

三相交流電圧発生器の製作

Making of three-phase AC voltage source device

Author : 志多 友史 (Yuji Shida)

Date : 2020/11/17

Keywords : RC 移相発振回路(RC phase shift oscillation circuit), 発振回路(oscillation circuit), 交流回路(Alternating Current circuit), 三相交流電動機(three-phase AC motor), 可変電圧可変周波数制御(VVVF: Variable Voltage Variable Frequency control), 電子工作(electronic work)

Abstract:=====

本稿では、三相交流電動機の制御のための装置を製作するため、まず基本信号源となる「三相交流電圧発生器」の設計・製作に関わる内容について整理する。この「三相交流電圧発生器」はRC 移相発振回路を基礎として、オペアンプを用いて各相電圧の出力を行う事ができる電子回路として製作する。

In this report, I arranged information about the design and the making about "three-phase AC voltage source device" as a basic signal source device to control a three-phase AC motor. This "three-phase AC voltage source device" is based on RC phase shift oscillation circuit with operational amplifiers, and outputs each phase voltages.

=====

1. 序論(Introduction)

三相交流電動機は色々な分野、エアコンや電車の動力源等として身近な機器・設備に使用されている。これらの電動機の制御には主に可変電圧可変周波数制御、通称VVVF制御が用いられている。電気電子工学科出身の自分としては一度、この制御装置を作ってみたいと思い、その第一段階として三相交流電圧発生器の製作を行った。

2. 原理(Principle)

本章では一般的なRC移相発振回路の概要を説明し、その後、今回製作する回路の概要について記す。

2. 1. 一般的なRC移相発振回路

色々な書籍・ウェブページで紹介されているRC移相発振回路について簡単に整理する。まず、以下のようなRC移相発振回路を考える。ここで図中の"-G"は増幅率がGの反転増幅器で入力電流(×印の部分)を通過する電流はゼロであるものとする。

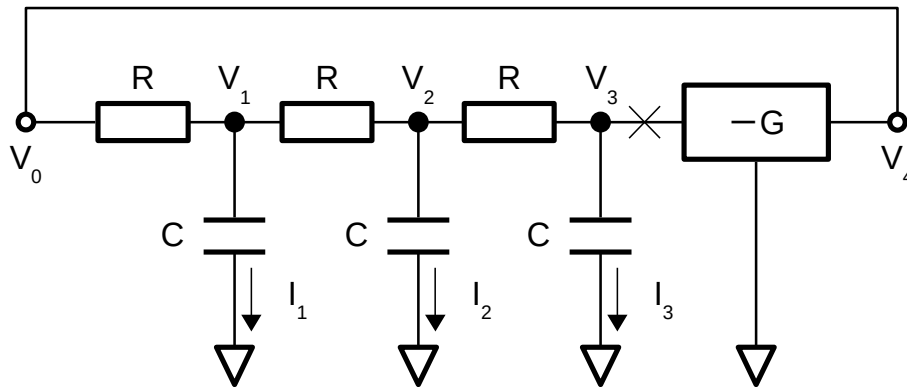


図2. 1 一般的なRC移相発振回路

この回路について電圧・電流の方程式を立てると以下ようになる。

$$\dot{V}_0 = R(\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3) + \dot{V}_1, \quad \dot{V}_1 = R(\dot{I}_2 + \dot{I}_3) + \dot{V}_2, \quad \dot{V}_2 = R\dot{I}_3 + \dot{V}_3, \quad \dot{V}_3 = -\dot{V}_4/G$$

$$\dot{I}_1 = j\omega C\dot{V}_1, \quad \dot{I}_2 = j\omega C\dot{V}_2, \quad \dot{I}_3 = j\omega C\dot{V}_3$$

ここで簡単のため、コンデンサのアドミタンスを $\dot{Y} = j\omega C$ と定義する。

3番目のコンデンサに流れる電流はアドミタンスを用いると $\dot{I}_3 = \dot{Y}\dot{V}_3$ と表される。これを用いて他の電圧・電流を \dot{V}_3 を用いて表すと以下ようになる。

$$\dot{V}_2 = R\dot{I}_3 + \dot{V}_3 = R\dot{Y}\dot{V}_3 + \dot{V}_3 = (1 + R\dot{Y})\dot{V}_3$$

$$\dot{I}_2 = \dot{Y}\dot{V}_2 = \dot{Y}(1 + R\dot{Y})\dot{V}_3 = (\dot{Y} + R\dot{Y}^2)\dot{V}_3$$

