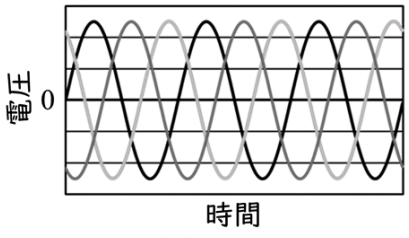
教育実践報告

安価な三相交流回路実験プログラムの作成

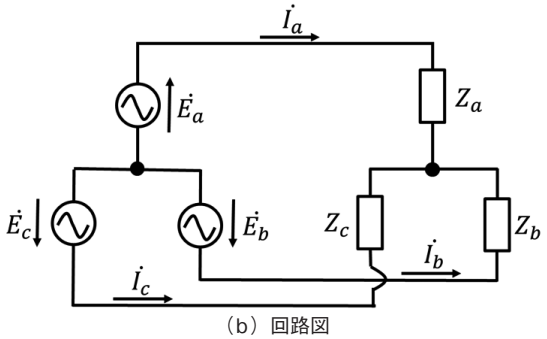
村上 祐一　村本 裕二　山中 三四郎
名城大学理工学部電気電子工学科

1. はじめに

三相交流（図1(a)）は，独立した三つの交流電圧で構成され，それぞれが120°（2π/3 rad）の位相差を有しながら，同一の周波数で変化する[1-2]。単相交流（図2(a)）では，瞬時電力が周期的に変動し，電圧および電流が零となる瞬間において電力も零となる。一方，三相交流回路では位相が120°ずつ異なる三つの交流が同時に存在するため，各相の瞬時電力が相互に補完し合い，全体としての電力は時間的に一定となる。一つの独立した電源では，図2(b）に示すように電源―負荷―電源の回路構成を取るため，2本の電線が必要となる。このため，3つの独立した電源を用いる場合には6本の電線が必要となる。しかしながら，三相交流回路では接続方法を工夫することにより，3本（または4本）の電線で電力を送電することが可能である（図1(b)）。送電線の本数削減は，長距離送電において大幅なコスト削減につながる。また，三相交流で直接駆動できる三相誘導電動機は,回転が滑らかで効率が高く，始動トルクも大きいといった利点を有している。このため，工場におけるモータ・コンプレッサ・ポンプの駆動源や，鉄道車両の電源，発電所からの送電，ビルや各種施設の配電システムなど，幅広い分野で利用されている。このように,三相交流は電気制御，保守，設計などの現場に携わる技術者にとって必須の基礎知識である。そのため，第三種電気主任技術者，第一種・第二種電気工事士，エネルギー管理士などの各種技術系資格試験においても頻出のテーマ

