

はじめに

モータ・ドライブに関して多くの優れた教科書が書かれています。しかしながら、これらの多くは、ある程度の予備知識があることを前提としており、新規参加者が基礎的な理解をする目的としては難解なものでした。インターネット上には有用な情報がありますが、これらは一般に限られた狭いアプリケーションに向けたものや、特定の製品や市場に関するものです。さらに、公開されている資料の多くは、そのトピックスを完全に理解するために必要な“実例”が示されていません。教科書もインターネットの資料も、むしろ幅広い概略を得る上での参考資料とするのに適しています。

この技術読本は、入力信号（交流ライン入力）からモータ軸の検出（機械的パワー）およびその間のすべての関連領域を通してモータ駆動の基本を説明することで、技術全体の概略を提供することを目的としています。また、他の資料からより深い情報を検索する前に、まず広い範囲の概略を必要とする新規参入した人々を対象にしています。このシリーズが対象にしている新規参入者としては

- この分野の勉強を始めたばかりの技術系学生
- この分野が初めての技術者やこの分野のことをより深く知りたいと考えている技術者。これにはソフトウェア(制御)技術者、インバータ・サブシステム技術者、システム技術者、パワー半導体技術者およびモータ技術者などが含まれます。
- このトピックスをより深く知りたいと考えているが、詳細な教科書を読みたいとは思っていないメンテナンス要員。

大まかに言って、この読本では下記の8つのトピックスを扱います。

- 交流ライン電圧と電流
- パワー半導体
- 電力変換システム
- モータ
- 可変周波数モータ・ドライブ
- モータ軸のトルク、速度、方向と角度の検出
- 正弦波波形(交流ライン)のパワー計測
- ドライブシステム出力におけるパルス幅変調(PWM)出力のような歪んだ波形のパワー計測

当然のことながら、これら各々のトピックスにはモータ・ドライブの中で確固たる基礎を提供するために必要な多くのサブ・トピックスがあります。

非常に多くの人達が、これらトピックスの理解を深めさせてくれたり、編集の手伝いをしてくれたりして著者を支援してくれました。研究室や電話で時間を割いていただき、編集に力を貸していただいた方々のご協力に感謝します。この読本はこれらの人達なしには成し得ませんでした。

もしもフィードバックや質問が生じたり、間違いを発見したり、変更や追加の提案がありましたら、お気軽に著者 ken.johnson@teledynelecroy.com までお知らせください。この読本が取り扱った分野におけるオシロスコープの用法について特定の仕様や興味あるアプリケーションの情報は特に歓迎いたします。

著者について



Kenneth Johnson は、テレダイン・レクロイで Director of Marketing and Product Architect の職についています。Hipotronics 社における高電圧の試験と計測からキャリアを出発させ、変圧器や誘導モータ、発電機の試験を対象に、69kV 以下の電気機器の交流、直流およびインパルス試験を行っていました。2000 年にテレダイン・レクロイに入社してからは、プロダクト・マネージャとして幅広いオシロスコープやシリアル・データ・プロトコル、プローブの製品群を送り出しています。物理層とプロトコル層を同時解析する分野で 3 つの特許を取得しています。

現在、パワーエレクトロニクス分野とモータ・ドライブ試験ソリューションに集中しており、この分野における新しいソリューションのための product architect として働いています。Rensselaer Polytechnic Institute で電気工学理学士の学位を受けています。

交流(AC)ラインシステム（電圧、電流、電力）

はじめに

プリント基板アセンブリ(PCA)設計(つまりプリント基板上の回路設計)に熟練した電気技術者にとって、彼らの知る交流ライン電圧と電流は、120V もしくは 240V の壁のコンセントから取るスイッチング電源の入力の最も基本的な入力定格かもしれません。パワーエレクトロニクスや電力変換を仕事としていない限り、多くの電気技術者は交流電圧や電流よりもプリント基板上の非常に小規模の DC 電源レールやデジタル・ロジックの動作電圧のほうが馴染みでしょう。

しかしながら、交流ライン電源と電流定格の基本的な知識があれば、部品や製品の定格をより深く理解することに役立つかもしれません。以下のことを疑問に思ったことはありませんか？