$$\dot{V}_1 = R(\dot{I}_2 + \dot{I}_3) + \dot{V}_2 = R(\dot{Y} + R\dot{Y}^2)\dot{V}_3 + R\dot{Y}\dot{V}_3 + (1 + R\dot{Y})\dot{V}_3 = (1 + 3R\dot{Y} + R^2\dot{Y}^2)\dot{V}_3$$

$$\dot{I}_1 = \dot{Y}\dot{V}_1 = \dot{Y}(1 + 3R\dot{Y} + R^2\dot{Y}^2)\dot{V}_3 = (\dot{Y} + 3R\dot{Y}^2 + R^2\dot{Y}^3)\dot{V}_3$$

$$\dot{V}_0 = R(\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3) + \dot{V}_1 = R(\dot{Y} + 3R\dot{Y}^2 + R^2\dot{Y}^3)\dot{V}_3 + R(\dot{Y} + R\dot{Y}^2)\dot{V}_3 + R\dot{Y}\dot{V}_3 + (1 + 3R\dot{Y} + R^2\dot{Y}^2)\dot{V}_3$$

$$= (1 + 6R\dot{Y} + 5R^2\dot{Y}^2 + R^3\dot{Y}^3)\dot{V}_3$$

\dot{V}_0 についてアドミタンスを用いず式を整理すると次式のように表される。

$$\dot{V}_0 = \left\{ (1 - 5\omega^2 C^2 R^2) + j\omega CR(6 - \omega^2 C^2 R^2) \right\} \dot{V}_3$$

発振回路の発振条件の一つとして \dot{V}_0 と \dot{V}_3 が同位相である必要がある。即ち右辺括弧内の虚数成分がゼロである必要があり、この時の角周波数は $\omega = \sqrt{6/CR}$ を満たす必要がある。加えてこの時の括弧内の実数部は-29となる。つまり図2. 1の回路が発振回路として機能している時 $\dot{V}_0 = \dot{V}_4 = -29\dot{V}_3$ の関係が成り立っており、発振回路のもう一つの発振条件より $G \geq 29$ が導かれる。

2. 2. 本稿で製作する RC 移相発振回路

本稿で製作する RC 移相発振回路の基本回路は下図に示す通りである。この回路では振幅がほぼ等しい正弦波電圧が取り出せるよう各位相毎(60[deg]毎)に電圧を増幅している。また、三相交流電圧の R 相(0[deg]), S 相(-120[deg]), T 相(-240[deg])の他にも 60[deg]位相がずれた電圧が取り出せるよう出力部を追加している。発振部分は、3 段の正転増幅回路と 1 段の反転増幅回路で構成されており、正転増幅回路の入力インピーダンスが非常に大きいので、抵抗 R とコンデンサ C の接続点から電流をほとんど分岐させる事無く電圧波形を取出し、増幅する事が可能となっている。

前節で紹介した、一般的な RC 移相発振回路では電流の分岐により発振周波数の計算が煩雑となったが、この回路では分岐電流は原理上存在せず、周波数の計算が容易になる。

