

Rev.1 Nov.2, 2007  
Rev.2 July 22, 2016 Added URL

# 一線地絡時の過電圧現象

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-emtp-reserch.o.o7.jp/>

## 間歇一線地絡時の過電圧現象

1 前書き .....	4
2 間歇一線地絡の模擬方法.....	5
1) Valve (Type 11)の呼び出しと設定.....	6
2) Valve (Type11)のデータ入力.....	7
3) Valve (Type11)の開閉制御信号 .....	7
4) パルス電源の呼び出しと設定 .....	8
5) パルス電源と Valve (Type11)を接続して地絡発生、回復の動作確認をしてみましょう .9	
6) 計算条件の設定 .....	10
7) 計算実行と計算結果 .....	10
3 インダクタンス分が存在しない場合の非接地系統の間歇一線地絡現象 .....	12
1) 検討回路 .....	12
2) 検討回路図の説明.....	12
3) 計算条件 .....	14
4) 計算結果と考察 .....	16
5) 二回目の地絡発生まで-100 V の零相電圧が保たれる理由.....	18
6) 二回目以降の間歇一線地絡時の回路電圧.....	20
7) 二回目の地絡時、直前の-100 V から +100 V にほんとうに急変するのか .....	21
8) PlotXY でキャパシタンス電圧と抵抗電圧の和をプロットさせる方法.....	24
9) インダクタンス分が存在しない場合の非接地系統の間歇一線地絡現象のまとめ.....	24
4 インダクタンス分が存在する時の間歇一線地絡現象.....	25
1) 検討回路 .....	25
2) 計算条件 .....	26
3) 計算結果の概要.....	26
3.1) TA, TB, TC 電圧の計算結果.....	26
3.2) 零相電圧の計算結果 .....	27
4) 計算結果の詳細考察 .....	29
4.1) 最初の地絡時の現象 .....	29
a. 地絡発生から回復までの各相回路電流の流れ方.....	29
b. A 部の地絡発生中の振動周波数の検討.....	31
c. 地絡回復後の電流ルートと振動周波数.....	32
d. 最初の地絡発生前後の TA, TB, TC ノード電圧の概要 .....	33
e. 最初の地絡発生直後から次の地絡回復までの TA, TB, TC ノード電圧の変化.....	34
f. 地絡で発生する零相電圧についての考察.....	35
4.2) 二回目の地絡時の現象.....	37
a. 地絡発生時の TB, TC 電圧と零相電圧.....	37
b. 二回目の地絡回復後の TA 電圧 .....	38
c. 二回目の地絡と地絡回復時の零相電圧.....	39
5 電圧 Build up メカニズムのまとめ .....	40
6 電圧 Build up の最大値 .....	41
1) 零相電圧と健全相電圧の電圧 Build up による最大値.....	41
2) 地絡相の電圧 Build up の最大値.....	43
3) どうして電圧 Build up は飽和するのでしょ .....	43
7 地絡相の電圧振動が次の地絡発生まで収束しない場合、発生零相電圧は 5 PU を越える..45	
1) 0.5 $\mu$ F の零相電圧が途中で急増する説明.....	46
2) 0.07 $\mu$ F の零相電圧が 5PU を超える説明.....	49
8 電圧 Build up 現象シミュレーション上の留意点.....	51
9 間歇一線地絡の過電圧抑制をするにはどうすれば良いかな.....	52
1) IEEE C62.92 の概略内容.....	52
2) 検討回路 .....	53

3) 計算結果 .....	54
a. 零相電圧の大きさ .....	54
b. TB,TC 電圧の大きさ .....	54
c. 地絡相の電圧の大きさ .....	55
4) IEEE C62.92 による間歇一線地絡時の過電圧抑制方法のまとめ .....	55

## 1 前書き

本稿では集中定数の R,L,C と TACS 機能を使った簡単なシミュレーション事例として非接地系の間歇一線地絡時の電圧 Build up 現象のシミュレーション例を取り上げます。

TACS とは Transient Analysis of Control Systems の頭文字を取ったものですがこれが何であるかを極めて簡単に言うと、TACS は ATP の中に用意されているプログラムの一部で制御系や論理回路を記述、演算するために用いられるものです。

