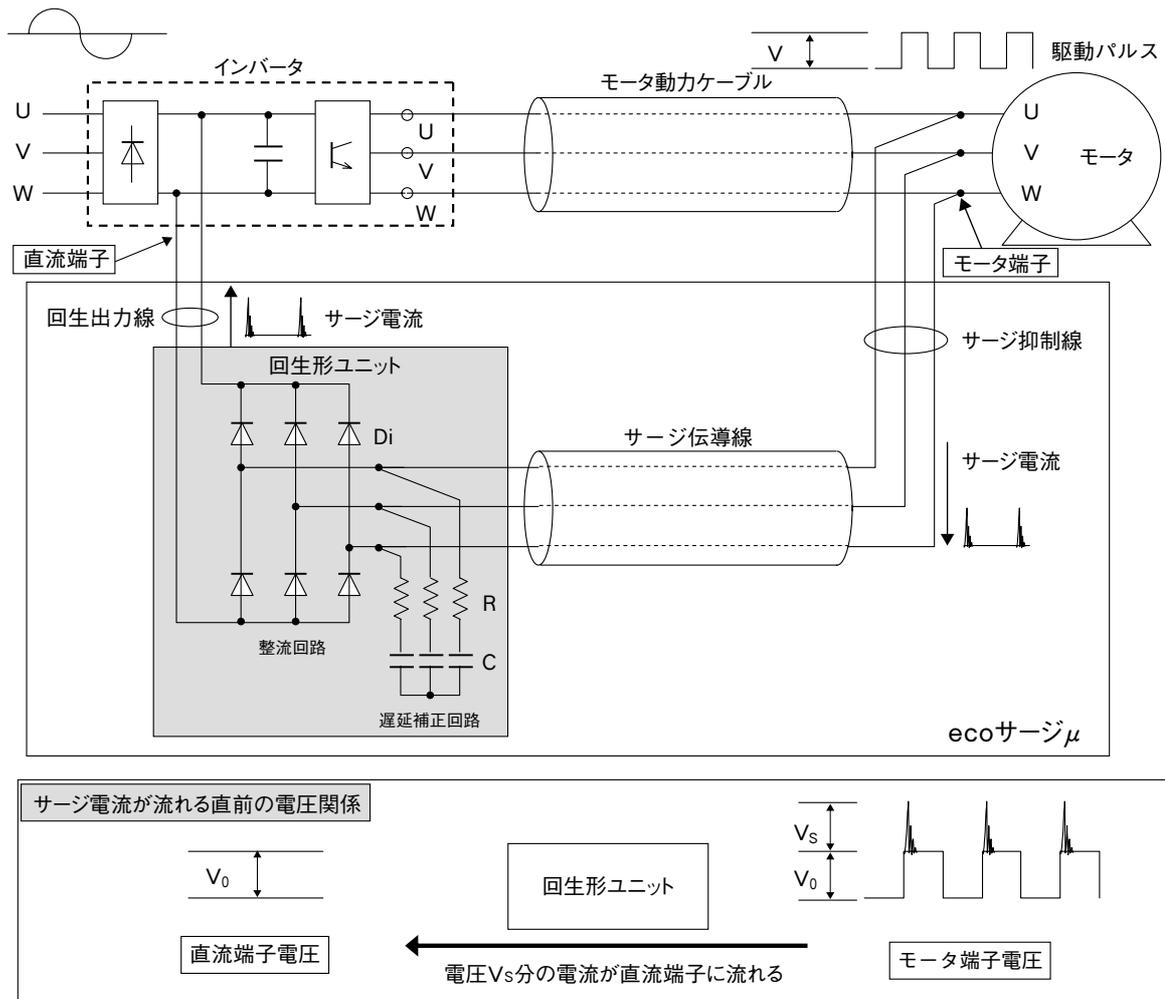


図3 回生形サージ抑制ユニット動作概要

差からサージエネルギーのみをインバータ直流入力端子に高効率に回生することで、サージ抑制に伴う消費電力を最小限にしている。

回生形ユニットの役割

回生形ユニットは3相の整流回路（ダイオードブリッジ）と遅延回路（C,R）から構成される。

整流回路はインバータ直流端子の直流電圧とモータ端を隔離するために使用している。遅延回路はダイオード V_F （順電圧）によるダイオードON時のデッドタイム間にサージ電流が到達してダイオード入力でサージ電流が反射してモータ端に戻らないようにするためサージ電流到達時間をRとCの時定数によりダイオードONまで遅延を掛けている。

消費電力の殆どはこの遅延回路が占めている。

回生形サージ抑制ユニット（ecoサージμ）の性能

(1) サージ抑制性能

ecoサージμはモータ端とインバータ直流端子間電圧からサージ電流を回生させてサージ抑制をするため動力線の長さ、モータ容量、インバータの立ち上がり時間の差異による影響は受けない。50mでのサージ抑制効果を図4に示す。

サージ対策無しでインバータ直流中間電圧680Vに対し最大1300Vのサージが発生している。これに対し回生形サージ抑制ユニットを接続する事で最大770V、サージ抑制率70%以上と大幅にサージ抑制できている。

