

三相変圧器角変位の調整方法

ATP(EMTP)の小さな研究室

高橋賢司 著

当研究室のその他の解説書は下記からアクセスできます。
<http://atp-empt-reserch.o.oo7.jp/>

目次

1	ベクトル群記号 Yd1 で表される角変位を得る接続方法	3
1)	検討対象回路	3
2)	各単相変圧器巻線の誘起電圧	4
3)	ベクトル群記号 Yd1 の一次相電圧と二次相電圧の関係	4
4)	外部線路との接続	5
2	ベクトル群記号 Yd11 で表される角変位を得る接続方法	6
1)	検討対象回路	6
2)	各単相変圧器巻線の誘起電圧	6
3)	ベクトル群記号 Yd11 の一次相電圧と二次相電圧の関係	6
4)	外部線路との接続	7
3.	ベクトル群記号 Dy1 で表される角変位を得る接続方法	8
4.	ベクトル群記号 Dy11 で表される角変位を得る接続方法	11
5.	EMTP による角変位の確認	12
1)	Yd1 用結線方法の角変位の確認	12
1-1)	検討対象回路	12
1-2)	入力データ	13
1-3)	シミュレーション結果	15
2)	Yd11 用結線方法の角変位の確認	16
2-1)	検討対象回路	16
2-2)	入力データ	16
2-3)	Yd11 のシミュレーション結果	17
3)	Dy1 用結線方法の角変位の確認	17
3-1)	検討対象回路	17
3-2)	入力データ	18
3-3)	Dy1 のシミュレーション結果	18
4)	Dy11 用結線方法の角変位の確認	19
4-1)	検討対象回路	19
4-2)	入力データ	19
4-3)	シミュレーション結果	19
6	まとめ	20
	基本次項	20
	星形とデルタ形で構成される三相変圧器の必要な角変位の接続を得る作業	20

序

EMTP で三相変圧器を含んだ回路のシミュレーションをする時、変圧器一次、二次間には Yd1 などのベクトル群記号で表される角変位が存在します。

本稿ではこれらベクトル群記号で表された角変位を実現する変圧器の接続方法について解説しています。

本稿ではベクトル群記号の例として Yd1、Yd11、Dy1、Dy11 を取り上げ、それぞれの角変位を実現する結線方法を説明後、EMTP で所定の角変位が得られていることを検証しています。

なお、三相変圧器は 3 台の単相変圧器から構成されると考え、それぞれの単相変圧器は通常の変圧器と同じく、減極性であるとして説明をしています。

1 ベクトル群記号 Yd1 で表される角変位を得る接続方法

1) 検討対象回路

Fig. 1 のごとく一次高压側は星型接続で三相对称電圧源に接続し、二次側のデルタ接続は未だ接続方法が不明なので開放状態としています。

この状態から考察して行きます。

Yd1 のベクトル群記号なので一次、二次相電圧の大小関係は次のとおりです。

一次側相電圧 > 二次側相電圧

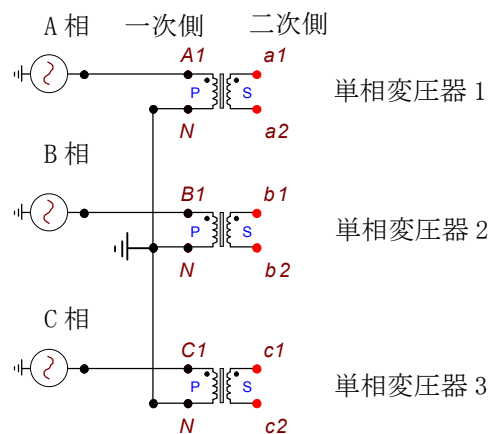


Fig. 1 Yd1 の検討対象回路

2) 各単相変圧器巻線の誘起電圧

時刻 t の瞬時に於いて一次側の巻線に誘起される電圧ベクトルが Fig. 2 の赤で示す星形ベクトルであるとし、するとこの時単相 3 台の変圧器の二次側の各巻線端子間に発生する誘起電圧ベクトルは減極性のため一次巻線誘起電圧と同位相の Fig. 2 の青色ベクトルになります。

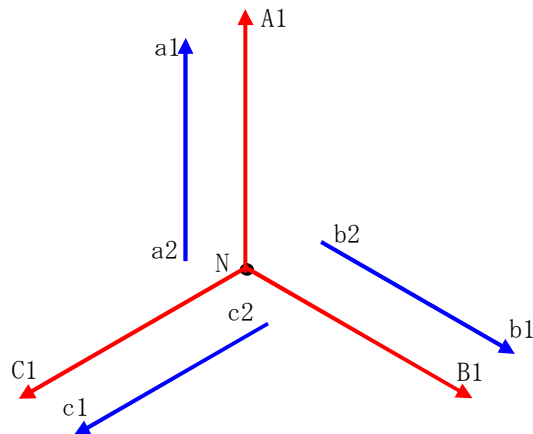


Fig. 2 各単相変圧器巻線の誘起電圧

$a2-a1$ のベクトルは変圧器 1 の $N-A1$ 一次誘起電圧によって $a2-a1$ 端子間の二次巻線に誘起される電圧のベクトルです。

$b2-b1$ のベクトルは変圧器 2 の $N-B1$ 一次誘起電圧によって $b2-b1$ 端子間の二次巻線に誘起される電圧のベクトルです。

$c2-c1$ のベクトルは変圧器 3 の $N-C1$ 一次誘起電圧によって $c2-c1$ 端子間の二次巻線に誘起される電圧のベクトルです。

3) ベクトル群記号 Yd1 の一次相電圧と二次相電圧の関係

基本事項ですが、ベクトル群記号は一次と二次の同じ相の相電圧の大小関係と位相差(角変位)を規定しています。

Yd1 のベクトル群記号の時の一次相電圧、二次相電圧の大小関係と角変位は Fig. 3 のごとくで、一次 A 相電圧は二次 A 相電圧より 30° 進みます。

Yd1 の二次デルタ接続の二次相電圧は Fig. 3 で点線で示している、仮想中性点 N' と二次端子間の電圧ベクトルとなります。

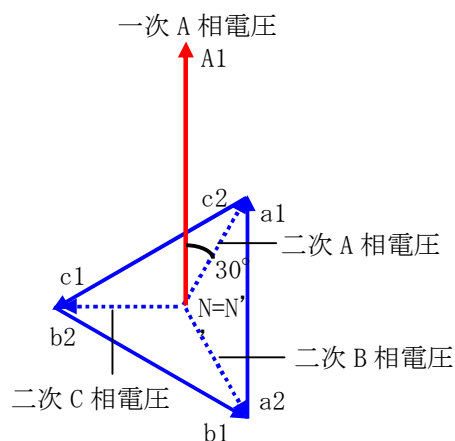


Fig. 3 Yd1 の一次、二次相電圧

Fig. 3 の説明:

デルタ形の青の実線で示したベクトルは単相変圧器の二次巻線の端子間を接続することで得られる三相の線間電圧です。 N' は二次デルタ電圧ベクトルの仮想中性点です。 N は一次星型の中性点です。

二次各相電圧ベクトルは上述のごとく、点線で示したベクトルになります。

Fig. 3 は図を見やすくするため、一次電圧は A 相電圧だけを示し、一次 B, C 相電圧は省略しています。

Yd1 の角変位を得るには Fig. 3 に示す一次、二次の相電圧の位相状態にすれば良く、そのためには、Fig. 2 の各巻線の二次誘起電圧ベクトルを Fig. 3 までそれぞれ平行移動し、次のごとく接続すれば Fig. 3 のデルタ電圧を実現でき、Yd1 の角変位が得られることがわかります。

- a1 端子と c2 端子を接続
- c1 端子と b2 端子を接続
- b1 端子と a2 端子を接続

Fig. 2 の各巻線の二次端子誘起電圧ベクトルを Fig. 3 までそれぞれ平行移動する理由は、今考えている瞬時の一次、二次誘起電圧の位相関係を守るためです。
電圧ベクトルは時間と共に回転しますが、角変位は同一時刻の同じ相の一次、二次電圧ベクトルの位相差で時間に無関係ですから、角変位を考察する時は一次、二次相電圧ベクトルを固定して考えることができます。

4) 外部線路との接続

Fig. 3 より、一次 A 相電圧は A1 端子に表れ、二次 A 相電圧は端子 c2 と a1 の接続点に現れるのでここに外部の一次、二次の A 相線路を接続すればよいことになります。

同様に

B 相一次相電圧は B1 端子に表れ、二次 B 相電圧は端子 a2 と b1 端子の接続点に現れるのでここに外部の B 相線路を接続すればよいことになります。

C 相一次相電圧は C1 端子に表れ、二次 C 相電圧は端子 b2 と c1 端子の接続点に現れるのでここに外部の C 相線路を接続すればよいことになります。

以上より、Fig. 4 に示す Yd1 の角変位を得る接続回路が得られます。

Fig. 5 のベクトル図は 1 の 3) の説明と重複しますが参考までに示しておきます。

(注 Fig. 4 に示す端子記号はシミュレーション時、EMTP の約束ごとに従うため、後述の 5. の 1) 項に示しているごとく変更を加える必要があります。)

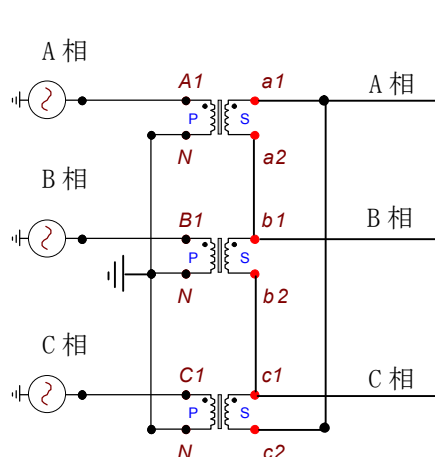


Fig. 4 Yd1 の結線図

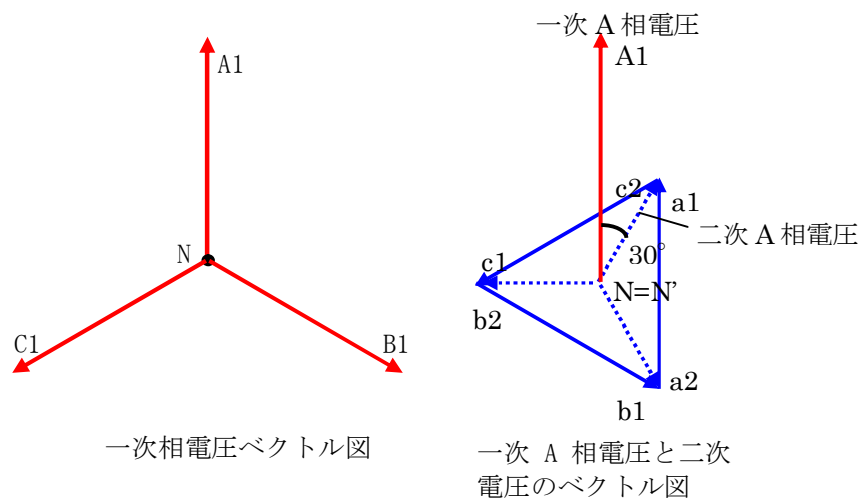


Fig. 5 Yd1 のベクトル図

2 ベクトル群記号 Yd11 で表される角変位を得る接続方法

1) 検討対象回路

Fig. 1 と同じ回路です。

2) 各単相変圧器巻線の誘起電圧

Fig. 2 に示す誘起電圧が発生しています。

3) ベクトル群記号 Yd11 の一次相電圧と二次相電圧の関係

Yd11 のベクトル群記号の時の一次相電圧、二次相電圧の大小関係と角変位は Fig. 6 のごとくで、一次 A 相電圧は二次 A 相電圧より 30° 遅れています。

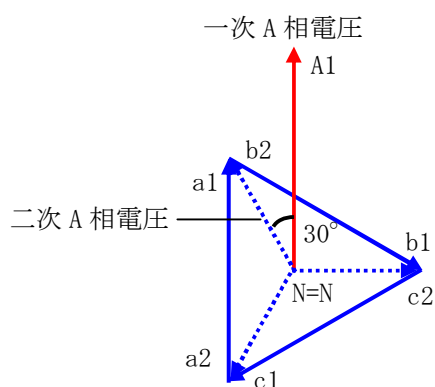


Fig. 6 Yd11 の一次、二次相電圧

Fig. 6 の説明:

デルタ形の青の実線で示したベクトルは単相変圧器二次巻線の端子間を接続することで得られる三相の線間電圧です。 N' は二次デルタ電圧ベクトルの仮想中性点です。 N は一次星型の中性点です。

二次各相電圧ベクトルは点線で示したベクトルになります。

Fig. 6 は図を見やすくするため一次電圧は A 相電圧だけを示し、一次 B, C 相電圧は省略しています。

Yd11 の角変位を得るには Fig. 6 に示す一次、二次の相電圧の位相状態にすれば良く、そのためには、Fig. 2 の各巻線の二次誘起電圧ベクトルを Fig. 6 までそれぞれ平行移動し、次のごとく接続すれば Fig. 6 のデルタ電圧を実現でき、Yd11 の角変位が得られることがわかります。

a1 端子と b2 端子を接続
b1 端子と c2 端子を接続
c1 端子と a2 端子を接続

4) 外部線路との接続

Fig. 6 より、一次 A 相電圧は A1 端子に表れ、二次 A 相電圧は端子 b2 と a1 の接続点に現れるのでここに外部の一次、二次の A 相線路に接続すれば良いことになります。