- なぜ高電圧差動プローブが一般的に 1000Vrms コモンモード安全定格を持つのでしょうか？
- なぜ“120V”に定格されたものもっと高いピーク・ピーク電圧を示すことがあるのでしょうか？
- なぜ整流された交流電圧は結果的に直流の値をもつのでしょうか？
- 電流定格の規定されていない電流を測ろうとする場合に、一定の電流定格を持つ電流プローブが目的に合わないかもしれないのは何故なのでしょう？

さらに、交流ライン電圧はプリント基板にプローブを当ててオシロスコープで計測する通常の電圧よりもずっと高いのです。これらの高い電圧は人体もしくは使用する機器に危険を生じます。従って、適切な警告が正しく理解されて人体と機器の安全が守られる為には、知識が必要です。

背景

わたしたちは交流ライン電力(と交流電圧および交流電流)と言え、しばしば商用電源、グリッド電源、家庭用電源、電灯線または主電源(または電圧と電流)を思い浮かべます。これは一般的には 50 または 60Hz の正弦波電圧と電流で、家庭や事業所に配電線を通して給電され、各家庭や事業所内でさらに配電パネルやコンセントに分電されます。電力変換の出力(PWM)も“交流”としてみなされるかもしれませんが、PWM 信号の電圧、電流、電力は別の章で取り上げますので、この章では取り扱いません。

交流ラインシステムには、単相と複相があります。これらは、1880 年の後半に各々独自に別々の人によって開発されました。三相システムは、Nikola Tesla と Westinghouse Electric Company との協業によって最初に広範囲に商用化されました。三相システムは、同じ出力を送るのに電線材料が少なく済むために、単相や二相システムと比較して、効率的で経済的です。

単相システムは、送電路と復路(中性線)が必要で、どちらの電線も最大電流(電力定格)を流せなければなりません。三相システムにおいては、等価的に同じ大きさの電力を送るには、送電路は、より低い定格電線が 3 本あればよく、中性線は 1 本でかまいません。しかも、中性線は定格で必要な太い電線は必要ありません。定義に従えば、ある相の戻り電流は別の相を流れ、中性線における戻り電流の総和はゼロになるため、平衡三相システム(通常の運用)における中性線には電流が流れません。従って、わずか 50%のコスト上昇(2 本の電線に対して 3 本の電線)で、三相システムは 3 倍の電力を供給することができるので、効率が 2 倍になります。様々な理由から、三相発電機や三相変圧器をより簡単により安価に作ることができます。さらに、三相電力は、低電力のモータでも、電力伝達機能や制御がうまく行えます。

三相システムの 3 つの相にそれぞれ個別の名前を付けます。(送電された)三相システムでは、一般的に A、B および C 相と呼ばれます。L1、L2 および L3 相と呼ばれることもあります。あまり一般的ではありません。その他にも、一般的ではない名称が用いられることがあります。

電力供給システムでは常に三相が用いられますが、小電力の家庭には三相送配電システムの一つの相だけから給電されます。大電力の商業施設には送配電システムから 3 つ全ての相が給電されます。以下に一般的に用いられるシステムをリストアップします：

- 単相、二線式
- 単相、三線式
- 三相、四線式
- 三相、三線式

三相以上の多相は一般的ではなく商用システムとしては利用されたことはありません。しかしながら商用以外に自動車や航空機、軍用のように高い信頼性が求められる場合、より多い電線で電力を供給する四相、五相や六相が用いられることがあります。そのような三相以上の多相を用いる場合は、一般的には商用電力供給ではなく、モータ駆動回路で生成されます。この多相システムについては可変周波数(モータ)駆動の章で取り上げます。

注: 安定化電圧モジュール (VRM) やデジタル・パワー・マネージメント IC (PMIC) など他のパワー・アプリケーションでは、組み込みコンピュータ・システムの中の単一の電源ラインに時分割で電流を供給する DC/DC 変換を説明する際に「位相」という言葉を用います。このようなシステムにおいては、各位相は、複数のパワー段の出力を合算することで大きな電流を供給するように作られた各々個別の DC/DC 変換器(一般的に 1 つもしくは複数の MOSFET とインダクタで構成されています)に対応します。システムの効率を最大化する為に必要な電流値に応じたパワー段もしくは位相に応じて、各パワー段のターン・オンとターン・オフのタイミングは制御されます。いずれにせよ、この“位相”という言葉の使い方は、三相システムのものとは明らかに異なります。決してこの用語を混同しないでください。