TACS の使い方の一例をあげると、TACS 内に用意されている電源から必要な制御信号を作り出して電気回路に与えてスイッチの開閉を制御したり、または電気系の信号を TACS の取り込み、取り込んだ信号を加工した後再び電気回路に戻し、必要な制御例えば発電機の界磁電圧の制御などに用いられます。

本稿では TACS は間歇一線地絡を発生させるスイッチの開閉制御に用いています。この詳細は後述します。

さて話を非接地系の間歇一線地絡による電圧の Build up 現象に戻します。

導体と大地間にキャパシタンスが存在する三相非接地系で、或る相に間歇一線地絡が発生すると、地絡発生のたびに零相電圧も三相電圧も大きくなって行く、いわゆる電圧の Build up 現象が発生すると言われていていますね。

本稿では ATP を使用してこの零相電圧と各相電圧をシミュレーションして零相電圧及び各相電圧の上昇のメカニズムを解説しています。

説明がうまくなく読まれる方も大変と思いますが、注力して説明しましたので、説明がうまくない点は多少目をつぶって読んで戴ければと思います。

この零相電圧の Build up に関しては零相電圧のピーク値は 5 pu に又健全相電圧の上昇は 7.5 pu で飽和するといわれていますが、そうなる場合もありますがそうならない場合もあります。回路定数によってはこれら以上の電圧になることも本稿の第 7 項で示しました。

このように Build up による最大電圧は回路定数に依存しているので、回路ごとに ATP でシミュレーションすべきでしょう。

健全相の電圧が上昇すれば健全相が地絡へ進展する可能性があり、二相短絡又は三相短絡への重大事故に進展する可能性が出て来るので、進展しないように間歇一線地絡時電圧の Build up を危険の無い大きさに抑制する必要があります。

この過電圧抑制の一方法として、例えば発電機主回路の間歇一線地絡時の過電圧抑制方法として IEEE 規格の C62.92 があります。この規で推奨している内容に従って中性点抵抗を選定すれば間歇一線地絡による健全相電圧の跳ね上がりを危険が無いレベルに抑制できるとしています。

これは規格の選定基準で決定した中性点抵抗値は零相キャパシタンスに並列に入る零相電圧の放電時定数を形成するので、地絡回復時に残留した零相電圧を速やかに放電するため、零相電圧の Build up が抑制されるためです。このメカニズムについては本稿内で説明しています。

またこの IEEE 規格の C62.92 に従って選定した中性点抵抗を設けた場合の間歇一線地絡時のシミュレーション例も本稿の最後に示しています。

本解説書は御自由にご利用ください。

但しこの解説書にしたがって発生したいかなる不具合についても責任は負いかねます。

あしからずご了承のほどお願いいたします。

## 2 間歇一線地絡の模擬方法

本稿では間歇一線地絡が発生した時の回路電圧、電流をシミュレーションして電圧 Build up のメカニズムを検討して行きます。

地絡模擬のために、ここでは間歇一線地絡は次のようなものと仮定して検討します。

(1) 何らかの原因で A 相の導体周辺の絶縁耐力が低下し、回路電圧が土の Peak 値で、絶縁が破壊して、半サイクルごとに地絡が発生するものとします。

(2) この地絡は実際にはアーク地絡になるケースが多いので非線形特性であるアーク抵抗もモデルに組み込みたいところですが、簡単化のためアーク抵抗の存在は無視します。計算結果はアーク抵抗が無視されるので電圧振動に対するダンピングが少なくなり、過電圧値は高めの結果が得られます。

(3) 地絡後、地絡電流が 0 になった時点で地絡回復が行われるものとします。

間歇的に ON, OFF を繰り返す間歇一線地絡発生用スイッチとして ATP には TACS 信号で開閉が制御される Valve (Type 11) が用意されているので、これを使って模擬しましょう。Valve (Type 11)は ATP の名称ですがサイリスタスイッチのことです。

尚、似たようなスイッチに TACS switch(Type13)がありますがこれは制御信号が 0 になると同時に回路電流が流れていても電流を 0 に裁断します。このような模擬が必要な時はこのスイッチを使います。このスイッチは今回の仮定条件に合致しないので使いません。

