

StudentZone — 2018年9月 「ADALM1000」で、SMUの基本を学ぶ トピック9:交流回路の電力と力率

著者: Doug Mercer、Antoniu Miclaus

Share on 💙 🚹 in

アナログ・ダイアログの2017年12月号から、アクティ ブ・ラーニング・モジュール「ADALM1000」について 紹介しています。今回も、引き続きこのSMU(ソース・ メジャー・ユニット)モジュールを使用し、小規模かつ 基本的な測定を行う方法を説明します。ADALM1000に 関する以前の記事は、こちらからご覧になれます。



図1. ADALM1000のブロック図

目的

今回は、RC回路、RL回路、RLC回路の有効電力、無効電 力、皮相電力を実際に測定してみます。また、RL直列回 路の力率の改善に必要なコンデンサの値について、実測を 交えながら検討してみます。

背景

時間の経過と共に電圧と電流が変化する場合、与えられ た負荷に対して供給される電力も、時間と共に変化する ことになります。このように時間と共に変化する電力は、 瞬時電力と呼ばれます。ある瞬間の電力は、符号が正の 場合もあれば負の場合もあります。正の場合、電力は負 荷に供給されて熱として消費されるか、またはエネルギ ーとして負荷に蓄積されます。負の場合には、負荷から 電力(負荷に蓄積されたエネルギー)が放出されるとい うことを意味します。負荷に供給される有効電力(実電 力)は、瞬時電力の平均値です。

電圧と電流が交流(AC)の正弦波形として供給される場 合、RC、RL、RLCのそれぞれが負荷となる回路で消費 される有効電力P(単位はW)は、抵抗だけで消費され ます。コンデンサやインダクタのように理想的なリアク タンス素子では、有効電力は消費されません。リアクタ ンス素子では、交流信号の半分の周期でエネルギーが蓄 積され、残り半分の周期で放出されます(供給側に送り 返されます)。リアクタンス素子でやり取りされる電力 は、無効電力Qと呼ばれます。その単位としては、バー ル(Var:volt-ampere reactive)が使われます。 負荷で消費される有効電力Pは、次式で求められます。

 $P = I^2 R$

ここで、Rは負荷の抵抗成分、Iは電流の(真の)実効値 です。

一方、負荷における無効電力は、次式で求められます。

 $Q = I^2 X$

ここで、Xは負荷のリアクタンス、Iは交流電流の実効値 です。

負荷に交流の実効電圧Vが印加され、交流の実効電流Iが 流れているとき、皮相電力Sは実効電圧と実効電流の積で 求められます。その単位としては、VAが使われます。皮 相電力は次式で求められます。

S = VI

負荷に抵抗成分とリアクタンス成分の両方がある場合、皮 相電力は有効電力も無効電力も表しません。直流(DC) の電力を求める式と同じものになりますが、この式では 電圧波形と電流波形に位相差があり得ることが考慮され ていません。そのため、皮相電力(Apparent Power)と 呼ばれています。

有効電力、無効電力、皮相電力の関係は、電力三角形(ベ クトル図)で表すことができます。図2に示すように、有 効電力は底辺、無効電力は高さ、皮相電力は三角形の斜辺 に対応づけられます。



図2. 有効電力、無効電力、皮相電力の関係を表す電力三角形

この図から、Sは次式で求められます。

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$$

角θの余弦は力率pf(Power Factor)と呼ばれます。力 率は有効電力Pと皮相電力Sの比であり、次式で表されま す。

Analog Dialogue 52-09

$$pf - cos^{\theta} = \frac{P}{S} = \frac{P}{(VI)}$$

ここで、θは負荷にかかる電圧(負荷電圧)の波形と、負 荷を流れる電流(負荷電流)の波形の位相差です。力率 は、負荷電流が負荷電圧より遅れているとき(誘導性) に遅れ、負荷電流が負荷電圧より進んでいるとき(容量 性)に進むと考えられます。

