

DEVELOPMENT OF A CURRENT MONITOR USING A NEGATIVE IMPEDANCE CIRCUIT

Tetsuro Kurita*

The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC)
64-52-1, Nagatani, Tsuruga, Fukui, 914-0192

Abstract

We developed a beam current transformer which appropriates for monitoring beam of an accelerator having operating period of a few seconds. The beam monitor is a new type CT which can measure DC component of beam using a negative impedance circuit. In this report, we describe stability of a time constant, temperature and frequency characteristic of the CT.

負性抵抗回路を用いたカレントモニターの開発

1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンのか束モニターとしては、高周波帯域の Current Transformer (CT) と静電誘導型のか束形状モニターが設置されているが、直流帯域をもった束モニターが欠けている。そこで、小形のか束トロンに適した省スペースのか束モニターとして、負性抵抗を用いた新しい方式の CT を開発をおこなっている [1]。

2. 負性抵抗回路を用いた CT の原理

Current Transformer(CT) は電流が発生する磁場をトロイダルコイル (ピックアップコイル) で電圧に変換することによって電流を測定する。一般に、CT にはバンドパスフィルタの特性がある。ピックアップコイルの終端抵抗及びコイル自身の抵抗の和を R_1 とし、ピックアップコイルのインダクタンスを L とすると、低域のカットオフ周波数は、 $\omega = R_1/L$ で表される。

リング内の電流をバンチに依存せず測定するためには、低域カットオフ周波数をキャンセルもしくは小さくすることにより直流成分を測定する必要がある。低い周波数にも感度を持たせる方法として、ピックアップコイルに巻き線を追加し、その巻き線に出力をフィードバックし、等価的に L を大きくすることにより低域カットオフ周波数を下げた HERWARD transformer が使われている [2]。我々の開発した CT は負性抵抗回路を用いて R_1 を完全にキャンセルする方法である [3]。その原理図を図 1 に示す。図 1 におけるオペアンプによる負性抵抗回路の入力インピーダンス Z_{in} は次式で表せる。

$$Z_{in} = -R \frac{R_i}{R_f} \quad (1)$$

このように、インピーダンスが仮想的に負になるので、抵抗値を調整することにより R_1 をキャンセルすることができる。これにより、束電流の直流成分を測定することができるようになる。

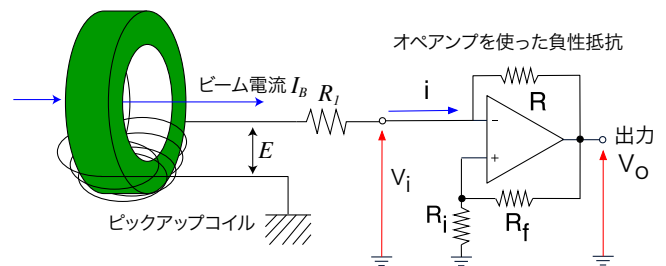


図 1: 負性抵抗回路を用いた直流 CT の原理

3. システムの概要

図 2 にモニターシステムの構成を示す。加速器本体室にて、ピックアップコイルと負性抵抗回路 (Frontend Module) で検出された束電流信号は、制御室まで同軸ケーブルで輸送される。束電流信号は制御室の Control Module で増幅されて、DSP の信号演算モジュールに入力される。信号演算モジュールは、MTT 社の DSP 開発キット sBox を利用して製作した。束電流信号は信号演算モジュール内で加速高周波の周波数信号で割り算され粒子数信号に変換される。

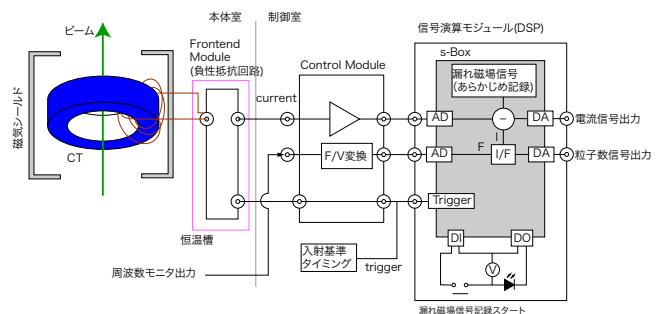
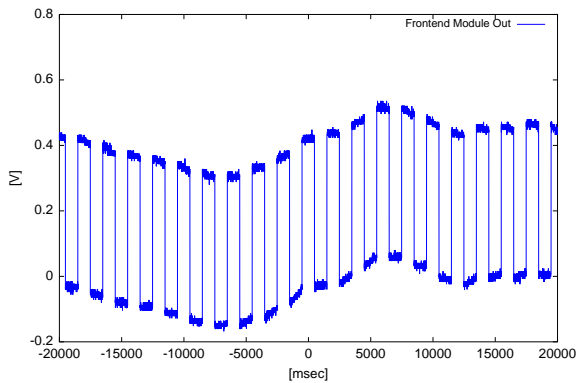