地絡発生模擬のため Valve を導通させますが、このために Valve の Grid(これも ATP の呼称でゲートのこと)にパルス信号を与えます。

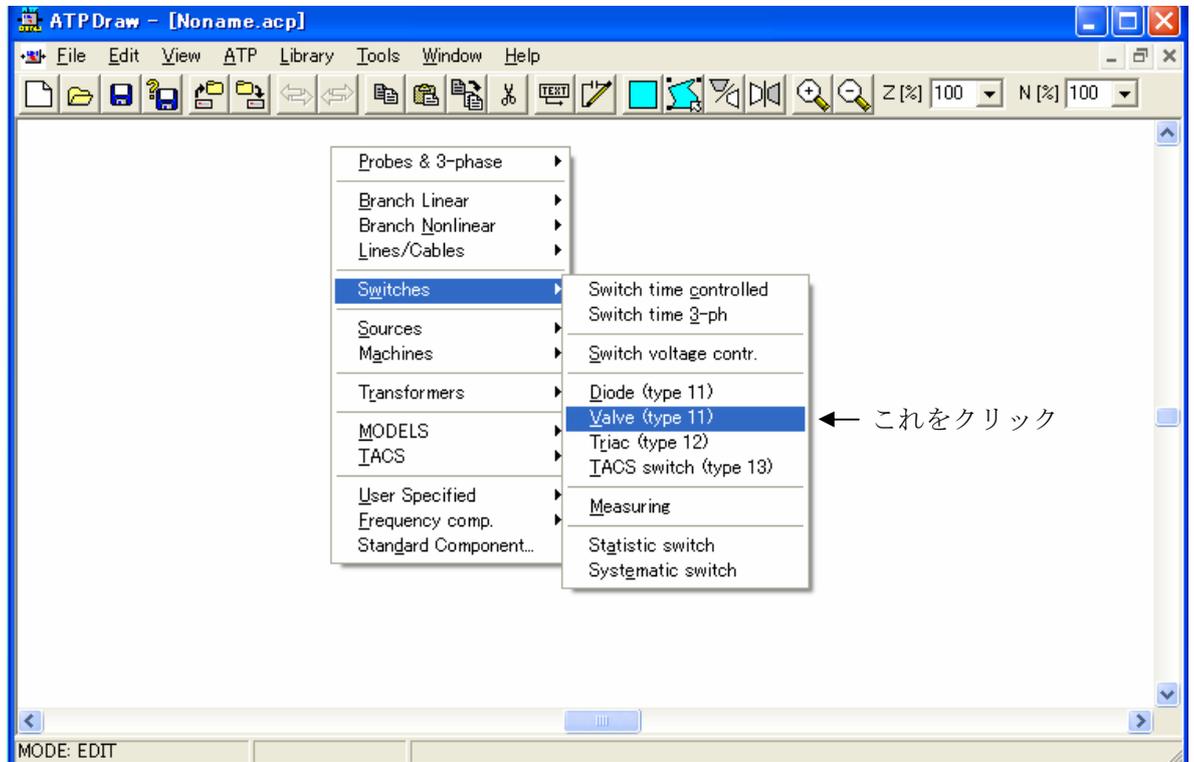
このパルス信号は幅の狭いパルス信号でかまわないのでここでは 0.1 msec.幅のパルスを Valve の Grid に与えることにします。このパルス信号は TACS で作成して Grid に与えます。本稿では TACS 内に用意されているパルス電源を使って Valve (Type 11)の開閉制御信号をつくり、これを Valve の Grid 端子に入力して地絡を発生させています。

また地絡の発生は計算開始後 20 msec.で間歇一線地絡が発生するようにしています。これは特別の理由がありませんが最初の 20 msec.は一応定常状態にしておきたいからです。

以下に詳細を記しますが、ATP シミュレーションをする上で不明点が出て来た時は、本サーバー上にある「初めての ATP の使い方.pdf」も参照して戴けると良いと思います。