有効電力は、次式のように皮相電力と力率の積として求 められます。

 $P = VI \cos\theta$

負荷で消費される有効電力(単位はW)は、抵抗に流れ る真の実効電流と抵抗値から、次式のようにして求めら れます。

 $P = I^2 R$

図3のようなRC回路における無効電力は、次式によって 求まります。

 $Q = V_C I = I^2 X_C$

ここで、V_cはコンデンサ両端の実効電圧、Iはコンデン サを流れる実効電流、X_cは容量性のリアクタンスです。

一方、図6のようなRL回路における無効電力は、次式を 使うことで算出できます。

 $Q = V_L I = I^2 X_L$

ここで、V_Lはインダクタ両端の実効電圧、Iはインダク タを流れる実効電流、X_Lは誘導性のリアクタンスです。

そして、図8(a)のようなRLC回路における無効電力は、次式を使って求められます。

 $Q = V_X I = I^2 X$

ここで、 $V_x = V_c - V_L d J P / p / p / x 2 d \phi$ (C、LのJP / タンスの合算値) にかかる実効電圧、I は J P / p / p / x 2 x c - XL は J P / p / y / x 2 d \phi で す。 リア / p / x 2 d 体 に か かる 実効電圧は、コンデンサの電 圧 V c / 2 d / y / p の電圧 V の 位相差が 180° であることか ら、両者の差に等しくなります。

力率の改善

一般に、大型のACモーターのような誘導性の負荷に対しては、力率の改善が必要になります。力率を1(ユニティ)にするには、ピーク電流を抑える必要があります。 そのため、力率をできるだけ1に近づけるようにインダクタンスを補償するというのが、効果的な手法となります。 それによって、有効電力と皮相電力(VI)の値を近づけることができます。力率は、誘導性の負荷に対して並列にコンデンサを接続することで改善されます。

ここでは、図6の回路の力率を改善するために付加すべき 適切なコンデンサの値を検討します。そのためには、まず 元のRL回路の無効電力を把握する必要があります。これ については、電力三角形を描くことで求めます。電力三角 形は、有効電力、皮相電力、力率の角度θがわかれば描く ことが可能です。そして、元の回路の無効電力がわかれ ば、次式によって力率の改善に必要な容量性リアクタン スX_cを算出することが可能です。

$$Q = \frac{V^2}{X_C}$$

ここで、VはRL回路にかかる実効電圧です。上の式は、 以下のように変形することができます。

$$X_C = \frac{V^2}{O}$$

X_cとして必要な容量値は、周波数Fを使い、次式によって 求めることができます。

$$X_C = \frac{1}{(2\pi FC)}$$

この式は、次式のように変形できます。

$$C = \frac{1}{(2\pi F X_C)}$$

モータのRL負荷に、補正用のコンデンサを並列に接続 すれば、力率は1に近づきます。すなわち、電圧と電流 は同相になります。また、有効電力は皮相電力とほぼ等 しくなります。

準備するもの

- ▶ ADALM1000
- ▶ ソルダーレス・ブレッドボード、ジャンパ線
- 抵抗:47Ω(1個)、100Ω(1個)
- ▶ コンデンサ:10µF(1個)
- ▶ 抵抗:47mH(1個)

RC回路に関する説明

100Ωの抵抗R₁、10µFのコンデンサC₁を使って、ソルダー レス・ブレッドボード上に図3のRC回路を構成します。す なわち、図4のようにして、回路を構成するということで す。緑色の枠によって示しているように、ADALM1000と の間には、3本の接続が必要です。回路が完成したら、ソ フトウェア・モジュール「ALICE」のオシロスコープ機 能を起動します。





図4. ブレッドボード上に構成したRC回路

手順1

スコープのメイン・ウィンドウの右側で、「CA-V」と 「CB-V」のオフセットを調節するために、2.5という値 を入力します。この実験では、負荷に対して交流信号(正負の電圧)を印加する必要があります。また、すべて の測定値は2.5Vのコモン・レールを基準とします。続い て、「CA-I」と「CB-I」の垂直位置の設定値として、0 を入力します(スコープ画面の下部)。垂直方向の目盛 は、現在、0を中心として-2.5~2.5の範囲になっている はずです。さらに、「CA-I」の垂直方向の目盛を5mA/ Divに設定してください。