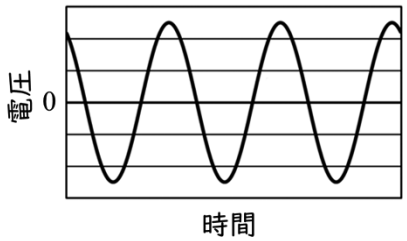


（a）電圧波形

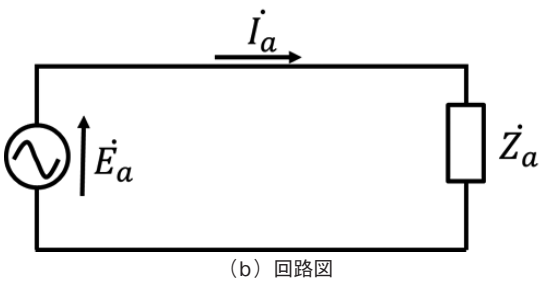


（b）回路図

図1　三相交流



（a）電圧波形



（b）回路図

図2　単相交流

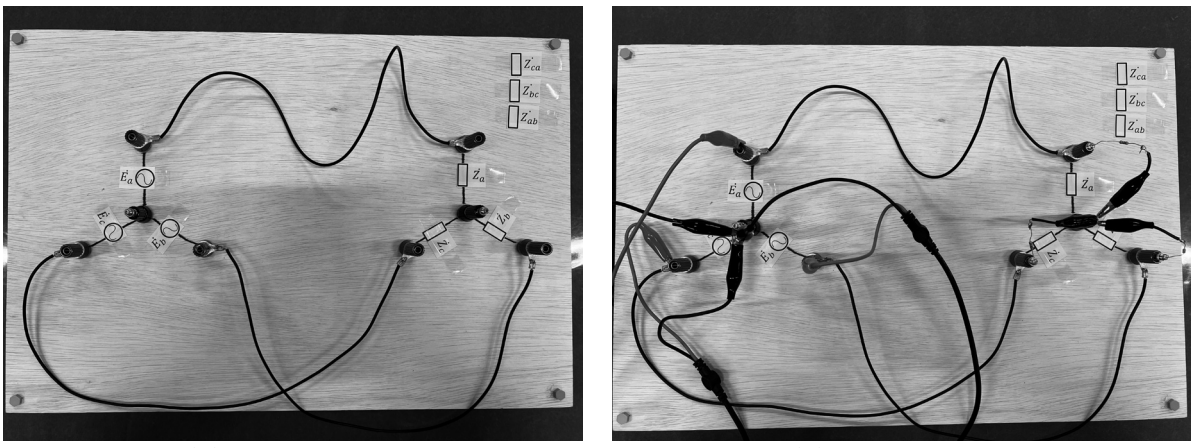
となっている。一方で，単相交流においても交流回路特有の理解困難な要素が存在するのに加え，三相交流では複数相の電圧・電流を同時に取り扱い，それらのベクトル関係や結線方式を総合的に理解する必要があるため，学習難易度が高くなる傾向がある。

名城大学理工学部電気電子工学科では，三相交流回路に関する講義は「電気回路Ⅲ」（2年次後期）において開講されており[(3)]，さらに「電気電子工学実験Ⅲ」（3年次後期）において三相交流を扱う実験が実施されている。しかし，これらの実験で使用される機器は大型であり，商用電圧を扱うため，配線誤りによる短絡事故などの危険性がある。

近年，インターネット上には三相交流に関する多様な教育教材が公開されており，三相交流発生源を自作する手法を紹介した解説動画なども多数見られる。また，教材用として三相誘導電動機モデルが公開・販売されている例も存在するが，これらは一般に数十万円から百万円程度と高価であり，導入には大きなコストを要する。一方で，比較的安価な教材も流通しているものの，三相電源の各相電圧が等しく，かつ位相が120°ずつずれているという理想的な三相交流条件を十分に再現できていない場合が多い。そこで本研究では，市販のファンクションジェネレータを三相交流電源として利用し，「安価」かつ「安全」で，容易に実施可能な三相交流回路実験プログラムの作成を試みた。

2. 三相交流回路実験装置の作製

三相交流源にはファンクションジェネレータ（以下，FG）を使用した。本研究で使用したFGは，Huten社製DDS Function / Arbitrary Waveform Generator（FeelTech FY8300）である。なお，本実験の目的は三相交流波形の理解および測定手法の学習であるため，三相交流を出力できる機能を有する装置であれば，他の機種を用いても差し支えない。筆者らは本装置を Amazon にて約21,000円で購入した。本FGは，3つの出力（1ch，2chおよび3ch）をもつため，1chを相電圧$\dot{E}_a$として設定し，出力条件を周波数60 Hz，電圧最大値2.5 V，位相差0°とした。同様に，2chを相電圧$\dot{E}_b$として周波数60 Hz，電圧最大値2.5 V，位相差120°に設定し，3chを相電圧$\dot{E}_c$として周波数60 Hz，電圧最大値2.5 V，位相差240°とした。図3に，作製したY-Y結線型の実験ボードを示す。本実験ボードでは，左側を電源接続部，右側を負荷接続部とした構成としている。負荷接続部の結線を変更することで，対称三相負荷回路および非対称（不平衡）負荷回路の両条件における電圧・電流測定を行うことが可能である。実験ボード費用としては，ベニヤ板（目的：装置土台）が1,000円程度，みの虫クリップ（目的：回路結線）



（a） 電源・負荷結線前　　（b） 電源・負荷結線後

図3　実験ボード（Y-Y回路）

が2,000円程度である。その他に実験プログラムを実施する場合，FGの他に13,000円程度のテスタ（目的：電圧・電流測定）を使用しており，今回作製した実験プログラムは，計50,000円程度となる。