### 1) Valve (Type 11)の呼び出しと設定

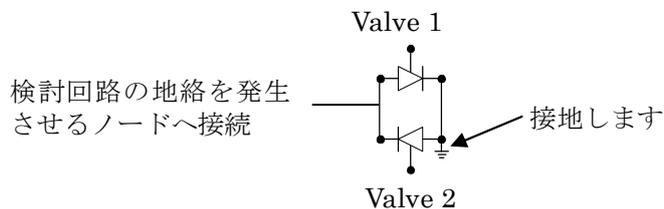
地絡発生用スイッチとして使う Valve (Type 11)のアイコンは次のようにして呼び出します。ATPDraw のキャンバス上で右クリックして次図のフローティングメニューを出し、Switchesの中から Valve (Type 11)を選択します。



次図が上記で呼び出される Valve のアイコンです。



地絡は A 相の土の最大値で発生して地絡電流の極性も逆転するので Valve (Type 11)は次図のように逆並列に接続して地絡点に接続します。



## 2) Valve (Type11)のデータ入力

Valve (Type11)のアイコンにマウスカーソルをあて右クリックすれば Valve (Type11)の入力窓が次のように開きます。(開かれる窓の内、入力データ部分である Attributes(属性)部分のみを示します。以下同様です)

DATA	UNIT	VALUE
Vig	Volts	0
Ihold	Amps	0
Tdeion	s	0
CLOSED	>0:SS closed	0
GIFU	>0:Test diod	0

CLOSED の欄が 0 になっているので過渡状態の計算に先立って行われる定常状態計算時この Valve (Type11)は開放状態に保たれます。

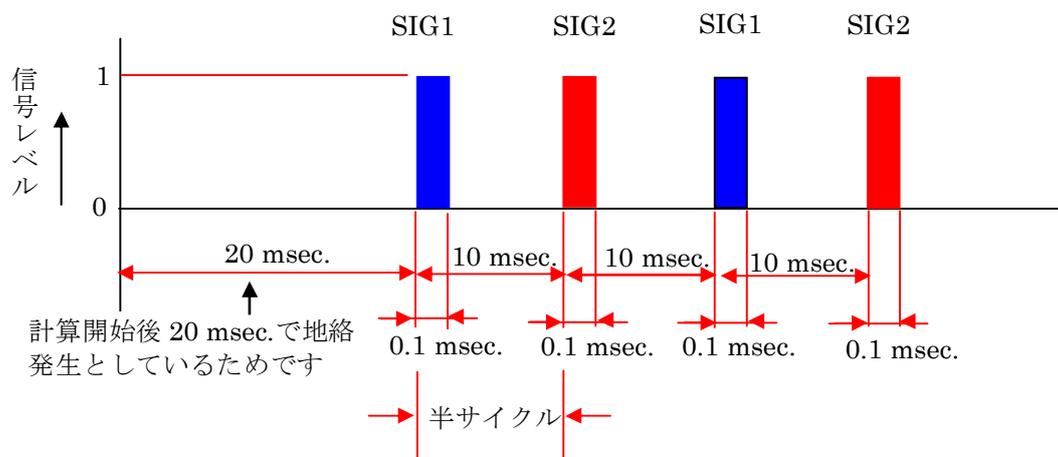
Valve 1 と 2 ともこのデフォルト状態の入力データのままで良いので OK ボタンを押します。それぞれの入力項目の説明については入力窓の右下の Help をクリックすると簡単ですが説明が表示されます。(さらに詳細を知りたい時は Rule Book を参照することになります)  
次に Valve (Type11)の GRID 端子に与える開閉制御用信号について説明します。

## 3) Valve (Type11)の開閉制御信号

Valve (Type11)の ON, OFF 制御は Grid 端子に与える制御信号の大きさを変えることで行えます。つまり制御信号が 0 より大きければ Valve (Type11)は ON になり、0 以下の大きさの制御信号を与えれば OFF になるように設計されているので、これを利用して Valve の ON, OFF を制御します。

間歇一線地絡の模擬の項で述べた条件から、次のパルスを Valve (Type11)に与えれば電源周波数 50Hz に同期して Valve (Type11)を開閉条件に従って開閉することが出来ます。