Adjust Gair	/ Offset	
CA-V 1.0	2.5 🔫	CA-VとCB-Vの オフセットを 2.5に設定
CB-V 1.0	2.5 🔫	
CA-I 1.0	0.0	
CB-I 1.0	0.0	

チャンネルAのAWG (任意信号発生器)の「Min」の値 を1.08Vに設定します。また、「Max」の値は3.92Vに設 定します。これにより、2.5Vを中心とする2.84Vp-p(約 1Vrms)のサイン波が、入力電圧として回路に印加されま す。その周波数は250Hz、位相は90°に設定します。AWG Aの「Mode」ドロップダウン・メニューから、「SVMI」 モードを選択します。次に、AWG Aの「Shape」ドロ ップダウン・メニューから、「Sine」を選択します。さ らに、AWG Bの「Mode」ドロップダウン・メニューで 「Hi-Z」モードを選択します。

続いて、「Curves」ドロップダウン・メニューで 「CA-V」、「CA-I」、「CB-V」を表示の対象として選 択します。「Trigger」ドロップダウン・メニューでは、 「CA-V」と「Auto Level」を選びます。

この構成は、オシロスコープのチャンネルAによって回路を駆動する交流の電圧/電流信号を観測し、チャンネルBによって抵抗にかかる電圧を観測するためのものです。コンデンサの両端の電圧は、単純にチャンネルAとチャンネルBの測定値の差になります(「Math」ドロップダウン・メニューで、「CAV - CBV」を選択します)。ここで、「Sync AWG」セレクタがチェックされていることも確認してください。

このソフトウェアを使えば、チャンネルAの電圧波形と 電流波形を表示したり、チャンネルBの電圧波形の実効 値を算出したりすることができます。また、チャンネル AとチャンネルBの電圧波形について、各点の差の実効 値を算出することも可能です。この実験に当てはめて 言えば、コンデンサ両端の電圧の実効値を求められると いうことです。これらの値を表示するために、「Meas CA」ドロップダウン・メニューにおいて、「-CA-V-」 セクションの下で「RMS」と「CA - CB RMS」を選択 し、「-CA-I-」セクションの下で「RMS」を選択しま す。さらに、「Meas CB」ドロップダウン・メニューの 「-CB-V-」セクションの下で「RMS」を選びます。他に は、CA-V、CA-I、CB-Vの最大値(正のピーク値)など も表示するとよいかもしれません。

ここまでの設定を終えたら、「Run」ボタンをクリックし ます。画面のグリッド上に2周期分以上のサイン波を表示 できるよう、時間の基準を調整します。「Hold Off」は 4.0ミリ秒に設定しましょう。チャンネルAの電圧、チャ ンネルBの電圧、チャンネルAの電流、「Math」メニュ ーで設定した「CA - CB」の電圧という、計4本のトレー スが表示されるはずです。ここでは100Ωの抵抗を使用し ており、電流の垂直方向の目盛は5mA/Divです。そのた め、この抵抗を流れる電流のトレースは、垂直方向の目 盛を0.5V/Div(0.5mA × 100Ω = 0.5V)に設定すると、 チャンネルBのトレース(抵抗の両端の電圧)のすぐ上 に表示されます。

RC回路全体にかかる電圧の実効値(CHA V RMS)、R₁ を流れる電流(この直列回路のチャンネルAにおける電 流)の実効値(CHA I RMS)、抵抗にかかる電圧の実 効値(CHB V RMS)、コンデンサ両端の電圧の実効値 (A-B RMS)を記録してください。



図5. RC回路における各信号の波形と測定値

次に、これらの値を使って、RC回路の有効電力Pを求めま す。また、無効電力Q、皮相電力Sを算出してください。

算出したP、Q、Sの値を使って、図2のような電力三角 形を描きます。そして、このRC回路の力率pfとθを求め ます。

オシロスコープのトレースは、電圧(緑色で示されたチャンネルAの電圧のトレース)と電流(青色で示されたチャンネルAの電流のトレース)の時間軸上の関係を表しています。表示マーカーまたは時間カーソルを使って、これら2本のトレースがゼロと交差する点の時間の差を測定してください。それらの値から、電圧と電流の位相角を測定し、その角θを使って力率を求めます。