3. 実験プログラムの提案

3.1 平衡負荷Y-Y回路

図4に平衡負荷Y-Y回路を示す。負荷インピーダンスは，$|\dot{Z}|=|\dot{Z}_a|=|\dot{Z}_b|=|\dot{Z}_c|$=10 kΩとした。相電圧（$|\dot{E}_a|$，$|\dot{E}_b|$，$|\dot{E}_c|$），線間電圧（$|\dot{E}_{ab}|$，$|\dot{E}_{bc}|$，$|\dot{E}_{ca}|$），線電流（$|\dot{I}_a|$，$|\dot{I}_b|$，$|\dot{I}_c|$）の大きさをテスタよりそれぞれ測定した。また，回路図に基づき各電圧，電流を理論的に計算した。FG出力電圧を最大値2.5 Vとして，それを三相電源として使用した。その実効値は$2.5\div\sqrt{2}\cong$1.77 Vとなる。このとき，線間電圧は$\sqrt{3}\times$相電圧≅3.07 V，線電流は$\dot{V}_a\div\dot{Z}_a$=177 μAと計算される。これらの計算結果および測定結果を表1に示す。測定結果は理論値とほぼ一致しており，良好な一致が確認された。

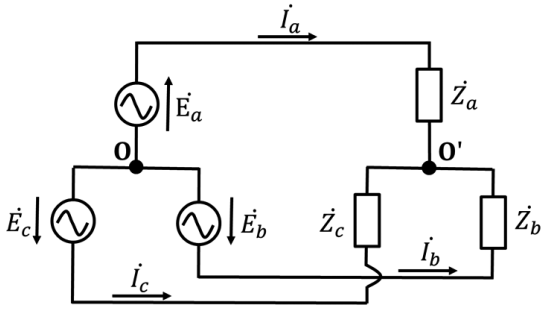


図4　平衡負荷Y-Y回路

表1　平衡負荷Y-Y回路の測定値と理論値

		測定値	理論値	相対誤差[%]
相電圧［V］	$\|\dot{E}_a\|$	1.75	1.77	0.848
	$\|\dot{E}_b\|$	1.74	1.77	1.357
	$\|\dot{E}_c\|$	1.76	1.77	0.679
線間電圧［V］	$\|\dot{E}_{ab}\|$	3.02	3.07	1.241
	$\|\dot{E}_{bc}\|$	3.03	3.07	1.176
	$\|\dot{E}_{ca}\|$	3.03	3.07	1.176
線電流［μA］	$\|\dot{I}_a\|$	176	177	0.679
	$\|\dot{I}_b\|$	176	177	0.679
	$\|\dot{I}_c\|$	175	177	0.962

3.2 平衡負荷Y-Δ回路

図5に平衡負荷Y-Δ回路を示す。負荷インピーダンスは，$|\dot{Z}|=|\dot{Z}_{ab}|=|\dot{Z}_{bc}|=|\dot{Z}_{ca}|$=10 kΩとした。相電圧（$|\dot{E}_a|$，$|\dot{E}_b|$，$|\dot{E}_c|$），線間電圧（$|\dot{E}_{ab}|$，$|\dot{E}_{bc}|$，$|\dot{E}_{ca}|$），線電流（$|\dot{I}_a|$，$|\dot{I}_b|$，$|\dot{I}_c|$），負荷電流（$|\dot{I}_{ab}|$，$|\dot{I}_{bc}|$，$|\dot{I}_{ca}|$）の大きさをそれぞれ測定した。電源は3.1節と同様のため，各相電圧の実効値=1.77 Vとなる。また，線間電圧は$\sqrt{3}\times$相電圧=3.07 V，負荷電流は$\frac{\dot{V}_a}{\dot{Z}_a}=\frac{3.07}{10000}$=307 μAであり，線電流は，$\sqrt{3}\times$負荷電流=531 μAと計算される。これらの計算結果および測定結果を表2に示す。測定結果は理論値とほぼ一致しており，良好な一致が確認された。

3.3 不平衡負荷Y-Y回路

3.3.1 中性線が存在しない場合

次に不平衡負荷におけるY-Y回路の測定を実施した。図4の回路において，負荷インピーダンスを，$\dot{Z}_a$=5 kΩ，$\dot{Z}_b$=10 kΩ，$\dot{Z}_c$=10 kΩとして，不平衡負荷Y型回路を作製した。相電圧（$\dot{E}a$，$\dot{E}_b$，$\dot{E}_c$），中性点間電圧（$\dot{E}_o$），線間電圧（$\dot{E}_{ab}$，$\dot{E}_{bc}$，$\dot{E}_{ca}$），線電流（$\dot{I}_a$，$\dot{I}_b$，$\dot{I}_c$，$\dot{I}_o$）をそれぞれテスタにより測定した。

