

スロット高調波電流を用いた誘導電動機速度推定における フィルタ特性改善と飽和高調波除去

四元 信一郎* 山本 吉朗 逆瀬川 栄一**
(*鹿児島大学大学院 理工学研究科) (**鹿児島工業高専)

1 はじめに

本研究では、誘導電動機の固定子電圧に高周波信号電圧を重畳することで、固定子電流中に強く現れるスロット高調波を用いて速度推定を行っている。スロット高調波の抽出には並列全域通過 (Parallel All-Pass : PAP) 構造によるバンドパスフィルタ (BPF) を利用しているが^[1], BPF の中心周波数に依存してゲイン特性が変化するため、これが抽出に影響する。また、零速度付近では飽和高調波の周波数がスロット高調波の周波数に近く、干渉する。そこで本稿では、これらの問題を解消し、速度推定精度の向上を図ったので報告する。

2 システム構成

図 1 にシステム構成を、表 1 に実験で用いた誘導電動機のパラメータを示す。実験では、半閉スロット、スキューなしの回転子を持つ誘導電動機を利用した。本システムにおけるスロット高調波の検出には、同期座標変換とフィルタを利用する。相電流中に含まれるスロット高調波を抽出した後、スロット高調波をパルス化し、その周波数を計測することで速度推定を行う。スロット高調波の周波数 f_s [Hz] と回転子速度 n [rpm] の関係は (1) 式で表される。

$$f_s = \frac{n}{60} \times (\text{回転子スロット数}) \times 2 \quad (1)$$

表 1 誘導電動機のパラメータ

定格出力	1.5 kW	固定子抵抗	0.646 Ω
極数	4	回転子抵抗	0.355 Ω
定格電圧	180 V	固定子インダクタンス	0.074 H
定格電流	6.7 A	回転子インダクタンス	0.074 H
固定子スロット数	36	相互インダクタンス	0.071 H
回転子スロット数	28	スキュー	なし
固定子巻線	7/9短節巻		

3 PAP構造によるBPFのゲイン特性改善

3.1 PAP構造のBPF

図 2 に PAP 構造をした BPF (図 1 の BPF2 部) のブロック図を示す。これは、(2) 式と (3) 式で表される 2 次のオールパスフィルタ (APF) を、位相特性を変えて並列に接続することで、バンドパスフィルタを形成したものである^[1]。

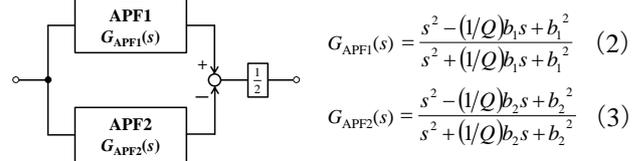


図 2 BPF2 (PAP 構造による BPF)

スロット高調波の周波数は回転速度に応じて変化するため、APF1 ((2) 式), APF2 ((3) 式) における角周波数 b_1, b_2 を速度指令に応じて変化させる必要がある。そこで、速度指令を (1) 式に代入し、得られる周波数 (スロット高調波周波数) が BPF2 の中心周波数となるように b_1, b_2 を決定している。この際、速度指令が変化すると BPF2 のゲイン特性も変化し、通過帯域のゲイン特性が平坦でなくなる。例として、(2) 式と (3) 式でクオリティファクタ $Q=3$ としたときの BPF2 のゲイン特性を図 3 に示す。同図 (a) は指令速度 5 rpm, (b) は速度指令 13 rpm のときである。