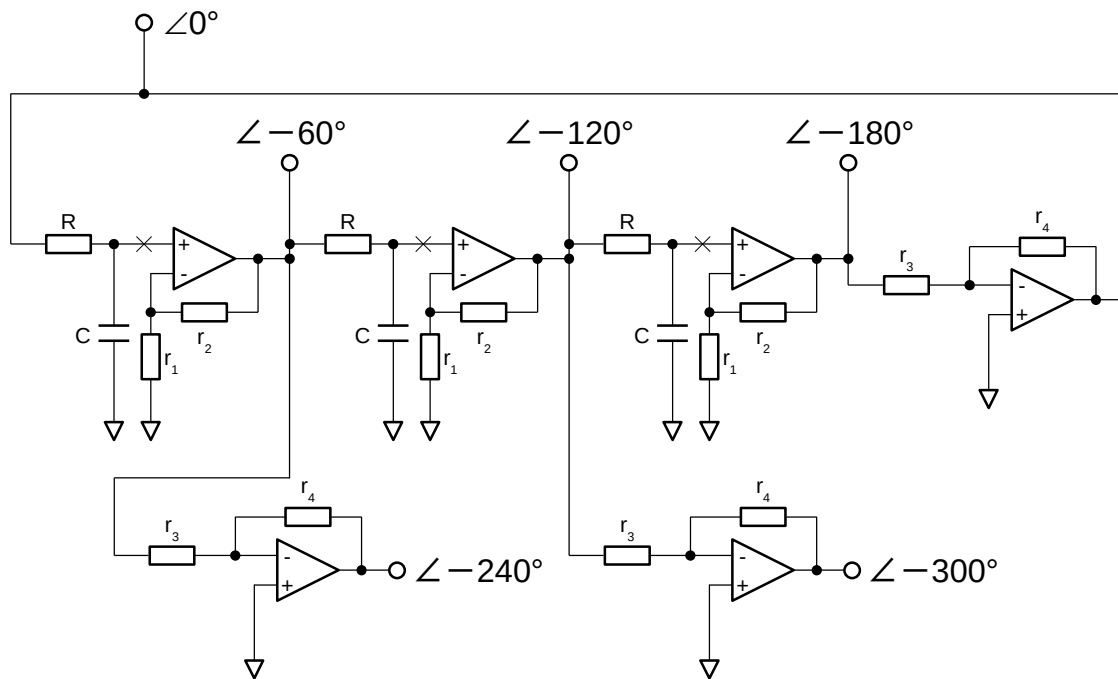


図 2. 2 製作する RC 移相発振回路の基本回路

発振回路として成立する場合、1 段の位相のずれは 60[deg]であり、下式から $\sin^{-1} \frac{-\omega CR}{\sqrt{1+\omega^2 C^2 R^2}}$ 及び $\tan^{-1} -\omega CR$ が -60[deg]となるので、角周波数は $\omega = \sqrt{3}/CR$ となる。なお、下式において \dot{V}_o は接地に対するコンデンサ C の電圧、 \dot{V}_i は抵抗 R への入力電圧である。

$$\dot{V}_o = \frac{1/j\omega C}{R+1/j\omega C} \dot{V}_i = \frac{1}{1+j\omega CR} \dot{V}_i = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 C^2 R^2}} \frac{1-j\omega CR}{\sqrt{1+\omega^2 C^2 R^2}} \dot{V}_i$$

また、上式より \dot{V}_o は \dot{V}_i に対して振幅が $\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 C^2 R^2}}$ ($=\frac{1}{2}$) 倍になるので、正転増幅回路で増幅する必要がある。

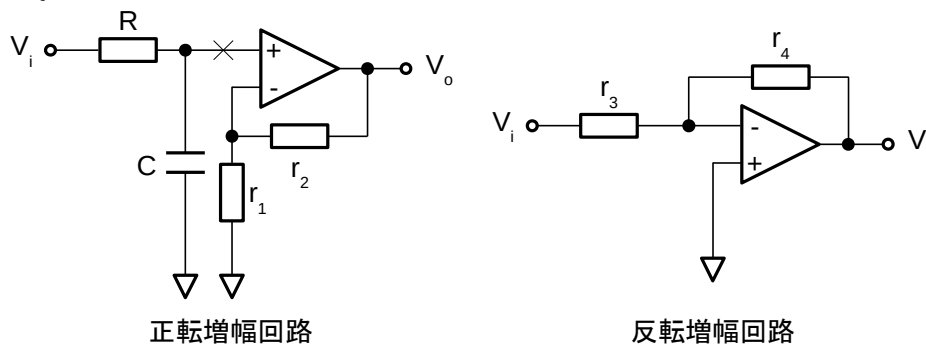


図 2. 3 正転・反転増幅回路

正転増幅回路の増幅率は $1+r_2/r_1$ なので、 $r_1=r_2$ となる。また、反転増幅回路でも単に位相を 180[deg]ずらす(反転させる)だけなので、増幅率 $-r_4/r_3$ より、 $r_3=r_4$ となる。

3. 製作(Manufacture)

前章で示した原理を基に電子回路を具体的に作り上げる。

3. 1. 主な仕様

本電子回路を製作する上で軸となる事柄を以下に示す。

- ・ 5~500[Hz]の三相交流電圧を発生・出力する。
- ・ 三相電圧波形以外にも 60[deg]ずつ位相がずれた電圧波形も出力できる。
- ・ 両電源($\pm 12[V]$ または $\pm 15[V]$)で動作する。

3. 2. 部品リスト

製作に際し、使用した電子部品の一覧を表 3. 1 に示す。なお、正転増幅回路の増幅率調整用に 4.7[k Ω]の半固定抵抗を用いているが、これは偶々手元の部品を用いたままで、2.0[k Ω]でも代用可能である。また、用いたオペアンプは片電源でも使用可能であるが、後段の回路(三角波との比較回路)の事を勘案し、両電源で使用可能な回路構成としている。