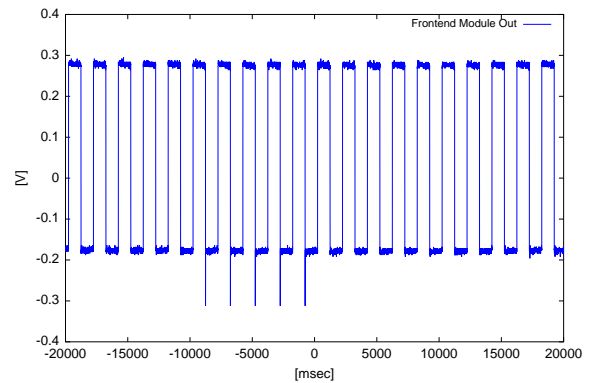
図 2: モニターシステムの構成

検出コイルは鉄板による磁気シールドで覆っており、周辺のパターン運転している Q 電磁石やステアラ電磁石からの磁場の検出を低減している。しかし、完全には遮断できないので、信号演算モジュールでは、漏れ磁場

*tkurita@werc.or.jp



(a) 恒温槽無し



(b) 恒温槽有り

図 3: 恒温槽の導入によるペダスタルの安定化

信号を完全にキャンセルするために、ビームを入射していないときの信号を RAM に記録し、ビーム電流信号から引き算する。

負性抵抗回路が極めて温度変化に対して敏感であり、信号のペダスタルが用意に変動する。ペダスタルの安定化の為に、負性抵抗回路を恒温槽の中に納めて温度管理を行っている。図 3 に恒温槽によるペダスタルの安定化の効果を示す。1 sec 幅のテストパルスを入力している時の frontend module の出力を比較している。図 3(b) では、図 3(a) に見られたペダスタルの変動が無くなっていることがわかる。

4. 温度特性

周囲温度の変化により、コイルの銅線の温度が変化すると抵抗値が変わる。この影響は、矩形波をピックアップコイルに入力した時サグの変化として現れる。ピックアップコイルの温度補償を行う為に、図 4 のようにピックアップコイルと対称の位置に温度補償用リファレンス抵抗を挿入している。このリファレンス抵抗はφ 0.5 mm のエナメル線を用いている。このリファレンス抵抗の長さを微調節して温度特性の改善を図っている。

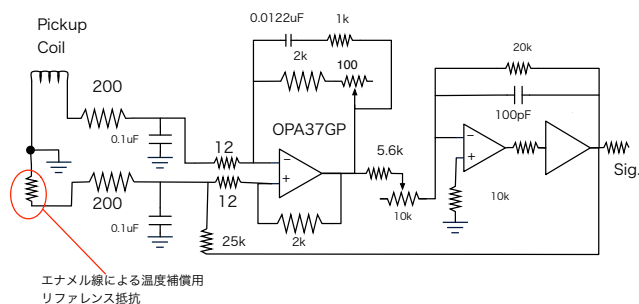


図 4: 負性抵抗回路の詳細

図 5 に周囲温度の変化に対するサグの変化を示す。入力しているテストパルスの幅は 1sec である。現在のところ、リファレンス抵抗 275cm にして、 $-0.25\%/^{\circ}\text{C}$ 程度まで調整ができている。

シンクロトロン稼働時の気温の変化は 4°C 程度であるので、使用中に 1% 程度の変動があることになる。

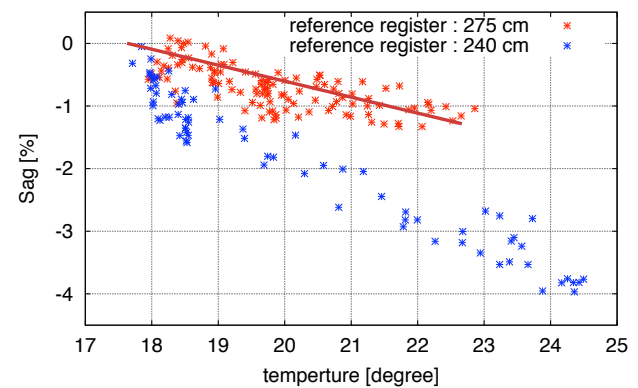


図 5: 温度特性

5. 時定数の安定性

周囲の温度と相関せず、時間とともに時定数がドリフトしていく現象が確認されている。図 6 は、1sec 幅のテストパルスを入力して、長期間 (10 日ほど) サグの変動を監視した物である。およそ 2% 程度の幅でサグが変動している。一つの原因として、コネクタ部の接触抵抗の変動が考えられる。そのため、極力コネクタによる接続を廃しており、当初よりは改善されているが、完全に変動を抑えるには至っていない。