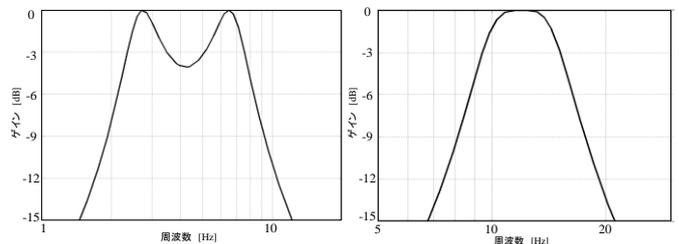


図 3 BPF2 (PAP 構造の BPF) のゲイン特性

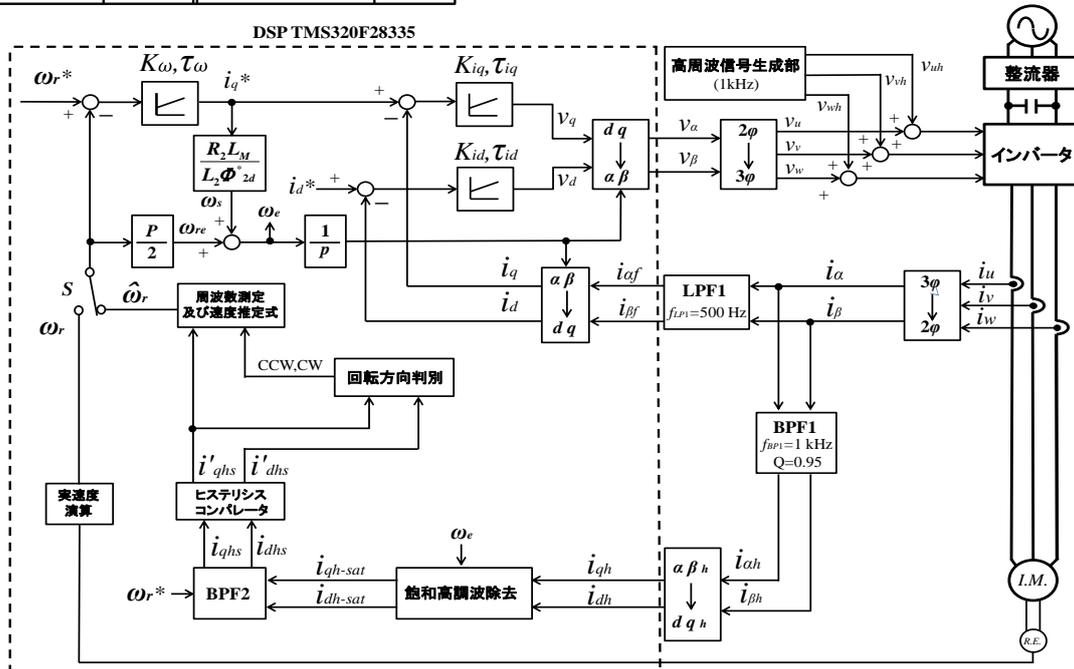


図 1 システム構成

3.2 BPF2(PAP構造)のゲイン特性改善

図3(a)のように通過帯域の中心(スロット高調波周波数)でゲイン特性が平坦でない場合、通過するスロット高調波の振幅は小さくなり、正確なスロット高調波周波数を得ることが難しくなる。そこで、APF1 および APF2 の Q 値を可変にすることで、BPF2 の中心周波数を移動させても通過帯域でゲイン特性が常に平坦となるようにした。

以下、 Q 値の決定法について述べる。説明のために APF1 の Q 値を Q_1 、APF2 の Q 値を Q_2 とする。BPF2 の通過帯域におけるゲイン特性が平坦になるためには、BPF2 の中心周波数(スロット高調波周波数)で、APF1 の位相と APF2 の位相が 180° 異なる必要がある。そのため、BPF2 の中心周波数で APF1 の位相が -270° 、APF2 の位相が -90° となるような Q_1 と Q_2 を、20 rpm、15 rpm、10 rpm、5 rpm、3 rpm の 5 点においてそれぞれ計算した。そしてこれらより、 Q_1 と Q_2 の中央値 (Q_{center}) を線形近似した関数 Q'_{center} を、APF1 と APF2 の Q 値として利用することで、通過帯域で平坦となるゲイン特性を得る。図4に Q_1 、 Q_2 、 Q_{center} のプロットと近似直線 Q'_{center} を示す。

$$Q'_{center} = 0.238 \times (\text{速度指令 [rpm]}) - 0.092 \quad (4)$$

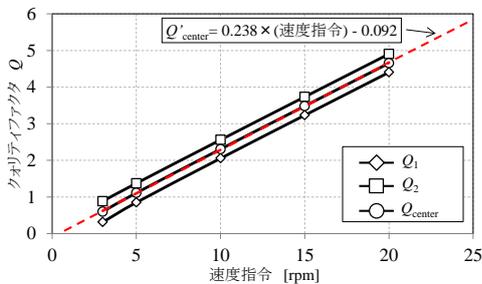


図4 速度指令に対するクオリティファクタ Q

4 飽和高調波の除去

固定子電圧に高周波信号電圧を重畳した場合、固定子電流中の重畳周波数の逆相成分近傍には、 $-2\omega_e$ 、 $4\omega_e$ 、 $-8\omega_e$ の周波数を持つ飽和高調波が現れる^[2]。ここで、 ω_e は磁束ベクトルの角周波数である。回転子速度が零速度に近くなるに伴い、飽和高調波と検出したいスロット高調波の周波数が近くなり、分離が困難となる。そこで、フィルタと回転座標変換のみを利用し、オンラインで飽和高調波除去が可能な方法を提案する。図5に飽和高調波除去部のブロック図を示す。重畳周波数の逆相成分に同期した電流信号を $-2\omega_e$ に同期した回転座標系に変換することで、飽和高調波は $\pm 6\omega_e$ の周波数成分となり、BEF1 によって除去される。LPF3 と LPF4 は直流分の除去のために用いられる。