商用電源における交流周波数は、地域によって 50Hz か 60Hz のいずれかになります。供給される交流周波数は、商用電源の供給配電網を安定化するために配電網全てで同期されます。歴史的に、商用電源では発電機の同期と電気機械的電圧電流無効電力補償回路を用いて周波数の同期が行われます。しかしながら、半導体デバイスの耐電圧が上がり、電力変換システムのコストが下がり、風力発電や太陽光発電など新規の発電が電気供給に占める割合が大きくなるにつれ、電力変換システムが大きな役割を果たすようになって来ています。船舶や航空機などでは、400Hz の交流電源が個別発電機から供給されますが、標準の商用電源周波数ではありません。稀に、他の用途でまた別の周波数が用いられることがあります。これらの非標準周波数は、商用電源には用いられません。

注意

交流システムでは、グラウンド線とは別に中性線が使われます。中性線はグラウンドではありません。設計で想定した条件と異なりますが、中性線には常にある電圧が加わり、電流が流れていると想定しなければなりません。単相システムにおいては、中性線は復路として機能し、電源に電流を戻して閉じた回路を構成します。

平衡状態で、通常運転している三相システムでは、中性線には電流が流れてはいけませんが、異常動作に陥ると電流が流れる可能性があります。グラウンドは、シャーシからアース電位につながる安全接続です。単相システムにおいて、故障によって、中性線がグラウンドに接続されると戻り電流がグラウンドに流れ込み、ブレーカや漏電遮断器(GFCI)のような保護回路が働いて電流が遮断されます。三相システムでは、中性線はグラウンドに接続されている場合もありますが、様々な故障モードや条件で無視できない電流が中性線に流れることがあります。

電気コード、歴史的に許された接続、全ての安全性の考慮事項に関する包括的な議論については、この読本の範囲を超えています。予防措置を取る必要がないとする専門的な知識を持っていない限り、最悪の場合を想定して過剰な予防措置を講じるのが最良の方法となります。さらに、保護回路は、1 サイクル未満で働くかもしれませんし、数サイクルかかるかもしれません。従って、中性線に電圧と電流保護があっても、中性線に触れた人を通して全電流がグラウンドに流れ、重大な障害を受けたり死に至ったりする可能性があります。

交流ライン電圧

はじめに

交流ライン電圧の値は、ボルト RMS(V_{RMS})で表されますが、一般的には、単に V または V_{AC} と表記されます。このように表記は異なっていますが、それは V_{RMS} のことを意味しているので V_{RMS} と入れ替えても差し支えありません。

交流ライン電圧は、常に商用電源が要求する 5%以下の全高調波歪(THD)である正弦波であり、利用者は、非直線電流が流れたり、交流ラインの電圧波形を歪ませたりする“ノイズの多い”機器(例えば、PWM モーター・ドライブやフィルタなしのインバータ)を接続して入力される電圧波形に 5%以上の全高調波歪を与えてはいけません。

単相であっても三相であっても、交流システムにおいて、交流ライン電圧は、単一のライン(相)と中性点間(相電圧)または、あるラインと別のライン間(線間電圧)で計測されます。さらに、定格の交流電圧は、単相と三相システムでは基準とする先が異なります。従って、単相交流または三相交流システムにおける様々な電圧値(ピーク電圧、ピーク・ピーク電圧、実効値電圧、相電圧、線間電圧など)の理解と計算方法には説明が必要になります。

単相交流ライン電圧

単相二線式交流システムでは、電圧線(米国では 120V)と中性線があります。グラウンドは、米国においては、商用電源の引き込み線と建物内で供給され、一般的に地中深くに埋設されます。

米国においては、単相三線式システムではどちらも 120V の電圧がかかる 2 本の電圧線と中性線とで構成されます。くどくなりますが、グラウンドは建物内から供給されます。両方の電圧線には中性線に対して 120V の電圧がかかっており、この 2 つの電圧線(ライン)間には 240V の電圧がかかります。これらのラインは“ホット”であり電流を供給します、戻り電流は中性線を流れます。建物内には適切な安全装置(ヒューズやブレーカなど)が取り付けられた分電設備があり、その筐体(一般的に分電盤とよばれています)は対地グラウンドに接続されています。