このようにして得た値を、P、Q、Sと電力三角形から得た 値と比較してください。力率は遅れているでしょうか、 進んでいるでしょうか。なぜ、そうなるのでしょうか。

RL回路に関する説明

ALICEのDC抵抗計ツールを使って、47mHのインダクタの DC抵抗の値を測定します。RL回路全体の直列抵抗は、イ ンダクタの抵抗成分と47Ωの抵抗R₁の総和になります。有効 電力と無効電力の算出には、この全体の直列抵抗を要素と して盛り込む必要があります。 ソルダーレス・ブレッドボードを使い、図6の回路を構成しま しょう。抵抗 R_1 は47 Ω 、インダクタ L_1 は47mHとします(図7)。



図6. RLで構成した負荷回路



図7. ブレッドボード上に構成したRL回路

手順2

準備が完了したら、「Run」ボタンをクリックします。画 面のグリッド上に2周期分以上のサイン波を表示できるよ う、時間の基準を調整してください。「Hold Off」は4.0 ミリ秒に設定しましょう。チャンネルAの電圧、チャンネ ルBの電圧、チャンネルAの電流、「Math」メニューで設 定した「CA - CB」の電圧という、4本のトレースが表示 されるはずです。

RL回路全体にかかる電圧の実効値(CHA V RMS)、R₁ を流れる電流(この直列回路のチャンネルAにおける電 流)の実効値(CHA I RMS)、抵抗にかかる電圧の実 効値(CHB V RMS)、インダクタ両端の電圧の実効値 (A-B RMS)を記録してください。

これらの値を使って、RL回路の有効電力P、無効電力Q、 皮相電力Sを求めましょう。

算出したP、Q、Sの値を使い、図2のような電力三角形 を描きます。そして、このRL回路の力率pfとθを求めて ください。

オシロスコープのトレースは、電圧(緑色で示されたチャンネルAの電圧のトレース)と電流(青色で示されたチャンネルAの電流のトレース)の時間軸上の関係を表しています。表示マーカーまたは時間カーソルを使って、これら2本のトレースがゼロと交差する点の時間の差を測定し、その値から、電圧と電流の位相角を測定します。この角θを使って、力率を求めます。

このようにして得た値を、P、Q、Sと電力三角形から得た 値と比較してください。力率は遅れているでしょうか。 それとも進んでいるでしょうか。なぜ、そのようになる のでしょうか。

RLC回路に関する説明

ソルダーレス・ブレッドボードを使って、図8 (a) に示すRLC 回路を構成します。図8 (b) のように、抵抗 R_1 は47 Ω 、コンデ ンサ C_1 は10 μ F、インダクタL₁は47mHとします。



図8(a). RLCで構成した負荷回路。 コンデンサを測定の対象とします。



図8(b). ブレッドボード上に構成したRLC回路

手順3

RLC回路については、各素子の両端の実効電圧を測定する 必要があります。図8(a)に示す構成において、チャンネ ルBは、C₁とL₁をつなぐノードに接続されています。その ため、C₁の両端の実効電圧は、CAとCBの波形の差から得 ることができます。一方、チャンネルBは、L₁とR₁をつな ぐノードに接続されています。そのため、R₁にかかる実効 電圧は、CBの波形から直接得ることが可能です。RLC回 路全体にかかる電圧の実効値(CHA V RMS)、R₁を流れ る電流(この直列回路のチャンネルAにおける電流)の実 効値(CHA I RMS)、抵抗にかかる電圧の実効値(CHB V RMS)を記録してください。加えて、CHBがC₁とL₁の 間のノードに接続されているときにコンデンサの両端に かかる電圧の実効値(A-B RMS)、CHBがL₁とR₁の間 のノードに接続されているときのL₁とC₁の総リアクタン スも記録します。

インダクタL₁にかかる実効電圧も把握しなければなりま せん。この負荷回路全体のインピーダンスは、直列に接 続した部品の並び順を図8(c)に示すように入れ替えて も変化しません。そして、図8(a)のコンデンサの場合 と同じ方法により、CAとCBの波形の差からL₁にかかる 実効電圧を得ることができます。