同様に

B 相一次相電圧は B1 端子に表れ、二次 B 相電圧は端子 c2 と b1 端子の接続点に現れるのでここに外部の B 相線路に接続すれば良いことになります。

C 相一次相電圧は C1 端子に表れ、二次 C 相電圧は端子 a2 と c1 端子の接続点に現れるのでここに外部の C 相線路に接続すれば良いことになります。

以上より、Fig. 7 に示す Yd11 の角変位を得る接続回路が得られます。

Fig. 8 のベクトル図は 2 の 3) の説明と重複しますが参考までに示しておきます。

(注 Fig. 7 に示す端子記号もシミュレーション時、EMTP の約束ごとに従うため、後述の 5. 2) 項に示すごとく変更を加える必要があります。)

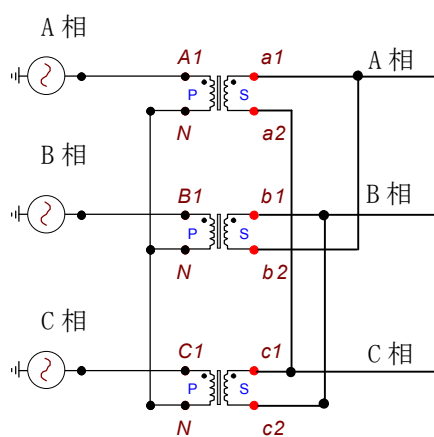


Fig. 7 Yd11 の結線図

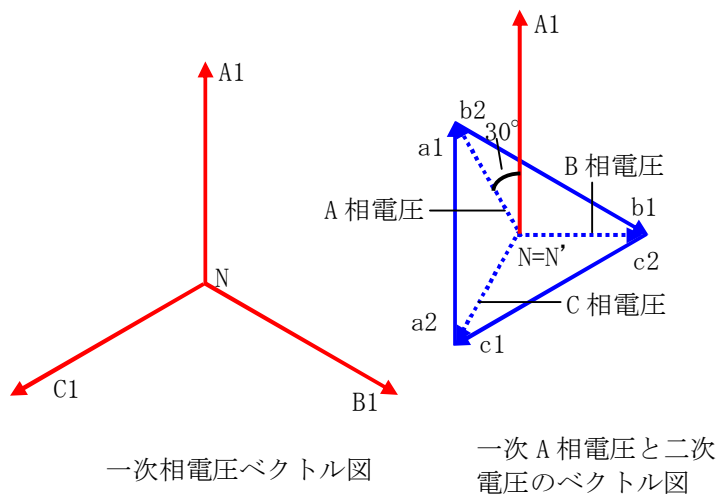


Fig. 8 Yd11 のベクトル図

3. ベクトル群記号 Dy1 で表される角変位を得る接続方法

このベクトル群記号の位相関係は Fig. 8 の Yd11 と同じで、同一相のデルタ側相電圧が星型相電圧より 30° 進みます。ただし、相電圧の大小関係は Dy1 なので、デルタ側相電圧 > 星型相電圧です。

ベクトル図はこの説明より明らかであると思われるので省略致します。

Dy1 を得る接続は Fig. 7 の一次側、二次側を入れ替えて、Fig. 9 のとおりになります。

(注 Fig. 9 に示す端子記号もシミュレーション時、EMTP の約束ごとに従うため、後述の 5. 3) に示すごとく変更を加える必要があります。)

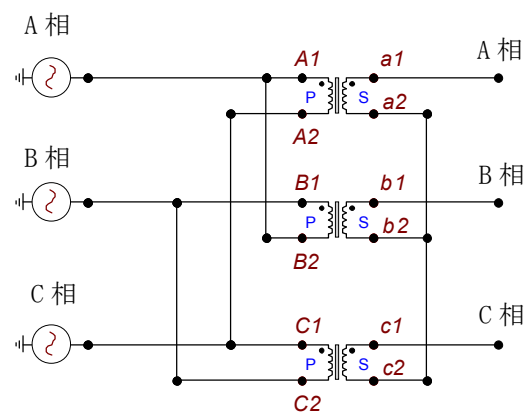


Fig. 9 Dy1 の結線図

上記は Fig. 8 の Yd11 と角変位が同じになることに着目した説明ですが、白紙の状態から考えるなら次のように考えます。

Fig. 10 の回路で考えます。

Dy1 なので二次側は星型接続で Fig. 10 の如く接続します。

一次側はデルタ接続ですが今の段階ではどのようなデルタ形に接続すれば Dy1 のベクトル群記号になるか不明なので巻線端子間には接続していません

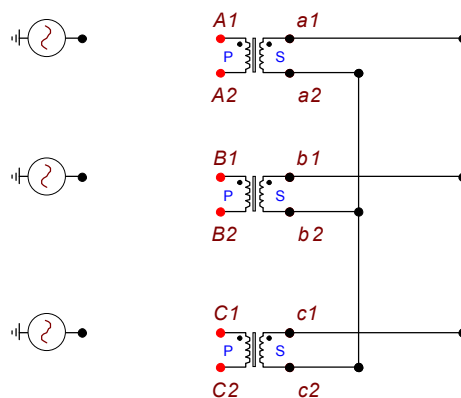


Fig. 10 Dy1 の検討回路

時刻 t の一次、二次相電圧ベクトル図は Fig. 11 に示すとおりであるとしします。
 赤の点線で示すベクトルはデルタ接続の仮想中性点からデルタの各頂点へ向かう一次相電圧を、
 青のベクトルは二次相電圧を示します。
 Fig. 11 は見やすくするため一次相電圧は A 相のみ表示し、B、C 相の一次相電圧は省略しています。

二次は星型なので端子 a_2, b_2, c_2 は実際には中性点 N に全て接続されますが、二次巻線端子名を
 明示した方がわかりやすいと考え、これらの端子は中性点 N から少し離して描いています。