商用電源の供給源でも対地グラウンドに接続されています。図 1 を参照してください。

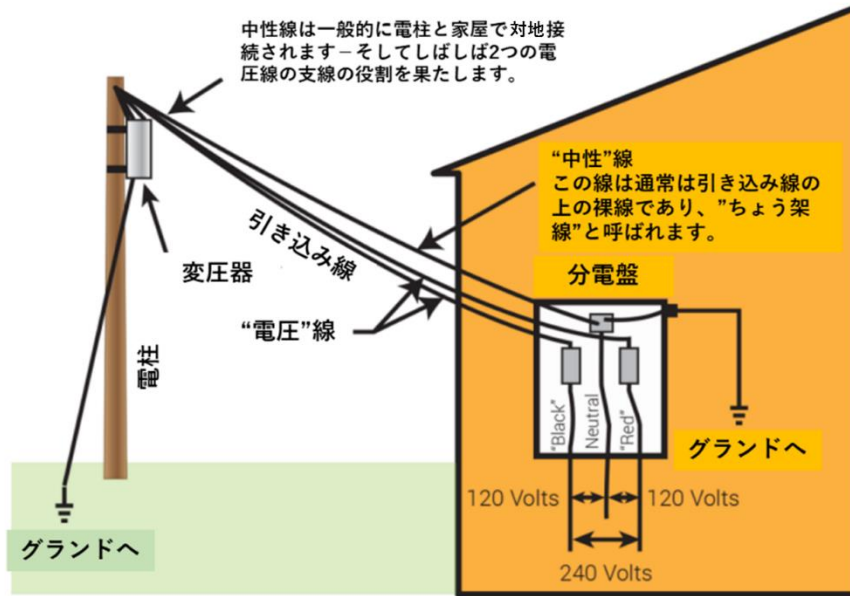


図 1: 一般的な米国の家庭に配電される単相三線式

中性線は商用線に電流を戻し、商用線の電柱のグラウンドと分電盤のグラウンドにつながれます。対地グラウンドは両方で同じ電位でなければなりません。

単相交流電圧を RMS 電圧として単純化しますが、実際の単相交流電圧は、ある大きさを持つ回転ベクトルからなるので、その大きさは正弦波状に変化します。回転周期は電源周波数の逆数になります。この電圧ベクトルの大きさは瞬時相電圧に相当し、120 V_{RMS} 定格の単相交流システムにおいては、ピーク電圧 V_{PEAK} は、 $\sqrt{2} * V_{RMS}$ 、169.7V になります。

電圧ベクトルは、1 周期=1/周波数(50Hz または 60Hz)で 1 回転します。瞬時の電圧の大きさは $V_{PEAK} * \sin(\alpha)$ に従い、ここで α はラジアンで表した回転角度になります。図 2 を参照してください。



図 2: 電圧の大きさ

図 3 は、時間軸において回転電圧ベクトルが周波数と周期一定の正弦波になることを示しています。

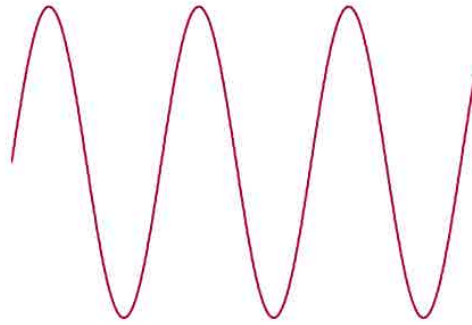


図 3: 電圧の時間的な変化を波形に表すと、回転電圧ベクトルは正弦波となります。

様々な電圧値(ピーク電圧、ピーク・ピーク電圧など)を理解するには、120V または $120 V_{AC}$ を定格とする正弦波を例にしてみよう。実際には $120 V_{RMS}$ 以という意味なので、他の電圧値は以下のように計算することができます。:

$$\text{ピーク電圧} : V_{PEAK} = \sqrt{2} * V_{AC}, \text{ or } \sqrt{2} * V_{RMS} = 169.7 \text{ V}$$