RLC回路全体にかかる電圧の実効値(CHA V RMS)、R₁ を流れる電流(この直列回路のチャンネルAにおける電 流)の実効値(CHA I RMS)、抵抗にかかる電圧の実 効値(CHB V RMS)、インダクタ両端の電圧の実効値 (A-B RMS)を記録してください。そして、負荷を流 れる電流だけでなく、回路全体に関する値やR₁にかかる 値は、図8(a)の回路における測定結果と同じになるか どうかを確認します。同じ結果が得られるとしたら、な ぜそうなるのでしょうか。



図8(c).RLCで構成した負荷回路。 インダクタを測定の対象とします。

各測定値を使って、RLC回路の有効電力Pを求めま す。L、Cの総リアクタンスに加え、L、Cそれぞれの無 効電力Q、皮相電力Sも求めてください。

続いて、チャンネルAで印加する信号の周波数を250kHz から500Hzに変更し、再度、RLC回路の実効電圧を測定 してみてください。有効電力、無効電力、皮相電力はど のように変化するでしょうか。負荷電流は遅れているで しょうか。それとも進んでいるでしょうか。なぜ、その ようになるのでしょう。

さらに、チャンネルAで印加する信号の周波数を125Hzに 下げて、RLC回路の実効電圧を測定してみてください。 有効電力、無効電力、皮相電力はどのように変化するで しょう。負荷電流は遅れていますか。それとも進んでい ますか。なぜ、そうなるのでしょうか。

力率の改善に関する説明

図9に示したのは、力率の改善について検討するための回路 です。図6のL」と並列にコンデンサC」を加えています。



図9. 力率の改善の対象とするRL負荷回路



図10. ブレッドボード上に構成した図9のRL負荷回路

図6の回路についての測定結果と、先述した力率の改善 に関する式を使って、印加電圧の周波数が250Hzの場合 にC₁の値はどうあるべきなのか算出してみます。実際の 回路では、計算値に最も近い標準コンデンサ(または、 標準コンデンサを並列接続したもの)をC₁として使用す ることになります。 手順4

図6のRL回路の場合と同様に、回路全体にかかる電圧の実 効値(CHA V RMS)、R₁を流れる電流(この直列回路の チャンネルAにおける電流)の実効値(CHA I RMS)、 抵抗にかかる電圧の実効値(CHB V RMS)、インダクタ 両端の電圧の実効値(A-B RMS)を記録してください。

それらの値を使って、回路の有効電力P、無効電力Q、皮 相電力Sを求めます。

算出したP、Q、Sの値を使い、図2のような電力三角形を 描いてください。それを使って、RL回路の改善後の力率 pfとθを求めます。その値を図6のRL回路で求めた値と比 較します。求めたコンデンサの値は、pfを1にするために 最適な値にどの程度近づいたでしょうか。なぜ差が生じる のか考察してください。

付録

違う値の部品を使用する

記事中で指定された値の部品の入手が容易でない場合に は、違う値を選択することもできます。部品のリアクタ ンス(X_cまたはX_L)を変更した場合、同時に周波数も変 更することで対処できます。例えば、記事中で使われて いる47mHではなく、4.7mHのインダクタを使用すると します。その場合には、交流信号の周波数を250Hzから 2.5kHzに変更してください。10.0μFのコンデンサの代わ りに1.0μFのコンデンサに使用したいといった場合にも、 同様の方法で対処できます。

RLC用のインピーダンス・メータを使用する

ALICEは、直列接続した抵抗RとリアクタンスXの測定 に使用できるインピーダンス・アナライザ/RLCメータ の機能を備えています。このツールを使用し、本稿で扱 った実験で使用するR、L、Cについての測定を行うと、 実験結果の検証に役立つでしょう。