回路図に基づき各電圧および電流を理論的に計算した。各相電流は以下の式により求められる。

$$\dot{I}_a=\frac{\dot{E}_a}{\dot{Z}_a}=\frac{1.77\angle 0^\circ}{5000}=354\ \mu\mathrm{A}$$

$$|\dot{I}_a|=354\ \mu\mathrm{A}$$

$$\dot{I}_b=\frac{\dot{E}_b}{\dot{Z}_b}=\frac{1.77\angle -120^\circ}{10000}=-88.5-j153\ \mu\mathrm{A}$$

$$|\dot{I}_b|=176\ \mu\mathrm{A}$$

$$\dot{I}_c=\frac{\dot{E}_c}{\dot{Z}_c}=\frac{1.77\angle -240^\circ}{10000}=-88.5+j153\ \mu\mathrm{A}$$

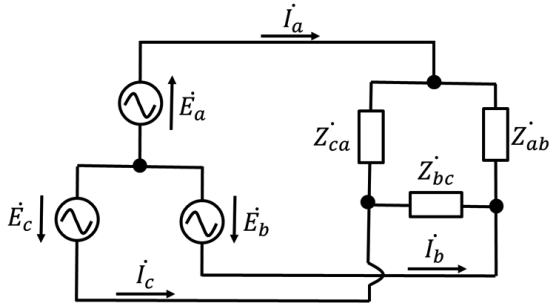


図5　平衡負荷Y-△回路

表2　平衡負荷Y-△回路の測定値と理論値

		測定値	理論値	相対誤差[%]
相電圧[V]	$\lvert\dot{E}_a\rvert$	1.74	1.77	1.808
	$\lvert\dot{E}_b\rvert$	1.74	1.77	1.751
	$\lvert\dot{E}_c\rvert$	1.74	1.77	1.638
線間電圧[V]	$\lvert\dot{E}_{ab}\rvert$	2.99	3.07	2.541
	$\lvert\dot{E}_{bc}\rvert$	2.99	3.07	2.476
	$\lvert\dot{E}_{ca}\rvert$	3.00	3.07	2.443
線電流[μA]	$\lvert\dot{I}_a\rvert$	514	531	3.145
	$\lvert\dot{I}_b\rvert$	516	531	2.844
	$\lvert\dot{I}_c\rvert$	514	531	3.126
負荷電流[μA]	$\lvert\dot{I}_{ab}\rvert$	300	307	2.280
	$\lvert\dot{I}_{bc}\rvert$	300	307	2.182
	$\lvert\dot{I}_{ca}\rvert$	298	307	2.834

$\lvert\dot{I}_c\rvert$=176 μA

図4の回路において，中性点O'に流れ込む電流の総和（$\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c$）は177 μAとなる。キルヒホッフの第一法則（電流則：回路中の任意の一つの接合点に流入する電流の代数和は0である）により，中性点OとO'間には電位差が生じることがわかる。中性線が存在しない場合の中性点間電圧$\dot{E}_o$は，次式で求められる。

$$\dot{E}_o=\frac{\dfrac{\dot{V}_a}{\dot{Z}_a}+\dfrac{\dot{V}_b}{\dot{Z}_b}+\dfrac{\dot{V}_c}{\dot{Z}_c}}{\dfrac{1}{\dot{Z}_a}+\dfrac{1}{\dot{Z}_b}+\dfrac{1}{\dot{Z}_c}}$$