$$\text{ピーク・ピーク電圧} : V_{PK-PK} = 2 * V_{PEAK} = 339.4 \text{ V}$$

$$\text{直流電圧} : V_{DC} = V_{PEAK} = 169.7 \text{ V (整流した場合)}$$

図 4 は 計算値をプロットしたものです。

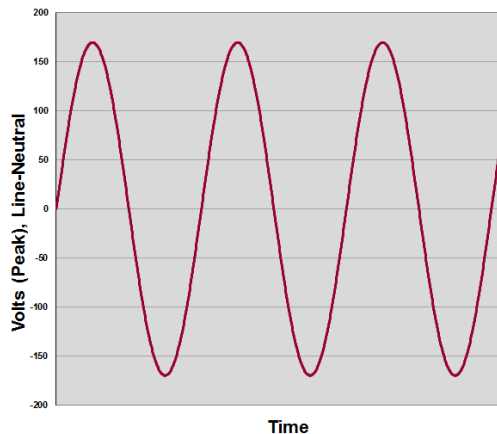


図 4: 120 VAC の商用単相交流電圧

一般的に用いられている“真の RMS”という言葉は、“マーケティング上の造語“で安価な機器で計測した $V_{PK-PK}/2$ 値から換算するのと比較して数学上正しい計算方法を示しています。この換算は、実際にはあまりない、単一周波数の正弦波でのみ有効ですが、こうした安価な計測機が用いられる用途では十分な精度であることが少なくありません。

テレダイン・レクロイの 12 ビットの HDO8000A シリーズ(または、HDA8000A をベースにした MDA800A シリーズ)のようなオシロスコープと適切な仕様の電圧プローブ(例えばテレダイン・レクロイの HVD3106 高圧差動プローブ)を用いれば、 $120 V_{AC}$ の商用電源ラインを計測することができます。オシロスコープに搭載されたパラメータ計測機能が様々な電圧値を計測するのに用いられます。

図 5 で示した画面は、三相パワー解析パッケージを搭載したテレダイン・レクロイの 8 チャンネル、12 ビット・モータ・ドライブ・アナライザで捕捉した(公称) $120 V_{AC}$ の交流信号です。

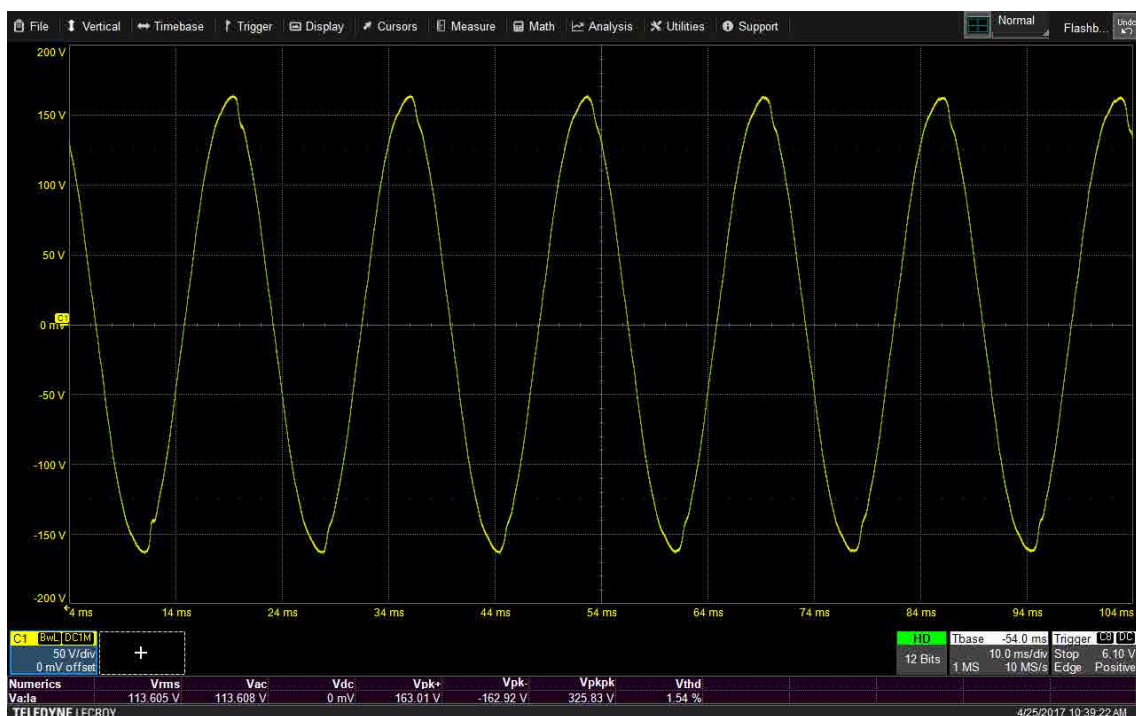


図 5: テレダイン・レクロイの 8 チャンネル、12 ビットのモータ・ドライブ・アナライザで捕えた 120 VAC 信号

図 5 の下側に表示されたパラメータを図 6 に拡大して示しました。このパラメータ表示では、120 V_{AC} 信号で計測された様々な電圧値が示されています。

Numerics	Vrms	Vac	Vdc	Vpk+	Vpk-	Vpkpk	Vthd
Va:la	113.605 V	113.608 V	0 mV	163.01 V	-162.92 V	325.83 V	1.54 %