表 3. 1 部品リスト

番号	部品名	諸元	数量	備考
1	抵抗	20[k Ω]	2	電源用
2	〃	1.0[k Ω]	18	増幅回路用
3	〃	510[Ω]	9	短絡防止用
4	半固定抵抗	4.7[k Ω]	3	正転増幅回路用※2.0[k Ω]でも問題無
5	〃	2.0[k Ω]	3	反転増幅回路用
6	スライド可変抵抗	100[k Ω]	3	RC 移相発振回路用
7	セラミックコンデンサ	0.1[μF]	5	電源用、パスコン
8	フィルムコンデンサ	1.0[μF]	3	RC 移相発振回路用
9	電解コンデンサ	10[μF]	2	電源用
10	オペアンプ(2回路入) 2119D JRC 1002B		3	増幅回路用
11	IC ソケット(8ピン)		3	オペアンプ用
12	ターミナルブロック(3連)		9	電源・入出力用端子として使用
13	六角スペーサー(20[mm])		4	
14	片面ユニバーサル基板 (155×114[mm])		1	増幅回路用として使用
15	〃 (95×72[mm])		1	スライド抵抗用として使用

3. 3. 回路図

製作した回路の回路図を図3. 1～図3. 3に示す。1つの図にまとめると見にくいものとなるので、電源部、増幅回路及びそれらの接続図という形で分けて図示した。

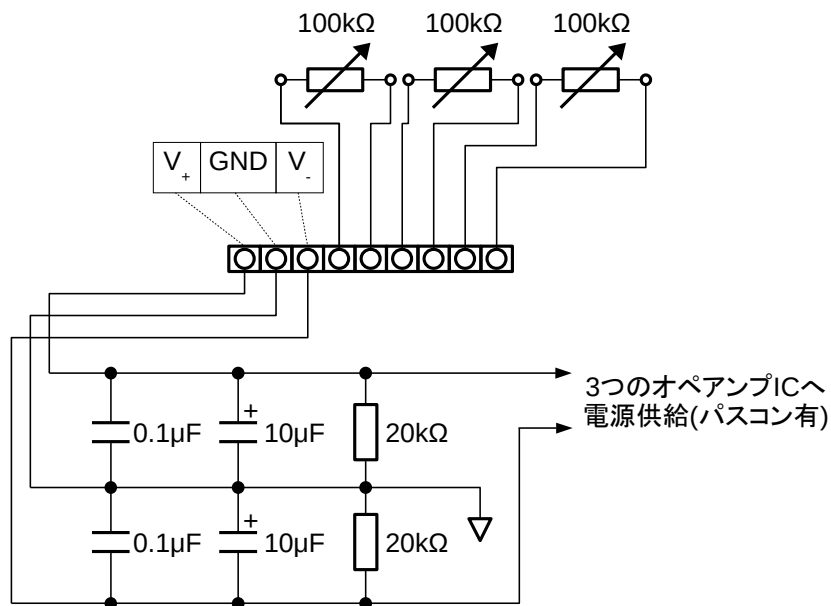


図3. 1 電源周りの回路

電源部はノイズを低減するために、適当なコンデンサを挿入し、各オペアンプについてはそれぞれ近傍にパソコンを接続している。電解コンデンサの耐電圧は25[V]なので、電源電圧が±15[V]であっても特段問題は無い。

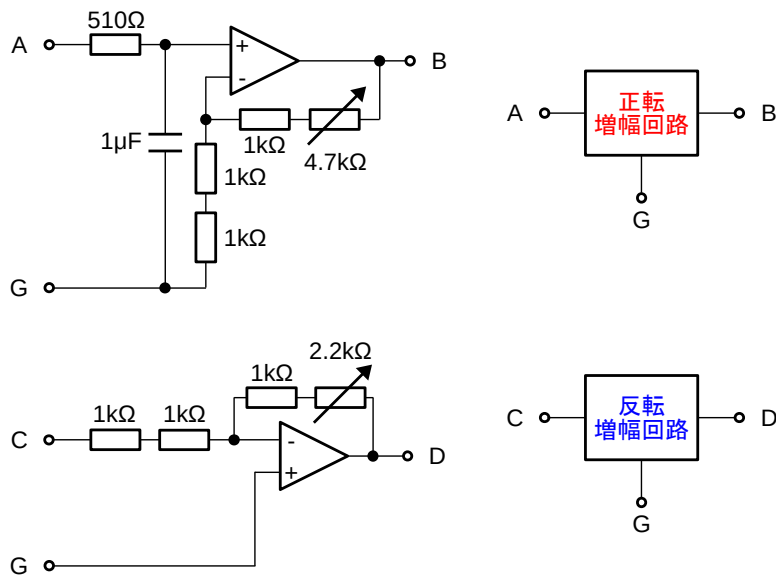


図3. 2 正転・反転増幅回路

上図には製作した正転・反転増幅回路の回路図を示す。図中の正転増幅回路の端子Aにはスライド可変抵抗の一端が接続され、510[Ω]の抵抗と合わせてRC移相発振回路の抵抗成分(R)を構成する。なお、この510[Ω]の抵抗はスライド可変抵抗の抵抗値が0[Ω]となっても一定の抵抗値を担保し、発振回路としての機能を保つために設けている。発振周波数の上限はこの抵抗によって決定されるので、さらに周波数を上げる場合は抵抗値を下げる必要がある。