下図の青のパルスは SIG1 という名前をつけた開閉信号で Valve 1 の Grid 端子に与えられます。赤のパルスは SIG2 の名前をつけた開閉信号で、Valve 2 の Grid 端子に与えられます。



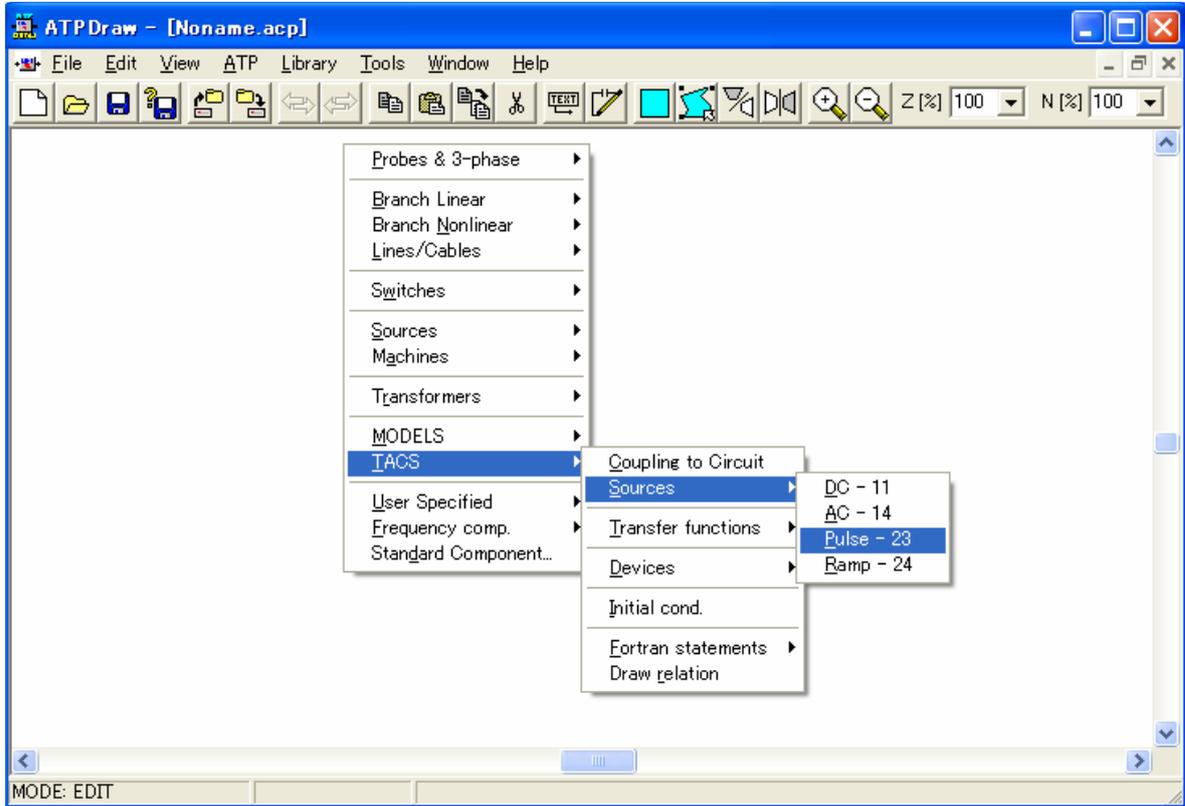
このパルス信号は以下に述べるように TACS のパルス電源を用いて作成できます。

#### 4) パルス電源の呼び出しと設定

開閉制御信号 SIG1, SIG2 はパルス電源を用いて作ることができます。

まずパルス電源を呼び出しましょう。

キャンバス上を右クリックしてフローティングメニューを出し、TACS→Sources→Pulse-23 を選択してパルス電源を呼び出します。



TACS のパルス電源のアイコンが呼びだされ、次のように表示されます。



データがデフォルト状態なのでパルス電源のアイコンはこのように赤で表示されています。入力データを確定するとアイコンの色は黒に変わります。

このアイコンにマウスポインタをあてて右クリックするとパルス電源の入力窓が現われるので、開閉条件に従い次のように入力します。両者の違いは **Tstart** だけが半サイクルずれているだけです。

