

冷凍機の IoT 遠隔監視・予知保全システムの開発

沼津工業高等専門学校 鈴木 涼太、三谷 祐一郎
株式会社新冷熱技研 馬場 勝人

1. 背景

2015年4月、フロン排出抑制法によってフロン使用機器の定期点検が義務化された。この点検は目視での確認が必要であり、設備の管理コストの増加が問題視された。2021年5月に業務用冷凍空調機器の常時監視によるフロン類の漏えい検知システムガイドライン(JRAGL-17)が制定されたことにより、この目視による点検を、IoTによる常時監視システムによって代替可能となった。このガイドラインに準拠したIoT遠隔監視システムを開発することにより、フロンガス漏洩の早期発見や点検の自動化・省力化に貢献することができる。

2. システムの概要

本システムは、

- ・ IODATA 製 LTE ルーター UD-LT1
- ・ 横河電機製 ペーパーレスレコーダ GP10
- ・ Raspberry Pi 4 Model B

をイーサネットケーブルで接続した構成となっている。GP10は直流のアナログ信号を最大30chまで読み取り可能で、取得した値をRaspberry Pi上のFTPサーバへ定期的に保存する。WireGuardを利用したTaliscaleというサービスにこのRaspberry Piを登録しておくことで、登録済みの他の端末からFTPサーバにアクセスすることができる。

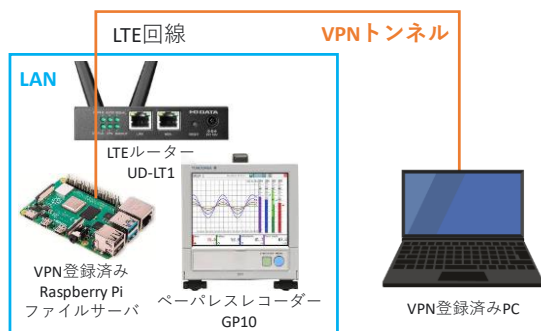


図1 システム構成図

3. 交流電流・電圧測定端末の製作

冷熱機器を熱物理的に観測するためには熱・圧力・電流・電圧の測定が必要となる。また、冷熱機器には圧縮機・送風ファン・送水ポンプ・ヒーター等、交流で動作する部品が多く、個別

に測定することで稼働状況を詳細に読み取ることができる。多系統の測定が必要となる交流電流には安価かつ冷熱機器への侵襲性が低いクランプセンサ(CTセンサ)を使用し、交流電圧にはトランスを用いた降圧モジュールを使用した。熱と圧力については、熱電対および圧力センサの信号が直流であるためGP10で直接読み取ることができる。しかし、交流電流と交流電圧については、センサ信号が交流であるためGP10で直接読み取ることができないという課題があった。このため、交流信号をGP10に適した直流信号へと変換する端末が必要となった。

交流信号の変換は多系統で必要なため、多入力・多出力の変換端末をワンボードマイコンで製作することとした。5Vのワンボードマイコンの電圧に合わせて、GP10の6Vレンジを使用することになる。このときの測定精度は $\pm(0.1\% \text{ of rdg} + 15 \text{ mV})$ となり、6chで0-5Vを10bitで読み取るArduino Unoを用いれば、十分な分解能で変換ができると判断した。変換後の直流電圧信号の出力をArduino Unoで行うと8bitの分解能となるため、8ch 10bitのDACであるLTC1660CNを用いることで、分解能を維持する。

3. 1 測定対象

一般的に交流においては実効値をもってその大きさとする。正弦波交流波形であれば、最大値を $\sqrt{2}$ で除すことで容易に実効値を求めることができる。しかし、冷凍機に流れる交流は、半波整流や負荷などによって非正弦波交流となる場合がある。このような場合でも測定できるように、二乗平均平方根(RMS)によって実効値を求めた。

3. 2 設計仕様

- ・ 実効値を0-5Vの直流電圧信号に変換
- ・ 10Hzを超える周波数で出力
- ・ サンプリングレートは各ch 1kHz
- ・ 最大6chの並列測定

GP10は6Vレンジを使用するため、出力する直流電圧信号は0-5Vとした。GP10のサン

プリングレートは最大 10Hz であるため、これを超える周波数で直流電圧信号を出力する必要があった。RMS の計算には多くのサンプルが必要であるため、各 ch のサンプリングレートは、1kHz を目標とした。Arduino Uno は 6ch のアナログ入力に対応しているため、最大 6ch の並列測定を行えるとした。

3. 3 測定方法

Arduino Uno は、トランスと分圧回路を通して入力された交流信号を各 ch 1kHz(全体では 6kHz)で読み取る。この ADC(Analog to Digital Converter)値を用いて RMS の計算処理を行い、交流の実効値を求める。