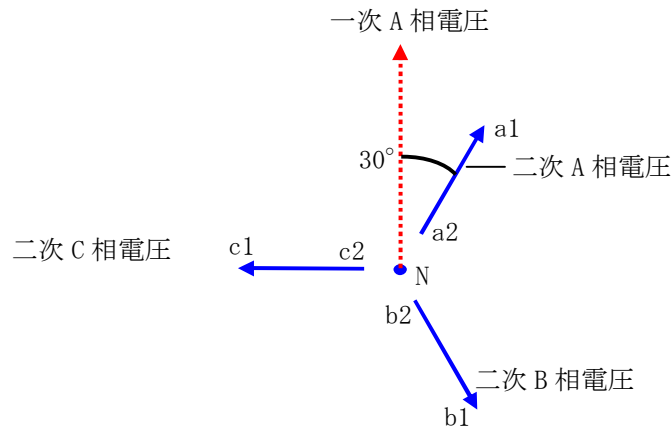


Fig. 11 Dy1 のベクトル群記号

次に時刻 t の各単相変圧器の一次巻線誘起電圧(線間電圧)の位相について考えると、
 単相変圧器は減極性のため、Fig. 12 に示すごとく、赤色ベクトルの一次巻線誘起電圧(線間電圧)
 は、青色ベクトルの二次巻線誘起電圧と同一位相となっています。

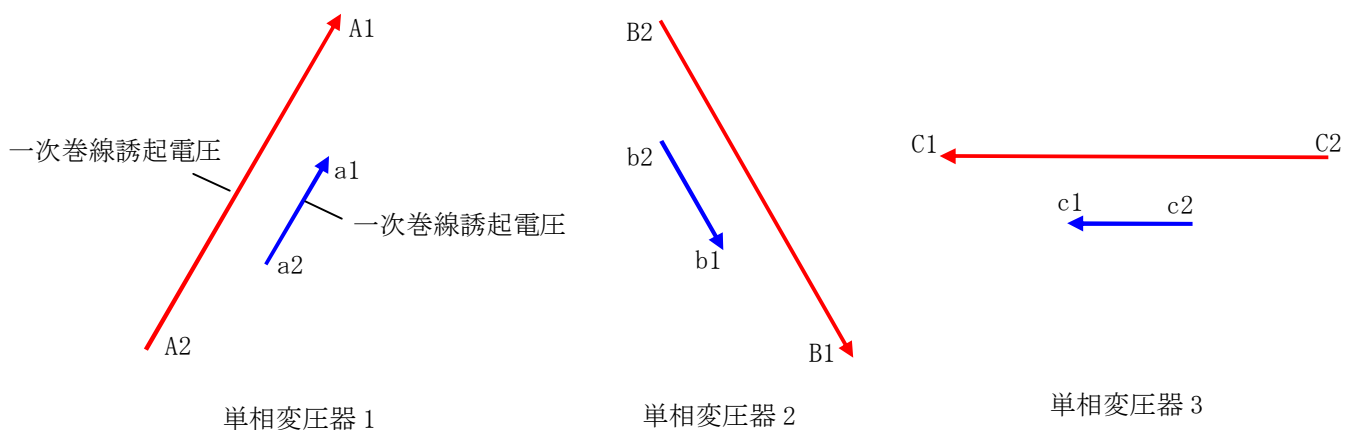


Fig. 12 一次、二次巻線の誘起電圧の位相関係

次に Fig. 12 のベクトル図の一次巻線誘起電圧の位相を保ったまま平行移動して、Fig. 11 の Dy1
 のベクトル群記号の位相関係を作り出す結線を考えます。

今一次巻線電圧を平行移動し次のごとく端子間を結線し、Fig. 13 に示すデルタ接続を作ってみ

ます。

A1 端子と B2 端子
B1 端子と C2 端子
C1 端子と A2 端子

すると Fig. 13 に示す仮想中性点 N' と A1-B2 の続点間に赤の点線のベクトルは Fig. 11 と同じ一次 A 相電圧が得られます。

Fig. 13 には二次の A 相電圧も示しています。

この一次、二次相電圧のベクトル位相関係は $Dy1$ なので、上述のごとく接続すれば $Dy1$ の角変位が得られることがわかります。

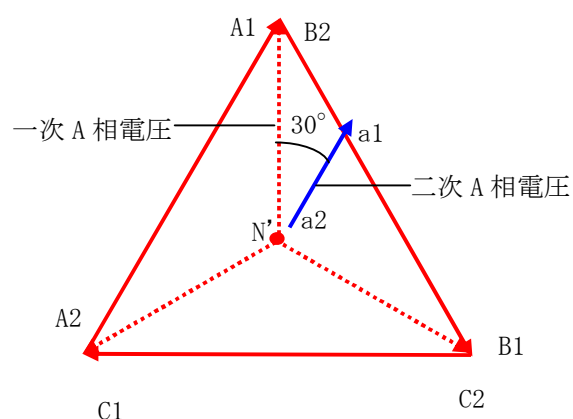


Fig. 13 $Dy1$ のためのデルタ結線

よって、A1 と B2 接続点を A 相に接続し、B1 と C2 接続点を B 相に接続、C1 と A2 の接続点を C 相に接続して Fig. 14 の結線図が得られます。この結線図は $Yd11$ を基にして考察して得た Fig. 9 と同一です。

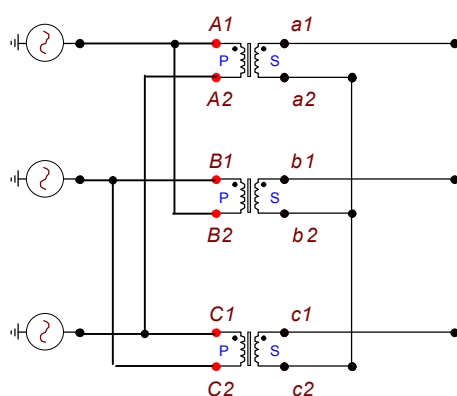


Fig. 14 $Dy1$ の結線図

4. ベクトル群記号 Dy11 で表される角変位を得る接続方法

このベクトル群記号の位相関係は Fig. 3 と同じで、同一相のデルタ側相電圧が星型相電圧より 30° 遅れます。ただし、相電圧の大小関係は Dy11 なので、デルタ側相電圧 > 星型相電圧です。ベクトル図はこの説明より自明であると思われるので省略致します。

Dy11 を得る接続は Fig. 4 の一次側、二次側を入れ替えた Fig. 15 のとおりになります。

(注 Fig. 15 に示す端子記号はシミュレーション時、EMTP の約束ごとに従うため、後述の 5. 4) 項に示すごとく変更を加える必要があります。)

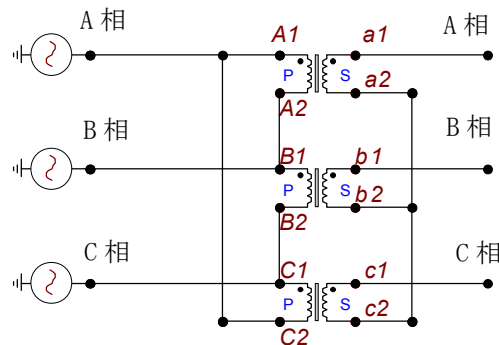


Fig. 15 Dy11 の結線図

Dy11 の接続を白紙状態から考えるなら前項の Dy1 の白紙状態からの考察と同様に考え、Fig. 12 に示す赤色実線で示す一次巻線の誘起電圧の位相を保ったまま平行移動し、下図の接続にすれば Dy11 の角変位が得られます。