SIG1 のパルス電源  
の入力データ

SIG2 用のパルス電源  
の入力データ

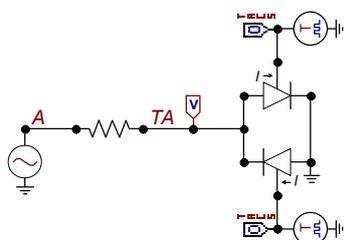
	DATA	UNIT	VALUE
振幅	Ampl.		1
周期	T	s	0.02
パルス幅	Width	s	0.0001
開始時間	T_start	s	0.02
パルス停止時間	T_stop	s	10

	DATA	UNIT	VALUE
振幅	Ampl.		1
周期	T	s	0.02
パルス幅	Width	s	0.0001
開始時間	T_start	s	0.03
パルス停止時間	T_stop	s	10

パルス電源の入力を完了したら OK ボタンを押し、入力データの確定をします。

### 5) パルス電源と Valve (Type11)を接続して地絡発生、回復の動作確認をしてみましょう

上記で作成した Valve とパルス信号が意図したものになっているか、次の簡単な回路を作り動作確認をしてみましょう。



ノード A と TA 間の抵抗は 1Ω の抵抗値です。

これはフローティングメニューから Branch Linear→Resistor で呼び出し 1Ω の抵抗値を入力します。

左端の電源は Type 14 の余弦波電圧源でフローティングメニューから Source→AC Type 14 を選択し、入力データ窓に下図のとおりデータを入力します。

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Volt	100
f	Hz	50
Pha	Deg/Rad	0
A1		0
TStart	s	-1
TStop	s	1000

ノード TA の右隣にある V と記したものは電圧検出用プローブです。これはフローティングメニューから Probes & 3-phase→Probe Volt を選択し、入力窓はデフォルト状態の単相プローブにしておきます。

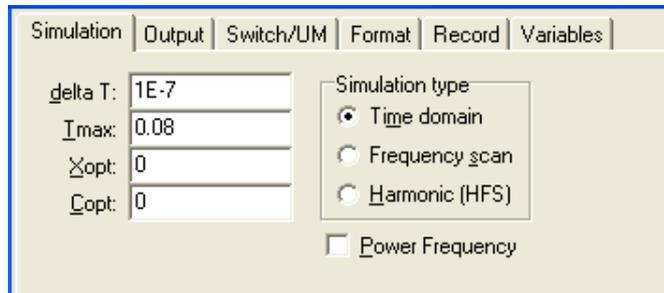
パルス電源に接続された O と記したアイコンは TACS の信号を出力するためのものです。SIG1 と SIG2 の TACS 信号につけられているのでこれらの信号がプロット表示プログラム PlotXY に出力されます。

二つの Valve の右側は接地しています。接地したい端子を右クリックして入力窓を開き Ground にチェックを入れれば接地することができます。

ノード名のつけ方は任意ですがここでは電源のノード名は A に、抵抗と Valve (Type11)間のノード名は TA と名前をつけています(端子部にマウスカーソルを当て右クリックすればノード名の窓が開くので希望の名前を入力します)

## 6) 計算条件の設定

計算条件の設定は次のようにしています。



計算刻み時間が  $1E-7$  sec. と細かくなっていますが、これは高周波振動電圧、電流が発生する本稿の `V_build_up.acp` のものを流用しているため `Valve (Type11)` の機能確認のためだけなら  $1E-5$  sec. でも十分です。 `V_build_up.acp` では高周波振動電圧、電流の波形の詳細を検討するのでこのように細かい計算刻み時間にしています。