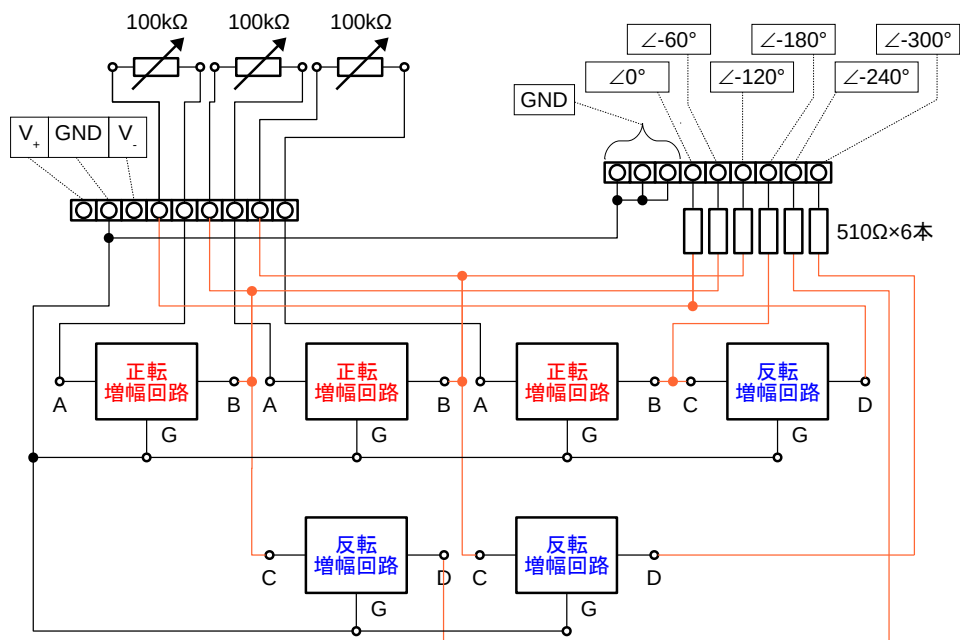


図3. 3 増幅回路の接続と信号入出力に関する配線

図3. 2で示した各増幅回路は上図のように接続され、3つの正転増幅回路で正弦波電圧の位相を60[deg]ずつずらし、-180[deg]になった段階で、反転増幅回路を用いて位相を0[deg]に戻す形となっている。増幅率については、正転増幅回路は約"2"で、反転増幅回路は約"1"である。また、各電圧波形の出力部には510[Ω]の抵抗があるが、これは短絡時の過電流防止とオペアンプの損傷対策のために設けている。

4. 結果(Results)

製作した三相交流電圧発生器の動作結果について記す。

4. 1. 最大周波数での動作結果

スライド可変抵抗の抵抗値を0[Ω]とした時の各相の出力電圧波形を示す。なお、図中の青線の波形は位相0[deg]の電圧波形として共通で表示させている。この場合の角周波数は $\omega = \sqrt{3}/CR$ より3396[rad/s]で、周波数は540.5[Hz]となる。

60[deg]の波形については大方きれいな正弦波となっているが、0[deg], 120[deg], 180[deg]の波形は若干歪が現れており、120[deg]の波形を反転させて出力している300[deg]の波形も同様に歪んでいる。