二次は星型なので端子 a2, b2, c2 は実際には中性点 N に接続されますが、下図では二次巻線端子名を明示したいため、これらの端子は中性点 N から少し離して描いています。

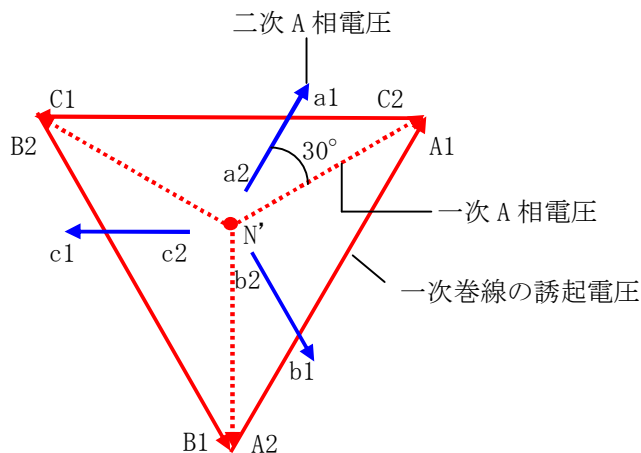


Fig. 16 Dy11 のベクトル図

5. EMTP による角変位の確認

上記 1 項から 4 項で述べた内容で変圧器を結線した時、目的とした角変位が得られることを EMTP を使って確認してみます。

1) Yd1 用結線方法の角変位の確認

1-1) 検討対象回路

Fig. 4 の Yd1 の角変位を得る結線図を EMTP を使い、一次相電圧、二次相電圧をシミュレーションし Yd1 が得られるか検証してみます。ATPDraw で作成した回路図は「ATP (EMTP) の小さな研究室」の「三相変圧器の角変位の調整方法」のところに添付してある Yd1.acp の通りで Fig. 17 はその copy です。

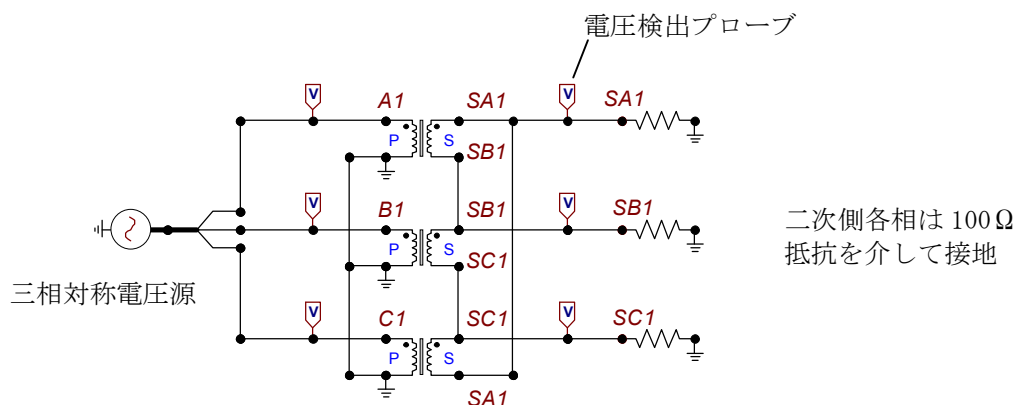


Fig. 17 Yd1 のシミュレーション用回路図

Fig. 17 は基本的に Fig. 4 と同一ですが、端子記号には次の EMTP の約束ごとにしたがい、小さな変更を加えています。

これらの変更は EMTP を動かすために必要なものです。

a. 変圧器一次中性点端子記号

EMTP では直接接地される端子には端子記号を付けない決まりなので一次中性点の端子記号は付けていません

b. 変圧器二次端子記号について

EMTP では互いに接続される端子名同士は同じ端子名(ノード名)にする必要があります。したがって各単相変圧器の二次端子記号は Fig. 17 のごとく変えています。

1-2) 入力データ

a. Setting

シミュレーション用の Setting 内容は次のようにしています。(この Setting は以下全てのケースに共通です)

その他の Setting の Tag の内容は Default 状態のままとしています。

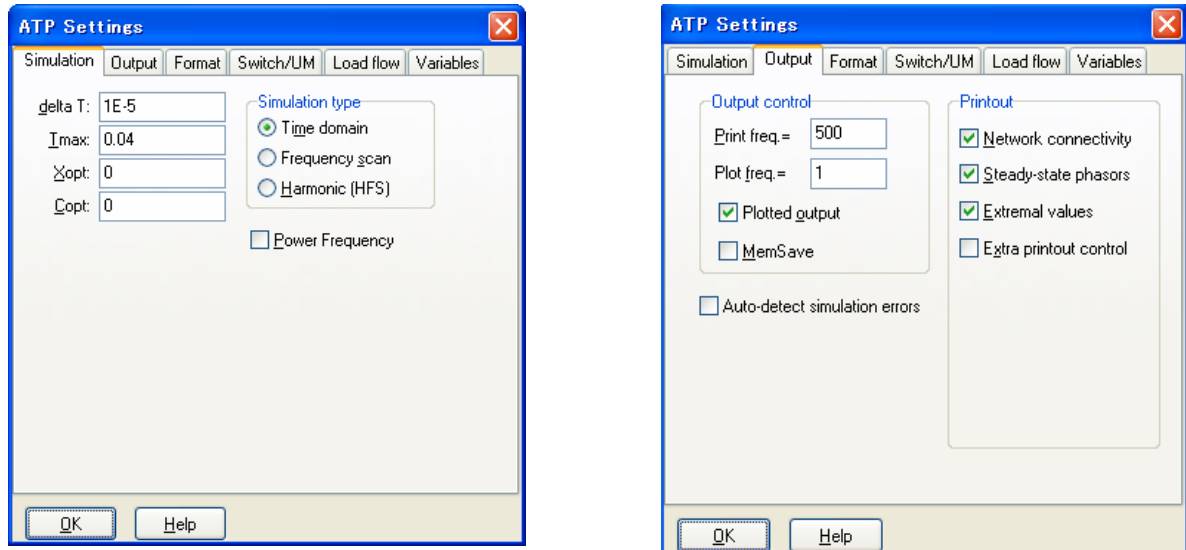


Fig. 18 シミュレーション用の Setting

b. 電源電圧

Type 14 の三相電源を使用し、電源への入力内容は次のとおりです。

電源電圧波形は Default では余弦関数です。下図のように PhaseAngleA を 0° と入力しているの
で t=0. で一次 A 相電圧は+の Peak 値になっています。