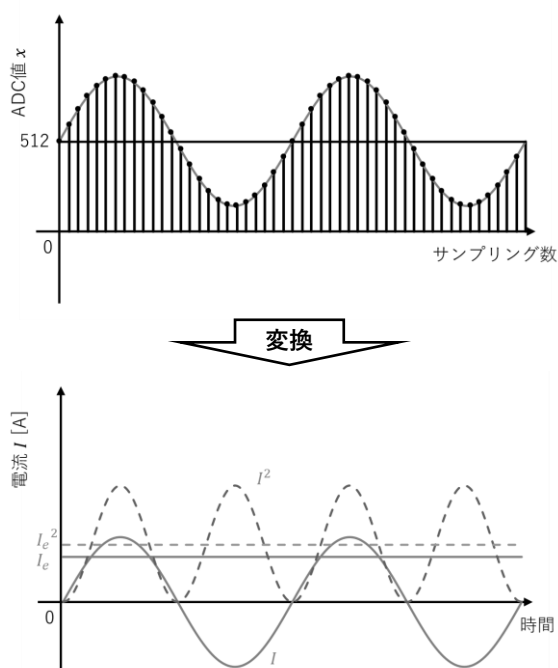


図2 交流信号における実効値の算出

3. 4 ハードウェアの製作

クランプセンサの接続端子や DAC, 分圧回路を備えた拡張ボードを設計・製作した。

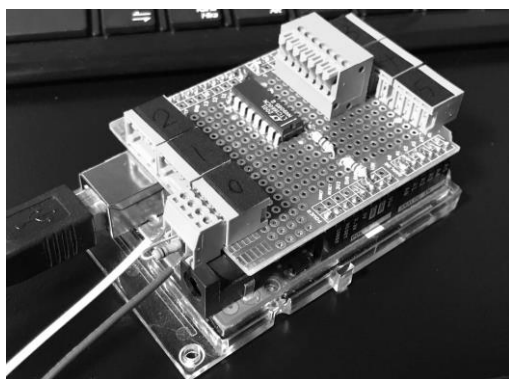


図3 製作した拡張ボードと Arduino Uno

クランプセンサと負荷抵抗を容易に交換できるように、コネクタとして抜き差しができる端子台を採用した。また、この拡張ボード自体も Arduino Uno に対して抜き差しが可能であるため、Arduino Uno や拡張ボードが破損したとしても、交換が容易となっている。

3. 5 計算処理の高速化

ADC 値から本来の測定値を算出し、その値を用いて RMS の計算処理を行う計算を式(1)～式(3)に示す。なお、式中のパラメータは表 1 に示す。

本来の測定値に直してから RMS の計算処理を行うと、繰返し処理内で浮動小数点数型の計算が行われることになり、処理時間が増大して仕様を満たせなくなった。

$$V = \frac{5(x - 512)}{1024} \quad (1)$$

$$I = \frac{nV}{R} \quad (2)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k I_i^2} \quad (3)$$

表1 式中の各パラメータ

x	ADC値	整数型
V	信号電圧 [V]	浮動小数点数型
I	電流 [A]	浮動小数点数型
I_e	実効電流 [A]	浮動小数点数型
n	CTセンサ コイル巻き数	定数
R	CTセンサ 負荷抵抗 [Ω]	定数
k	サンプリング数	定数

そこで、測定値である電流・電圧は ADC 値に比例することから、式(4)に示すように ADC 値の RMS を求めるように式を変形し、出力直前に ADC 値の RMS から測定値の RMS へと変換することとした。これにより、繰返し処理内の計算が整数型のみとなり、処理時間を 40% 削減できた。

$$I_e = \frac{5}{1024} \cdot \frac{n}{R} \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - 512)^2} \quad (4)$$

3. 6 タイマー割込みによる周期処理

各 ch 1kHz(全体では 6kHz)のサンプリング

レートとするためには、1ms 毎に 6ch の ADC 値の読み取りを行うことになる。変換や出力のための処理も必要となるが、1ms の間にこれら全ての処理は収まらない。1ms 毎に必ず実行する処理と、余った時間に実行する処理を分け、1ms のタイマー割込みによる周期処理を行うことで 1kHz のサンプリングレートを確保した。

1ms 毎に必ず実行する処理は、6ch の ADC 値の読み取りと、各 ch の最新 100 サンプルによる二乗和の計算である。余った時間に実行する処理は、二乗和から平均及び平方根を求めることで ADC 値の RMS を算出し、それを測定値へと変換する計算処理、10bit の DAC である LTC1660CN に出力する直流電圧を指定する 16 桁のビット列を送る I2C 通信処理(前後 2 分割)、ADC 値の RMS をシリアル送信するデバッグ用のシリアル処理である。Arduino Uno の分周比をデフォルトの 128 から 64 へと変更することで、1 周期毎の余った時間は 300us ほどになり、余った時間に行う処理は、問題なく収まった。なお、分割して行う処理は図 4 に示すように、0ch から 5ch までを順番に巡り、5ch の処理が終われば 0ch へと戻ってくる。このような流れにより、疑似的な並列処理のように、6ch の同時測定を行っている。



図 4 周期処理

0ch から 5ch までの 6ch 分の処理は 24ms で完了するため、1ms のディレイを設け、25ms ごとに測定結果の出力が行われるようにした。この 40Hz での直流電圧信号出力は、GP10 のサンプリングレートである 10Hz を大きく超えることができた。

4. 今後の展望

本システムは、株式会社 新冷熱技研の社内ネットワークに接続していた GP10 による熱・圧力の遠隔監視システムを基にし、機能を追加することで実現した。GP10 は非常に多機能であるため、ハード・ソフト面を新たに組む必要がなく、迅速にシステムを構築することができた。しかし、GP10 は本体価格が 50 万円ほどする高価な装置であるため、機能の一部しか使用していない状態ではコストが過剰に掛かってしまう。機能を必要なものに絞り、シングルボードコンピュータでの代替や、Raspberry Pi への統合を行うことで、より安価にこのシステムを実現したい。

参考文献

- 1) 日本冷凍空調工業会：JRA GL-17(業務用冷凍空調機器の常時監視によるフロン類の漏えい検知システムガイドライン), 2021
- 2) 横河電機株式会社 HP：ペーパーレスレコーダ GP10/GP20, <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/products-and-services/measurement/data-acquisition-products/data-logger/touch-screen-gp10-gp20/>, (参照 2023-4-17).
- 3) Tailscale HP：Best VPN Service for Secure Networks, <https://tailscale.com/>, (参照 2023-4-21).