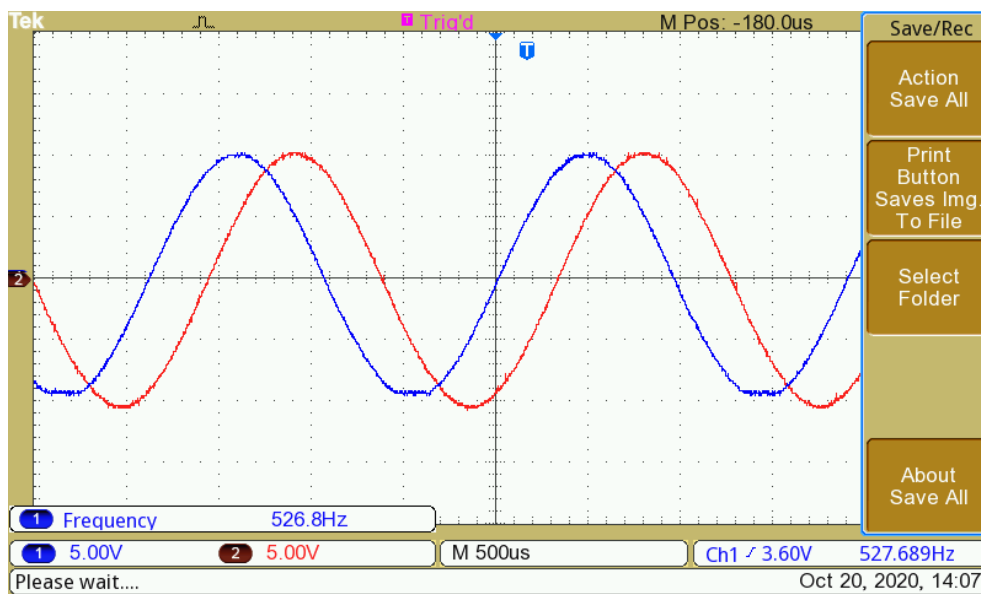


図4. 1 60[deg]遅れの電圧波形(赤線)

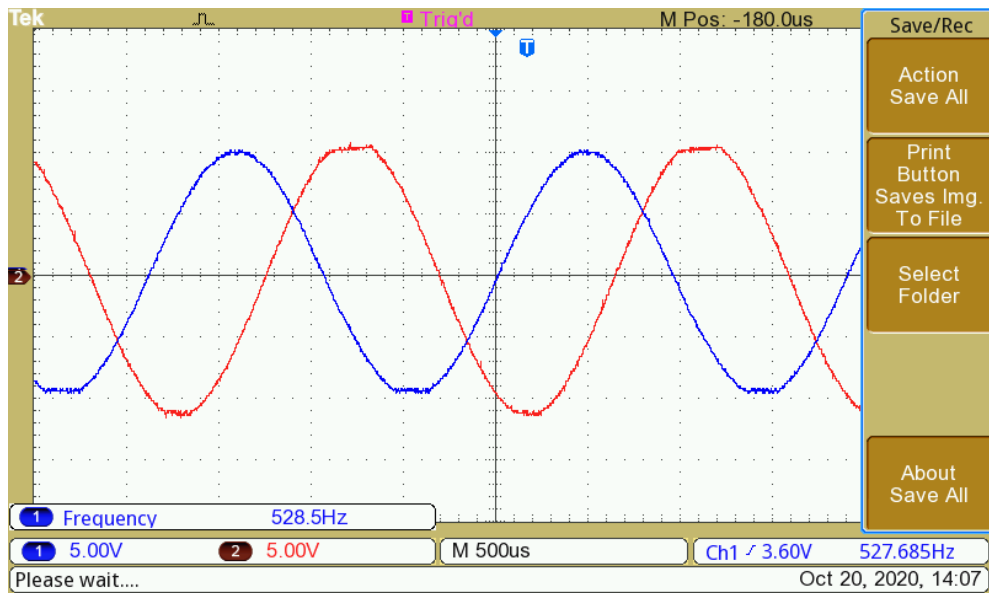


図 4. 2 120[deg]遅れの電圧波形(赤線)

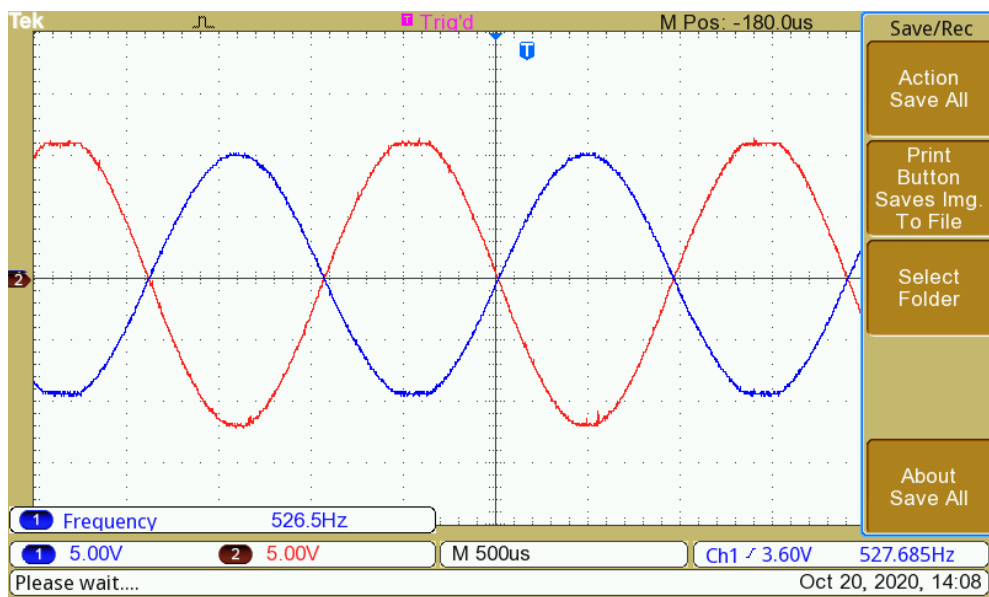


図 4. 3 180[deg]遅れの電圧波形(赤線)