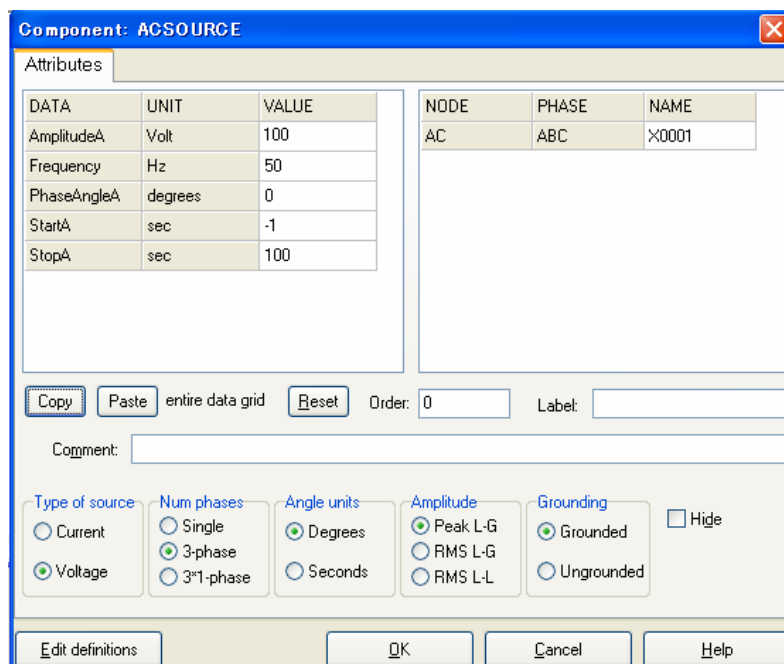


Fig. 19 三相電源圧の入力データ

c. 単相変圧器(Saturable transformer)

三相変圧器を構成する三台の単相変圧器はSaturable transformerを使用し、入力内容はFig. 20のとおりとしています。

Lp, Ls(一次、二次巻線の漏れリアクタンス)はFig. 20のごとく理想変圧器に近づけるため、無視できるレベルに小さくしています。0を入力するとエラーになるのでそれを回避するためです。

DATA	UNIT	VALUE
Io	Volts	0
Fo	Vs	0
Rmag	Ohms	0
Rp	Ohms	0
Lp	mH	1E-6
Vrp	kV	0.1
Rs	Ohms	0
Ls	mH	1E-5

NODE	PHASE	NAME
P1	1	A1
P2	1	
S1	1	SA1
S2	1	SB1

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig. 20 単相変圧器入力データ

このCopy では Vrs と RMS 欄が見えていませんが、次の内容で入力しています。

Vrs kV 0.1
RMS 0/1 0

1-3) シミュレーション結果

シミュレーション結果のプロットを Fig. 21 に示します。

代表として一次、二次の A 相電圧を示しています。

Fig. 21 は PlotXY (MC' PlotXWin) を使ってシミュレーション結果を表示したものです。

一次 A 相電圧 (A1 電圧) は $t = 0$ (s) で Max であり、一方二次 A 相電圧 (SA1 電圧) がピークになる時間は このシミュレーション結果のプロットから $t \approx 1.66$ ms 後となっています。これは SA1 電圧が A1 電圧より 50Hz では 30° 遅れていることを示し、Yd1 の結線になっていることがわかります。電圧が Peak 値になる 1.66 msec. は Plot XY 上でプロット波形を拡大して読み取れます(下図は PlotXY の画面をコピーしたもので、下図は拡大できません)。

他相も同じように二次相電圧は一次相電圧より 30 度遅れる結果となります。

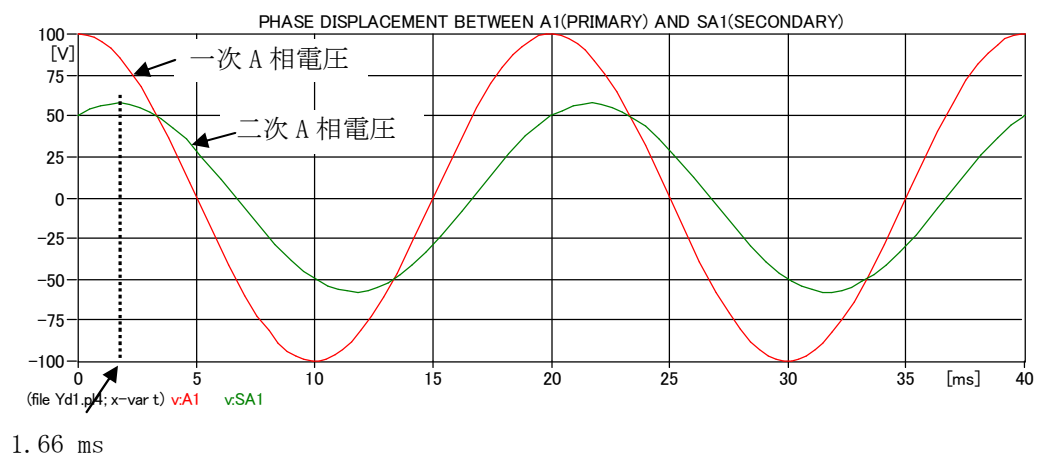


Fig. 21 Yd1 のシミュレーション結果

2) Yd11 用結線方法の角変位の確認

2-1) 検討対象回路

Fig. 7 の Yd11 の角変位を得る結線で回路図を作り EMTP を使って、一次相電圧、二次相電圧をシミュレーションしてみます。ATPDraw で作成した回路図は「ATP (EMTP) の小さな研究室」の「三相変圧器の角変位の調整方法」のところに添付してある Yd11.acp の通りで Fig. 22 はその copy です。

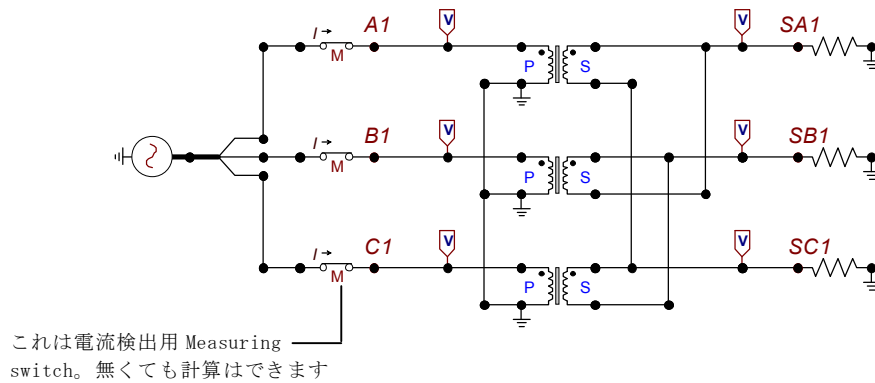


Fig. 22 Yd11 シミュレーション用回路図

端子記号については Fig. 17 と同じ小さな変更を行っています。

2-2) 入力データ

電源電圧、単相変圧器、二次側抵抗の入力データは Yd1 のケースと同一です。二次側の結線だけを Fig. 22 の通りに変更しています。

2-3) Yd11 のシミュレーション結果

Yd1 の場合と同じく、代表として一次、二次の A 相電圧を示します。

Fig. 23 より、計算開始後 10 msec. で一次 A 相電圧 (A1 電圧) がマイナスの Peak になっています。一方二次 A 相電圧 (SA1 電圧) は計算開始後 8.34 (ms) でマイナスの Peak になっていて、この時間差 1.66 (ms) は 50Hz 時、 30° に相当します。よって二次 A 相電圧が一次 A 相電圧より 30° 進み、ベクトル群記号は Yd11 になります。