これに数値を代入すると，$\dot{E}_o$=0.44 Vとなる。この中性点間の電位を考慮すると，各相の負荷に生じる電位差は次のようになる。

$\dot{E}_a-\dot{E}_o$=1.34 V

$\lvert\dot{E}_a-\dot{E}_o\rvert$=1.34 V

$\dot{E}_b-\dot{E}_o=-1.32+j1.53$ V

$\lvert\dot{E}_b-\dot{E}_o\rvert$ = 2.02 V

$\dot{E}_c-\dot{E}_o=-1.32+j1.53$ V

$\lvert\dot{E}_c-\dot{E}_o\rvert$ = 2.02 V

この電位差から，中性点間電圧を考慮した各相電流は以下のようになる。

$$\dot{I}_a=\frac{\dot{E}_a-\dot{E}_o}{\dot{Z}_a}=265\ \mu\text{A}$$

$\lvert\dot{I}_a\rvert$=265 μA

$$\dot{I}_b=\frac{\dot{E}_b-\dot{E}_o}{\dot{Z}_b}=-133-j153\ \mu\text{A}$$

$\lvert\dot{I}_b\rvert$=203 μA

$$\dot{I}_c=\frac{\dot{E}_c-\dot{E}_o}{\dot{Z}_c}=-133+j153\ \mu\text{A}$$

$\lvert\dot{I}_c\rvert$=203 μA

これらの計算結果および測定結果を表3に示す。測定結果は理論値とほぼ一致しており，良好な一致が確認された。

表3　不平衡負荷Y-Y回路（中性線が存在しない場合）の測定値と理論値

		測定値	理論値	相対誤差[%]
中性点間電圧[V]	$\lvert\dot{E}_o\rvert$	0.45	0.44	2.273
各相負荷にかかる電圧[V]	$\lvert\dot{E}_a-\dot{E}_o\rvert$	1.31	1.34	2.239
	$\lvert\dot{E}_b-\dot{E}_o\rvert$	1.99	2.02	1.485
	$\lvert\dot{E}_c-\dot{E}_o\rvert$	2.01	2.02	0.495
線電流[μA]	$\lvert\dot{I}_a\rvert$	261	265	1.509
	$\lvert\dot{I}_b\rvert$	200	203	1.478
	$\lvert\dot{I}_c\rvert$	200	203	1.478

3.3.2　中性線が存在する場合

図6に示す中性線が存在する不平衡負荷Y-Y回路では，負荷インピーダンスの値を3.3.1節と同様とすると，中性線電流は$\dot{I}_0=\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c$=177 μAである。テスタの電流計モードが理想的な状態（内部抵抗が0 Ω）であると仮定すると，この中性線をテスタで構成した場合，測定電流は$\dot{I}_o$=170 μAとなった（相対誤差：4 %）。

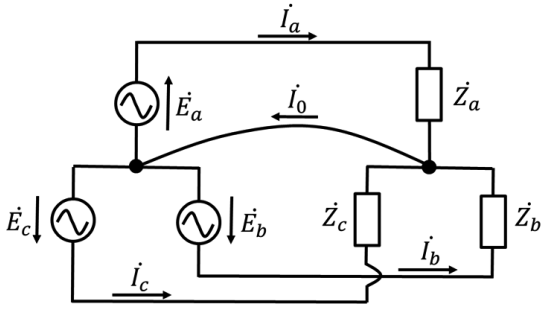


図6　中性線が存在する不平衡負荷Y-Y回路

3.3.3　中性線に負荷が存在する場合

図7に示す中性線に負荷が存在する不平衡負荷Y-Y回路においても，負荷インピーダンスの値を3.3.1節と同様とした場合，以下の通り各電圧および電流を計算することができる。また，中性線上の負荷$\dot{Z}_o$=1 kΩとした。

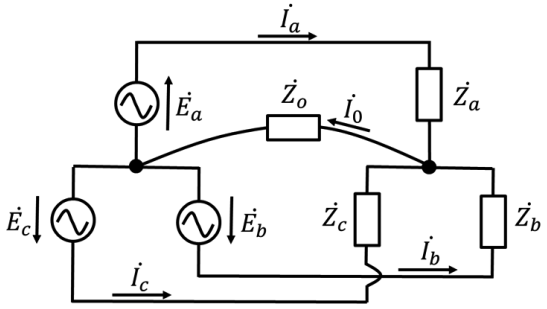


図7　中性線に負荷が存在する不平衡負荷Y-Y回路

中性点間電圧は次のように計算することができ，0.13 Vとなる。

$$\dot{E}_o=\frac{\frac{\dot{V}_a}{\dot{Z}_a}+\frac{\dot{V}_b}{\dot{Z}_b}+\frac{\dot{V}_c}{\dot{Z}_c}}{\frac{1}{\dot{Z}_a}+\frac{1}{\dot{Z}_b}+\frac{1}{\dot{Z}_c}+\frac{1}{\dot{Z}_o}}$$