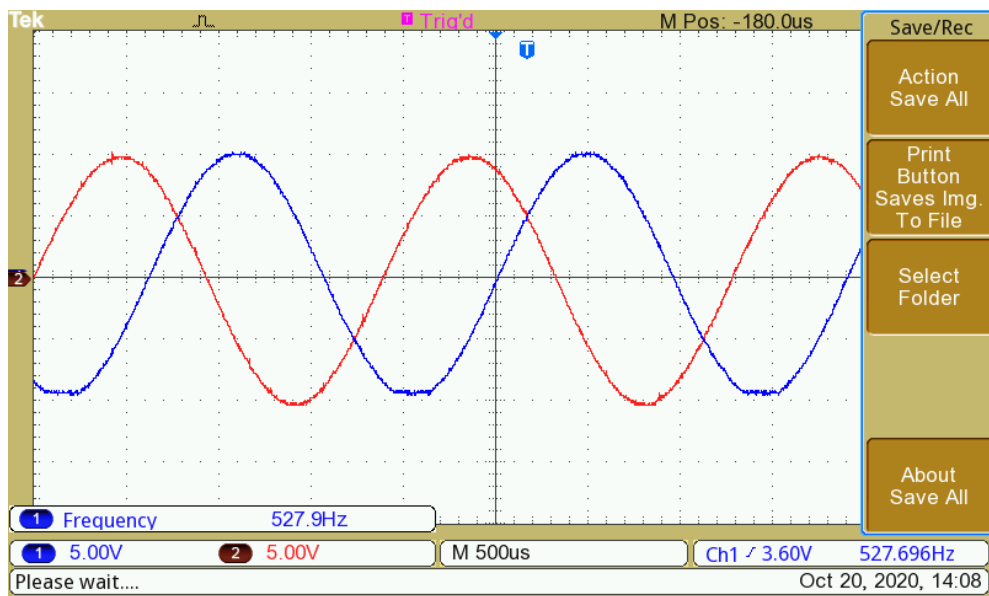


図 4. 4 240[deg]遅れの電圧波形(赤線)

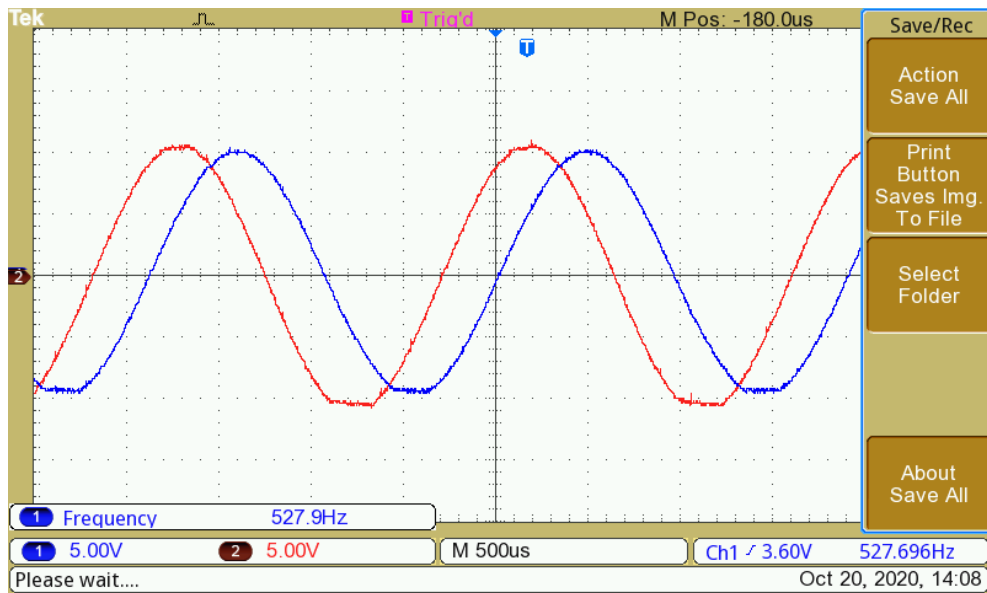


図 4. 5 300[deg]遅れの電圧波形(赤線)