(2) 消費電力

回生形モジュールの消費電力は約8Wに収まっている。これを従来フィルタの消費電力と比較したグラフを図5に

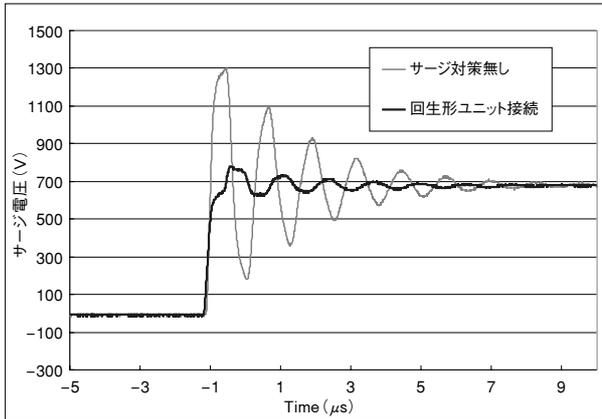


図4 回生形サージ抑制ユニットのサージ抑制効果

評価条件

- ① 入力電圧：AC400V
- ② キャリア周波数：16KHz
- ③ 駆動容量：5KW
- ④ 駆動ケーブル長：50m

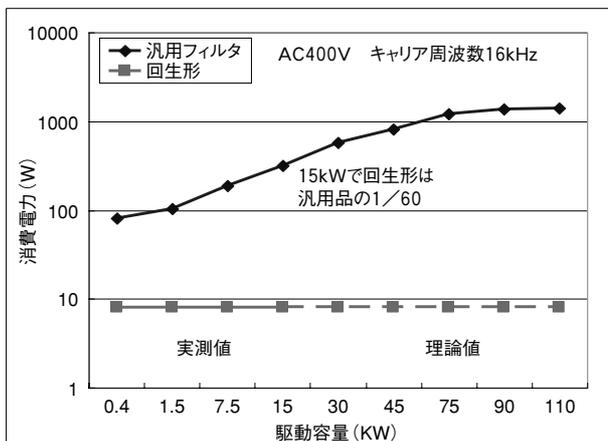


図5 従来フィルタと回生形ユニットの消費電力比較

評価条件

- ① 入力電圧：AC400V
- ② キャリア周波数：16KHz
- ③ 回生形ユニット消費電力は15KWまで実測値
30KW以上は理論値を示す。

示す。グラフから分かるように駆動するモータ容量が大きくなるほど消費電力の差は顕著になる。

FA市場で比較的多数使用されているモータ容量15KWで従来フィルタに比べ回生形サージ抑制ユニットは消費電力が1/60に抑えられている。

(3) 形状、寸法

15KW対応の従来フィルタと回生形ユニット内部の大きさの比較を写真1に示す。

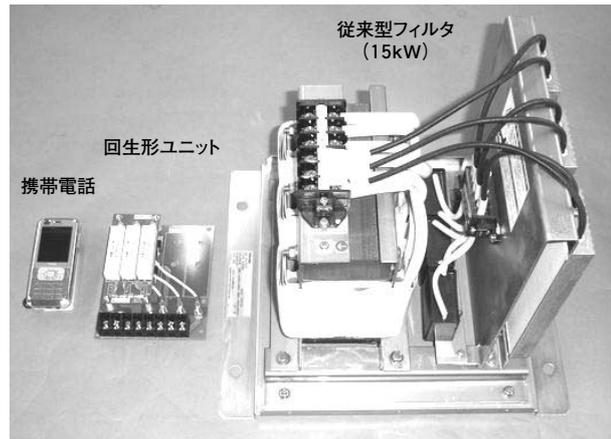


写真1 回生形ユニットと従来フィルタ内部の形状比較

回生形ユニット 125 (W)×100 (D)×135mm (H)
従来フィルタ 290 (W)×310 (D)×310mm (H)

大電力部品を必要とせず、熱発生も小さいことから回生形ユニットは従来フィルタに比べ体積比で1/16の小型化が実現できている。

まとめ

従来フィルタに比べ、サージ抑制に伴う消費電力を大幅に低減することができた。消費電力の大幅な低減は市場のエコ要求の流れに乗って幅広い分野から要求されている。今後は顧客の使い勝手を考えて、インバータメーカーとも協業して本ユニット回路をインバータ内に構築し駆動ケーブル内に伝導線を入れて1本化することで顧客満足度を上げて市場拡大が狙えないか検討していきたい。

参考文献

- 1) 森安, 奥山：PWMインバータのサージ伝搬と電動機電圧, 電気学会論文D, Vol.119,NO.4, pp.508-514, 1999年
- 2) 中村, 田中, 来馬, 藤田：細径伝送線路適用によるモータサージ抑制効果, 電気学会産業応用部門大会, I-82, 2005年
- 3) 斉藤, 清水：分布定数線路を応用したサージ電圧抑制法の解析, 平成20年電気学会全国大会, NO.4-034, p.58, 2008年
- 4) 斉藤, 清水, 中村：モータサージ抑制線の単相解析モデルの検討, 電気学会産業応用部門大会, Y-46, 2008年

● 筆者紹介

中村政宣：Masanobu Nakamura. 沖電線株式会社 電線事業部