この中性点間電圧を考慮した各相負荷に生じる電位差は以下のようになる。

$\dot{E}_a-\dot{E}_o$=1.64 V

$|\dot{E}_a-\dot{E}_o|$=1.64 V

$\dot{E}_b-\dot{E}_o=-1.01-j1.53$ V

$|\dot{E}_b-\dot{E}_o|$= 1.83 V

$\dot{E}_c-\dot{E}_o=-1.01+j1.53$ V

$|\dot{E}_c-\dot{E}_o|$= 1.83 V

この電位差から，各相電流は次のように計算される。

$$\dot{I}_a=\frac{\dot{E}_a-\dot{E}_o}{\dot{Z}_a}=328\ \mu\text{A}$$

$|\dot{I}_a|$=328 μA

$$\dot{I}_b=\frac{\dot{E}_b-\dot{E}_o}{\dot{Z}_b}=-101-j153\ \mu\text{A}$$

$|\dot{I}_b|$=183 μA

$$\dot{I}_c=\frac{\dot{E}_c-\dot{E}_o}{\dot{Z}_c}=-101+j153\ \mu\text{A}$$

$|\dot{I}_c|$=183 μA

中性線上に存在する負荷Z_oに流れる電流$|\dot{I}_o|$は，$\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c$で求めることができ，126 μAと計算される。また，$\frac{\dot{E}_o}{\dot{Z}_o}$からは130 μAと値が算出され，理論上，$\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c$と同じ値になる。これらの計算結果および測定結果を表4に示す。測定結果は理論値とほぼ一致しており，良好な一致が確認された。

表4　平衡負荷Y-Y回路（中性線に負荷が存在する場合）の測定値と理論値

		測定値	理論値	相対誤差[%]
中性点間電圧[V]	$\|\dot{E}_o\|$	0.14	0.13	9.524
各相負荷にかかる電圧[V]	$\|\dot{E}_a-\dot{E}_o\|$	1.62	1.64	1.399
	$\|\dot{E}_b-\dot{E}_o\|$	1.81	1.83	1.202
	$\|\dot{E}_c-\dot{E}_o\|$	1.82	1.83	0.383
線電流[μA]	$\|\dot{I}_a\|$	322	328	1.921
	$\|\dot{I}_b\|$	182	183	0.656
	$\|\dot{I}_c\|$	181	183	1.038
中性線電流[μA]	$\|\dot{I}_o\|$	123	126	2.222

3.4　プログラム案

3.1～3.3節にて，実験教材の実測と理論値の比較を実施して，良く一致していることが確認できた。実際の座学講義「電気回路3」では，この理論計算の部分が多い。学生自ら回路を作製することによって，回路作製の練習にもあることが期待される。また，従来の三相電源を用いた教材では，配線の誤りにより過電流が発生し，電線の焼損などの危険を伴う場合があった。一方，本教材キットでは低電圧・低電流で動作する構成を採用しているため，配線ミスが生じた場合であっても電線の焼損に至ることはなく，安全に実験を実施することが可能である。さらに，特別な安全対策や熟練を要する操作を必要とせず，初学者であっても容易に実施可能な実験環境を提供できる。今回作製したプロブラムは，電気回路講義内にて組み込むことを想定しており，対称三相交流回路の講義が終了した際に3.1の平衡負荷Y-Y回路および3.2の平衡負荷Y-Δ回路の実験を，非対称三相交流回路の講義が終了した際に3.3の不平衡負荷Y-Y回路の実験をそれぞれ実施することによって，座学講義で学んだ理論を実験回路作成や測定を通して理解を深めることが期待される。講義内では，表5や表6のようなタイムスケジュールにて教材実験を進めることを考えている。

表5　本教材のタイムスケジュール
平衡負荷回路の場合

時間帯		内容
13：10 ～13：20	実験概要説明	測定する回路の説明。講義内容の復習
13：20 ～13：50	平衡負荷Y-Y回路実験	実験回路の結線および測定。理論値の計算の比較
13：50 ～14：20	平衡負荷Y-Δ回路実験	実験回路の結線および測定。理論値の計算の比較
14：20 ～14：40	総括	測定値や誤差などの数値確認。まとめ

表6　本教材のタイムスケジュール
不平衡負荷回路の場合

時間帯		内容
13：10 ～13：20	実験概要説明	測定する回路の説明。講義内容の復習
13：20 ～14：20	不平衡負荷Y-Y回路実験	実験回路の結線および測定。理論値の計算の比較
14：20 ～14：40	総括	測定値や誤差などの数値確認。まとめ

4.　まとめ

今回は，「安価」かつ「安全」な三相交流回路実験プログラムの作製を試みた。実験キットは約5万円程度で作製することができた。作製したキットでは，Y-Y型およびY-Δ型対称三相交流回路および非対称（不平衡負荷）のY-Y三相交流回路の実測値と理論計算値が概ね一致し，本プログラムが教育用教材として十分に活用できる可能性が示された。

参考文献

(1)．清水教之，村本裕二，中條渉，伊藤昌文，飯岡大輔：基礎からの電気回路論，コロナ社
(2)．佐治學：インターユニバーシティ 電気回路A（改訂2版），オーム社
(3)．名城大学理工学部電気電子工学科：電気回路3　講義資料，2024年