図 6: 図 5 に示した波形から計測された主要な電圧値が示されています。

V_{RMS} 値と V_{AC} 値は同じ値になっており、V_{DC} は 0 V、V_{PK+} 値と V_{PK-} 値がほぼ同じであることに注目してください。これらの値が前述した公称値から少しずれているのですが、これは計測しているのが商用電源から配電された点から長いケーブルを通して送られてきたものであり、負荷に約 10A の電流が流れている条件でのものです。このような電圧降下は一般的な商用電源や工場内では全負荷状態に近い状態で普通に起きるものです。従って、120 V_{AC} は、通常は 115 V_{AC} だと認識されています。また、全高調波歪は小さい(1.54%)ですが、ゼロではありません。純粋な正弦波は現実社会ではほとんど存在しません。

大きな電流負荷は公称 120 V_{AC} のラインから電圧を降下させるという仮説を試験するために、モータ・ドライブ・アナライザを使って長時間の波形を捕捉し、負荷がかけられる前、かけられている間と取り外された後の値を検証することができます。ここに示す例では負荷はトースターで、負荷をかけるというのは“トーストを焼く”ということです。

図 7 は、負荷ゼロの状態から始めて 1 秒間負荷をかけ、その後負荷を取り除いた 2 秒間の捕捉波形を示しています。2 秒間全体の電圧波形は左上に示されており、2 秒間全体の電流波形が左下に示され、それぞれ拡大した波形が右側に示されています。電力計算ソフトウェアは“Zoom+Gate”モードになっているので、計算は電流が流れていない期間を拡大した範囲(2 秒間全体の波形のうち右側に拡大された部分)に限定され、V_{RMS} 値は 117.2 V になっています。



図 7：左上に示した、無負荷からトースターを負荷にして、再び無負荷に戻した2秒間を捕捉した波形を用いたライン電圧の交流ライン計測結果。2秒間で捕捉した電流波形は左下に示され、電圧と電流波形の拡大表示がそれぞれ右側に示されています。

しかしながら、トースターが“パンを焼いている”（電流が流れている）時には電圧は113.7Vに下がります（図8参照）。電圧降下は長時間捕捉した波形の振幅に現れ、計測されたパラメータ値でも分かります。



図 8：交流ライン計測結果はトースターがパンを焼いて電流が流れた時に起きる電圧降下(117.2 V → 113.7 V)をはっきりと示します。

パンが焼きあがったら、電流は流れなくなり、電圧は無負荷時の値に戻ります(図 9 参照)。



図 9: パンが焼きあがって無負荷に戻った時の交流ライン計測結果

図 10 は、この例における単相ライン電圧(および電流)の計測メニューの設定を示しています。計算には高調波フィルタ(50 次高調波まで含める)の設定がされており、直流計測は除外(“include DC” チェックボックスは外されている)され計測システムで生じる微小な(<0.25%)直流分を取り除いています。

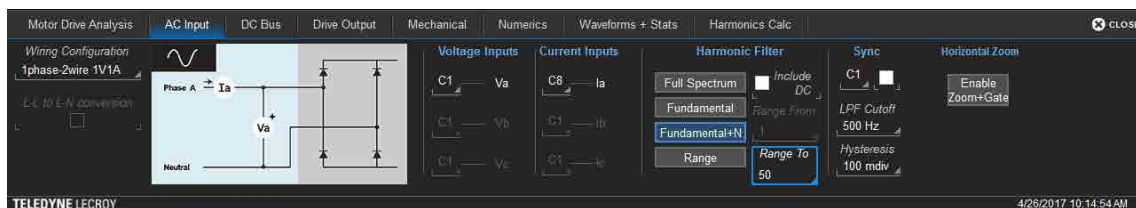


図 10: トースターを用いた計測例における単相交流ライン計測の設定