他相も同じように二次相電圧は一次相電圧より 30 度進む結果となります。

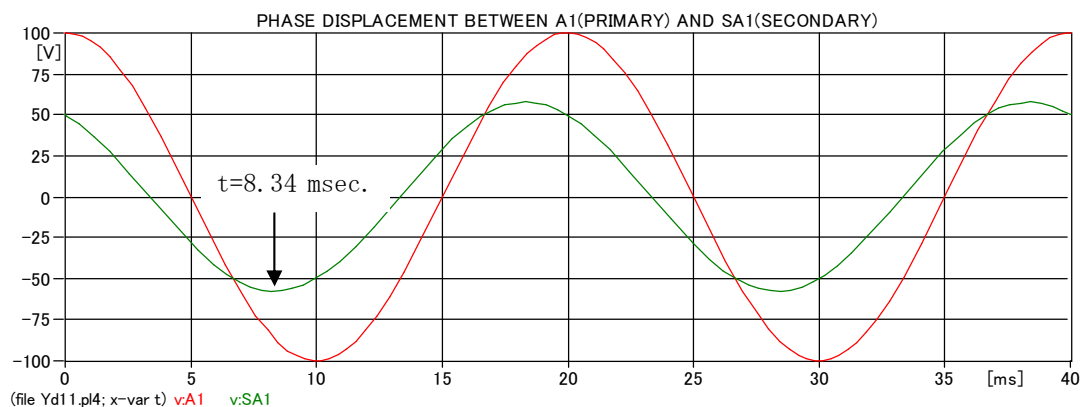


Fig. 23 Yd11 のシミュレーション結果

3) Dy1 用結線方法の角変位の確認

3-1) 検討対象回路

同様に、Fig. 9 の Dy1 の角変位を得る結線で回路図を作り EMTP を使って、一次相電圧、二次相電圧をシミュレーションしてみます。ATPDraw で作成した回路図は Fig. 24 のとおりです。

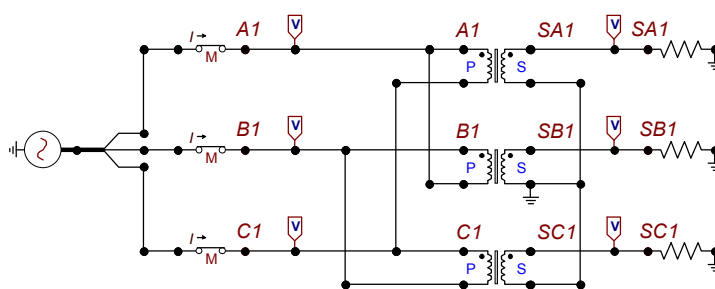


Fig. 24 Dy1 シミュレーション用回路図

3-2) 入力データ

Dy1 のため、一次側相電圧 > 二次相電圧になるように単相変圧比だけを Fig. 25 の Vrp 部のごとく変えています(このようにすることで二次電圧は相対的に低くなり、一次側相電圧 > 二次相電圧の関係が得られます)。

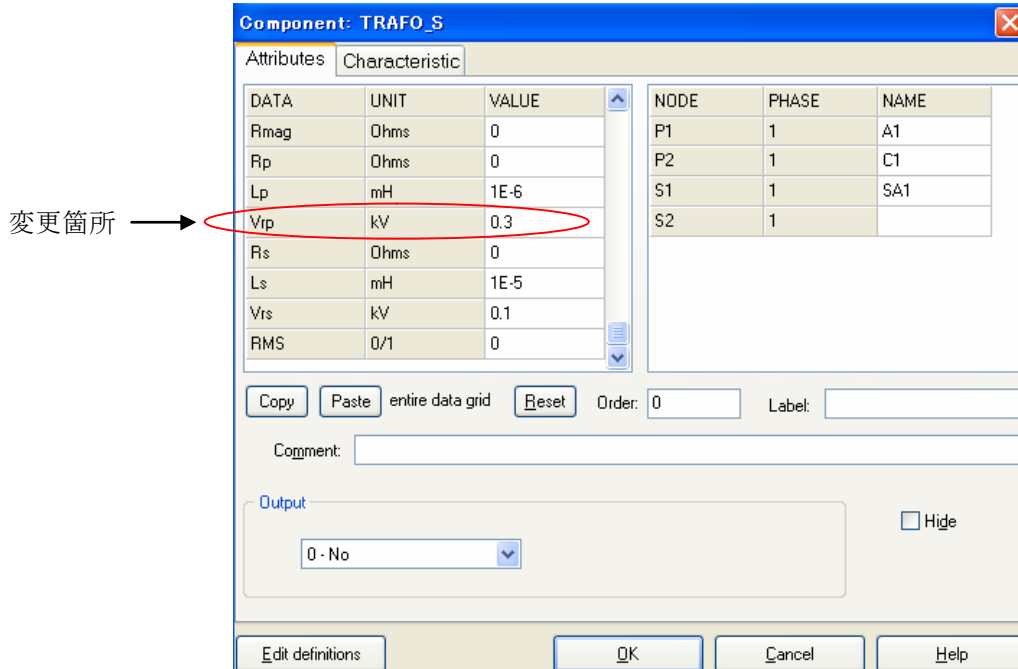


Fig. 25 単相変圧器仕様変更内容

3-3) Dy1 のシミュレーション結果

シミュレーション結果のプロットを Fig. 26 に示します。

代表として一次、二次の A 相電圧を示しています。

一次 A 相電圧(A1 電圧)は $t = 0$ (s) で Max であり、一方二次 A 相電圧(SA1 電圧)がピークになる時間は このシミュレーション結果のプロットから $t \approx 1.66$ ms 後となっています。これは SA1 電圧が A1 電圧より 50Hz では 30 度遅れていることを示し、Dy1 の結線になっていることがわかります。電圧が Peak 値になる 1.66 ms は Plot XY 上でプロット波形を拡大して読み取れます。