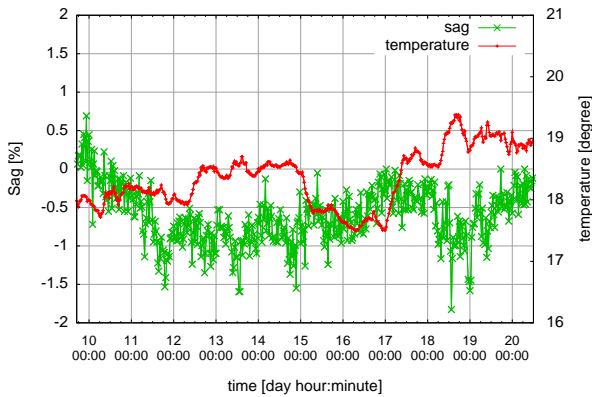


図 6: 時定数のドリフト

6. 周波数特性

図7に周波数特性を測定した物を示す。ピックアップコイルにサイン波を入力し、周波数を変化させ、その時の frontend module の出力の変化をプロットした。-3dB までを周波数帯域として定義すると、～20kHz の帯域がある。

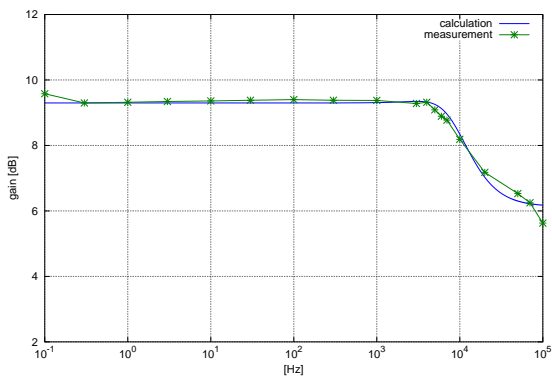


図 7: 周波数特性の測定と計算値

図8に示すモデルで伝達関数を計算すると、次式になる。

$$\frac{V_o}{I_B} = -\frac{1}{N} \frac{s^2 C_1 C_r R_c R R_1 + s [C_r R_c (R_1 + R) + C_1 R_1 R] + R_1 + R}{s^2 C_1 C_r R_1 R + s R_1 \left[\frac{C_r}{R_1} (R + R_c) + \frac{C_1 C_r R_1 R}{L} \right] + \frac{C_r R_1 R}{L} + 1} \quad (2)$$

この式による計算値も図7にプロットしてある。測定値と計算値は良く一致している。

周波数帯域にを決定しているのは、オペアンプに高周波の入力を遮断する為のコンデンサ C_1 および負性抵抗回路に LPF の特性を持たせる為の C_r である。現状でも十分な帯域はあるが、素子のパラメータの調整によってさらに広い帯域を持たせることを検討している。

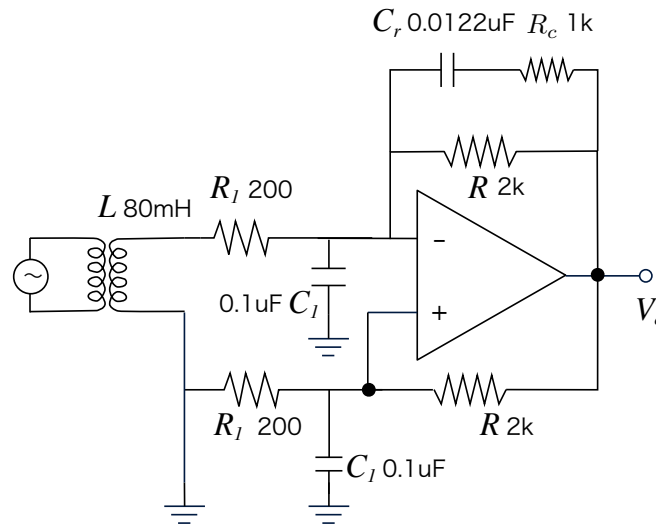


図 8: 周波数特性の計算モデル

7. まとめ

負性抵抗を用いた直流帯域を持つ CT の安定性の改善、温度特性の改善を行った。ペDESTALの安定化には恒温槽による回路の温度管理が非常に有効であった。温度特性は、温度補償用のエナメル線の調整により、パルス幅 1 秒間のサグは～-0.25%/°C まで調整を行った。シンクロトロン運転中の室温の温度変化は 4 °C 程度であるので、1% 程度の変化に抑えられている。

周辺温度とは相関のない、ゆっくりとした時定数のドリフトが観測されているが、サグの変動幅が2%程度であれば、十分に実用であると考えている。

周波数の帯域は、現状で～20kHz である。周回電荷の測定としては十分な帯域であるが、回路としてはさらに広帯域化を測れる余地があり、現在調整中である。

参考文献

- [1] 栗田哲郎 et al., “負性抵抗回路を用いたカレントモニターの開発” 第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング, 2009
- [2] J. Borer and R. Jung, “DIAGNOSTICS”, CERN 8415, pp385-467, 1984
- [3] S. Ninomiya et al., “Dual-mode Beam Current Monitor”, The proceedings of EPAC'06 Proceeding , p1145, 2006