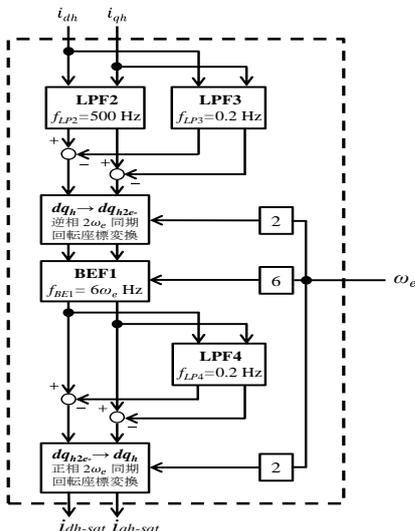


図5 飽和高調波除去部のブロック図

5 加減速運転の実験結果におけるBPF2ゲイン特性改善および飽和高調波除去の効果

図6に APF1、APF2 で $Q=3$ 一定とし、飽和高調波除去を適用しない場合の加減速運転を示す。また、図7には APF1 および APF2 の Q 値を(4)式を利用して可変とし、加えて飽和高調波除去を適用した場合の加減速運転を示す。図6と図7の推定誤差に注目すると、BPF2 のゲイン特性を改善し、飽和高調波を除去した図7の方が推定誤差を小さくすることができ、従来より速度推定精度が向上していることがわかる。

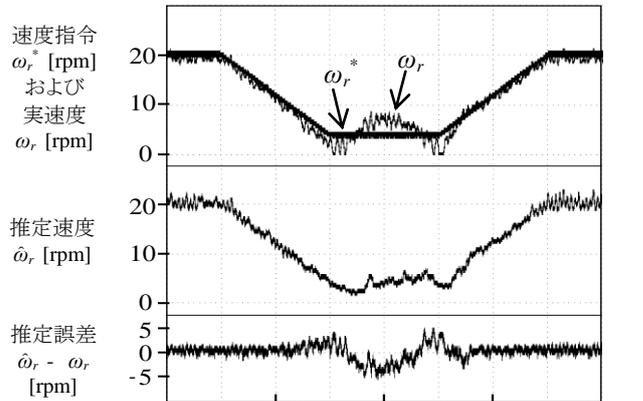


図6 20 rpm~4 rpm の加減速運転 ($Q=3$ 一定、飽和高調波除去アルゴリズムなし)

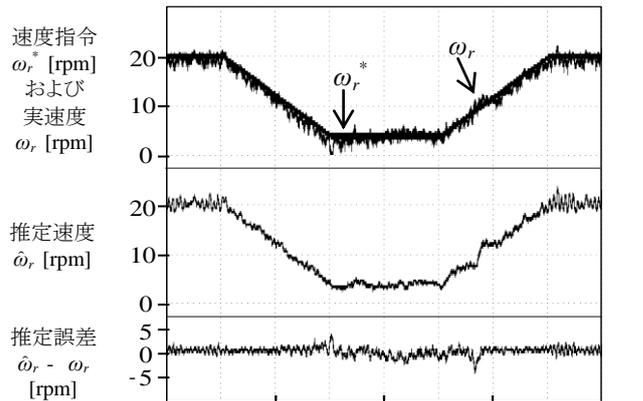


図7 20 rpm~4 rpm の加減速運転 (Q 値を(4)式で近似、飽和高調波除去アルゴリズムあり)

6 まとめ

本稿では BPF2 (PAP 構造の BPF) において、APF1 および APF2 の Q 値を可変にすることで、BPF2 のゲイン特性を通過帯域で平坦となるようにした。また、低速領域でスロット高調波と干渉する飽和高調波を除去した。その2つの方法を併用することにより、低速での速度推定精度が向上したことを 20 rpm~4 rpm の加減速運転の実験結果で示した。

文献

- [1] 山本, 飯盛, 森田:「スロット高調波電流を用いた誘導電動機速度推定におけるデジタルフィルタの検討」, 電気学会半導体電力変換・産業電力電気応用・モータドライブ合同研究会資料, SPC-10-19, IED-10-18, MD-10-23, pp.49-54, 2010
- [2] Nikolas Teske, Greg M.Asher, Mark Sumner, Keith J.Bradley, "Encoderless Position Estimation for Symmetric Cage Induction Machines Under Loaded Conditions," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.37, no.6 pp.1793-1800, 2001