図11. 付録に記載した値を使用した場合の 測定結果。Time/Divを0.5ミリ秒に設定しています。

問題

- ▶ 一般に、力率の改善おいては、どのような事柄が効果をもたらしますか。
- ▶ 力率を改善するための最も一般的な方法とは、どのようなことですか。

答えはStudentZoneブログで確認できます。

注記

アクティブ・ラーニング・モジュールを使用する記事で は、本稿と同様に、ADALM1000に対するコネクタの接 続やハードウェアの設定を行う際、以下のような用語を 使用することにします。まず、緑色の影が付いた長方形 は、ADALM1000が備えるアナログI/Oのコネクタに対 する接続を表します。アナログI/Oチャンネルのピンは、 「CA」または「CB」と呼びます。電圧を印加して電流 の測定を行うための設定を行う場合には、「CA-V」の ように「-V」を付加します。また、電流を印加して電圧 を測定するための設定を行う場合には、「CA-I」のよう に「-I」を付加します。1つのチャンネルをハイ・インピ ーダンス・モードに設定して電圧の測定のみを行う場合、 「CA-H」のように「-H」を付加して表します。

同様に、表示する波形についても、電圧の波形は「CA-V」と「CB-V」、電流の波形は「CA-I」と「CB-I」のように、チャンネル名とV(電圧)、I(電流)を組み合わせて表します。

本稿の例では、ALICE (Active Learning Interface for Circuits and Electronics)のRev 1.1 を使用しています。

同ツールのファイル (alice-desktop-1.1-setup.zip) は、 こちらからダウンロードすることができます。

ALICEは、次のような機能を提供します。

- ▶ 電圧/電流波形の時間領域での表示、解析を行うための2チャンネルのオシロスコープ
- ▶ 2チャンネルのAWG(任意信号発生器)の制御
- ▶ 電圧と電流のデータのX/Y軸プロットや電圧波形のヒストグラムの表示
- ▶ 2チャンネルのスペクトル・アナライザによる電圧信号の周波数領域での表示、解析
- スイープ・ジェネレータを内蔵したボーデ・プロッタ とネットワーク・アナライザ
- ▶ インピーダンス・アナライザによる複雑なRLC回路網の解析、RLCメーター機能、ベクトル電圧計機能
- ▶ 既知の外付け抵抗、または50Ωの内部抵抗に関連する 未知の抵抗の値を測定するためのDC抵抗計
- ▶ 2.5Vの高精度リファレンス「AD584」を利用して行う ボードの自己キャリブレーション。同リファレンスは アナログ・パーツ・キット「ADALP2000」に含まれ ている
- ▶ ALICE M1Kの電圧計
- ▶ ALICE M1Kのメーター・ソース
- ▶ ALICE M1Kのデスクトップ・ツール

詳細についてはこちらをご覧ください。

注) このソフトウェアを使用するには、PCに ADALM1000を接続する必要があります。



図12. ALICE Rev 1.1のデスクトップ・メニュー

著者:

Doug Mercer (doug.mercer@analog.com)は、1977年にレンセラー工科 大学で電気電子工学の学士号を取得しました。同年にアナログ・デバイセ ズに入社して以来、直接または間接的に30種以上のデータ・コンバータ製 品の開発に携わりました。また、13件の特許を保有しています。1995年に アナログ・デバイセズのフェローに任命されました。2009年にフルタイム 勤務からは退きましたが、名誉フェローとして仕事を続けており、Active Learning Programにもかかわっています。2016年に、レンセラー工科大 学 電気/コンピュータ/システム・エンジニアリング学部のEngineer in Residenceに指名されました。



Doug Mercer

この著者が執筆した 他の技術文書

StudentZone — 2018年8月 「ADALM1000」で、 SMUの基本を学ぶ — トピック8:LC並列回路の 共振

Analog Dialogue 52-08

Antoniu Miclaus (antoniu.miclaus@analog.com)は、アナログ・デバイ セズのシステム・アプリケーション・エンジニアです。アカデミック・プ ログラムや、Circuits from the Lab®向けの組み込みソフトウェア、QAプ ロセス・マネジメントなどに携わっています。2017年2月から、ルーマニ アのクルジュナポカで勤務しています。

現在、バベシュボヨイ大学においてソフトウェア・エンジニアリングに関 する修士課程にも取り組んでいます。また、クルジュナポカ技術大学で電 子工学と通信工学の学士号を取得しています。



Antoniu Miclaus

この著者が執筆した 他の技術文書

StudentZone — 2018年8月 「ADALM1000」で、 SMUの基本を学ぶ — トピック8:LC並列回路の 共振

Analog Dialogue 52-08