他相も同じように二次相電圧は一次相電圧より 30 度遅れる結果となります。

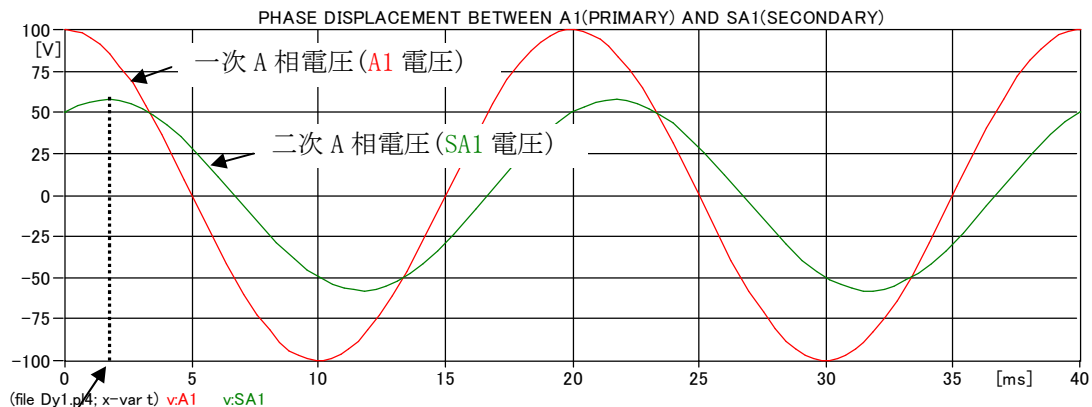


Fig. 26 Dy1 のシミュレーション結果

4) Dy11 用結線方法の角変位の確認

4-1) 検討対象回路

同様に、Fig. 15 の Dy11 の角変位を得る結線で回路図を作り EMTP を使って、一次相電圧、二次相電圧をシミュレーションしてみます。ATPDraw で作成した回路図は Fig. 27 のとおりです。

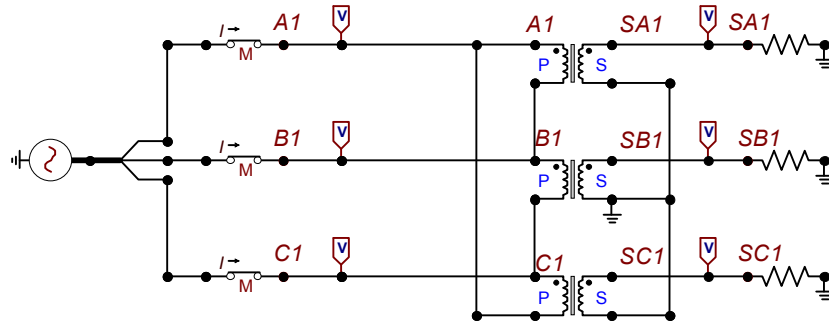


Fig. 27 Dy11 シミュレーション用回路図

4-2) 入力データ

一次側相電圧 > 二次相電圧になるように単相変圧比の値を前項の 3-2) と同じに変更しています。

4-3) シミュレーション結果

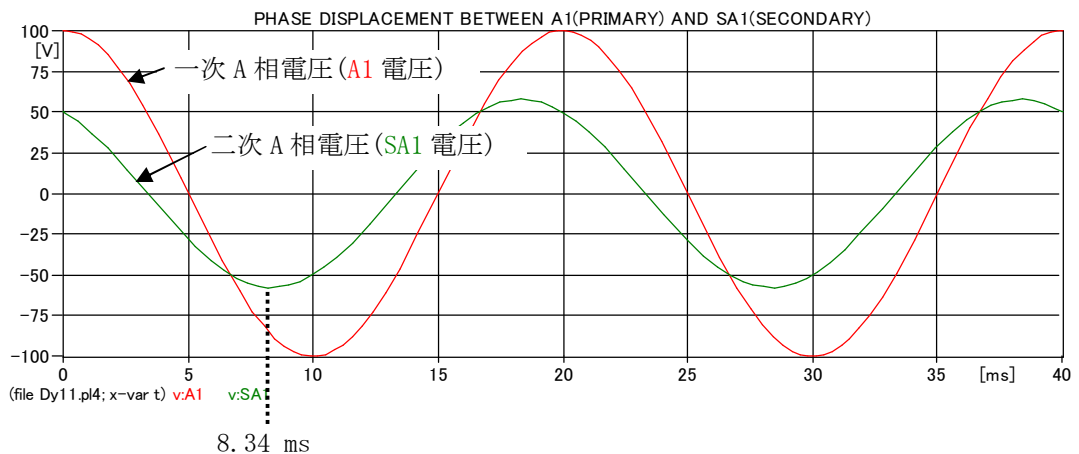


Fig. 28 Dy11 のシミュレーション結果

Fig. 28 より、計算開始後 10 msec. で一次 A 相電圧 (A1 電圧) がマイナスの Peak になっています。一方二次 A 相電圧 (SA1 電圧) は計算開始後 8.34 (ms) でマイナスの Peak になっています。この時間差 1.66 (ms) は 50Hz 時、 30° に相当します。よって二次 A 相電圧が一次 A 相電圧より 30° 進み、ベクトル群記号は Dy11 になります。

6 まとめ

以上述べた必要な角変位を得るための要点を纏めると次のようになります。

基本次項

必要な角変位の接続を考える前に次の点を認識しておく必要があります。

- ① 三相変圧器は単相変圧器 3 台から構成されたと考えるとわかりやすい。
- ② 各変圧器は全て減極性であるとして考えます。
- ③ 星形結線とデルタ形結線間の角変位は星形接続の A 相電圧とデルタ接続の A 相電圧間の位相差で規定されています。デルタ接続の相電圧は仮想中性点とデルタ接続の各接続点との間の電圧になります。

星形とデルタ形で構成される三相変圧器の必要な角変位の接続を得る作業

必要な角変位を得る接続は次の①～③の順に作業して得られます。

- ① Fig. 2 に示すごとく時刻 t における星形接続の A 相を構成する単相変圧器の巻線誘起電圧とこの変圧器のもう片方の巻線誘起電圧のベクトル図を描いておきます。これらの誘起電圧は単相変圧器が減極性のため同一位相となります。後者の誘起電圧はデルタ接続されるので線間電圧になります。
- ② Fig. 3 に示すごとく Yd1 などの得ようとする角変位のベクトル図を描きます。
- ③ ①の線間電圧を平行移動し、且つデルタ接続の A 相電圧と星形の A 相とが望む角変位になるように①の線間電圧を配置して、接続すれば望む角変位が得られます。