4. 2. 最小周波数での動作結果

スライド可変抵抗の抵抗値を 100[kΩ]とした時の各相の出力電圧波形を示す。なお、図中の青線の波形は位相 0[deg]の電圧波形である。この場合の角周波数は 17.2[rad/s]で、周波数は 2.74[Hz]となる。

この時の電圧波形はいずれの位相でも歪が見られており、発振はするが波形の山と谷の部分で電源電圧に達し、潰れてしまっている事が分かる。増幅率を下げれば歪は小さくなるが、発振周波数(スライド可変抵抗の抵抗値)を変えた場合に発振回路としての動作が不安定になるため、歪は覚悟の上で一定の増幅率を保たなければならなかった。

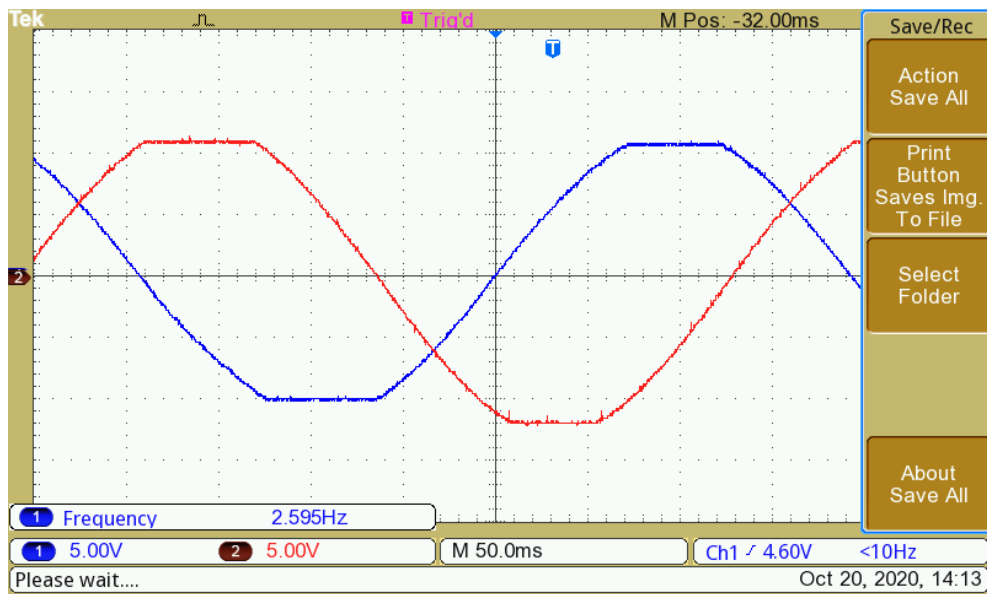


図 4. 6 120[deg]遅れの電圧波形(赤線)

5. 考察(Discussion)

製作した発振回路は一応動作する事が確認できた。しかし、3つのスライド可変抵抗の抵抗値が常に等しくなるように操作するのは中々難しく、少しでも抵抗値が合わないと発振が停止する。ある程度の抵抗値の差を許容できるようオペアンプの増幅率を上げると波形が歪むため、安定した発振を実現するには何某かの工夫が必要となる事を実感した。

また、周波数によっては波形の歪が大きくなり、将来的に三相電動機を制御しようとした場合、このままではFET等のスイッチング部品に大きな問題を引き起こす可能性がある。今後、アナログ的に対処するのかデジタル的に対処するのか良く検討しなければならない事が分かった。

6. 結言(Summary)

もし、今回製作した回路が理想的な性能を有していれば、続けて三角波との比較回路(PWM回路)の設計に取り掛かろうと考えていたが、三相電圧波形の安定化を優先しなければならなくなったので、こちらの検討に取り掛かる事とする。

無段階に発振周波数を変更するのではなく、ダイヤルスイッチの切換による発振周波数の段階的な操作でも良いような気もするので、合わせて検討を進める。

7. 文献(References)

- [1] : 電気学会大学講座 基礎電子回路工学 アナログ回路を中心に 松澤昭著 電気学会
- [2] : アナログ電子回路の基礎 藤井信生著 昭晃堂
- [3] : アナログ電子回路演習 基礎からの徹底理解 石橋幸男著 培風館
- [4] : トランジスタ技術 SPECIAL パワー・エレクトロニクス回路の設計 CQ出版社

8. 著者(Author)

氏名：志多 友史 (工学修士)

略歴：

2011年：下位国立大学 工学部電気系学科卒業

2013年：同大学大学院 工学研究科修了

2013年：研究開発機関へ就職

2017年：*****

2020年：*****

興味：物理・数学・コンピュータ・電気電子工作

9. 備考(Notes)

特になし。