プロジェクトファイルの名前のつけ方は任意ですが、ここでは `confirm_of_TACSsw_operation.acp` としています。

ATPDraw のメニューバーから `File→save As...` を選択し、名前をつけて保存します。

## 7) 計算実行と計算結果

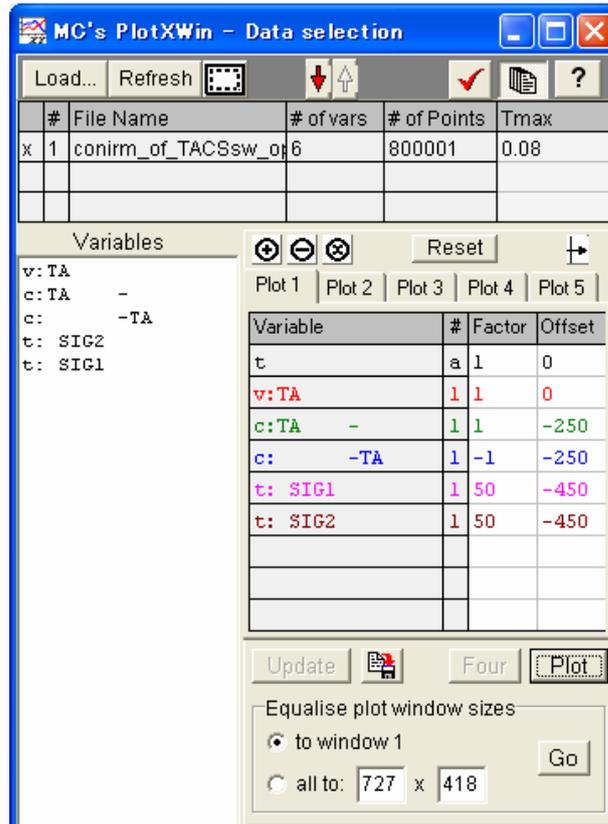
ATPDraw のメニューバーから `ATP→run ATP` を選択し、今作った `confirm_of_TACSsw_operation.acp` を走らせます。

計算が終了したら任意のキーを押して DOS prompt の窓を閉じます。

メニューバーの `ATP` から `PlotXY` を選択し、`PlotXY` を起動します。

次図のようにプロット対象量を選択し、`Factor` と `Offset` を入力した後 `Plot` ボタンを押してプロットしてみましょう。

これらの `Factor` と `Offset` はプロットした時、諸量の関係を比較しやすくするために使っています。

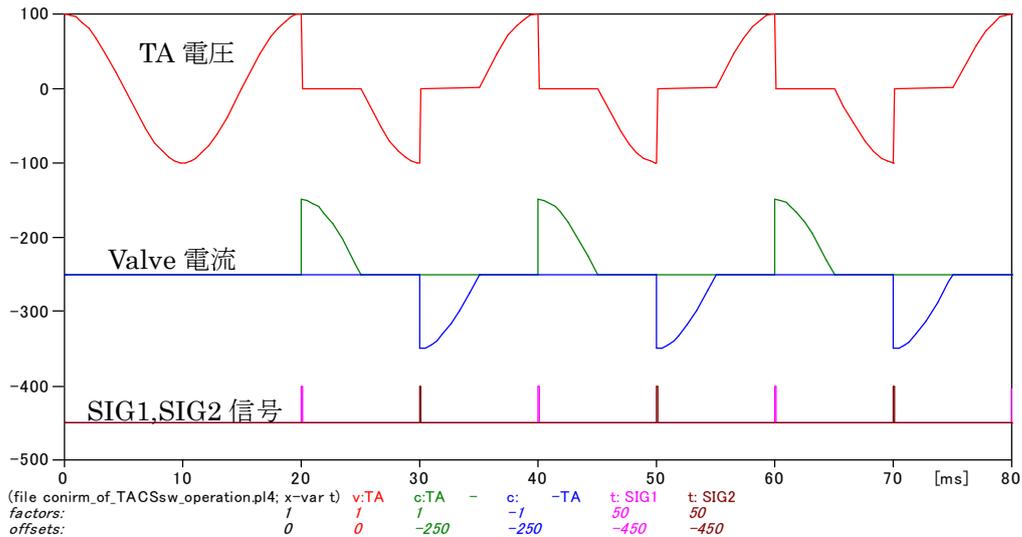


次のように計算結果が表示されます。

SIG1, SIG2 信号は入力したとおりに発生しています。

これにより TA 電圧は半サイクルのピークごとに地絡が発生し、電流が 0 になるまで地絡が継続し、意図したとおりの結果が得られています。

このように PlotXY のオフセットと Factor の機能を使うと諸量間の位相関係が一目で良くわかり現象理解に役立つので利用して戴きたい機能です。



以上で意図した間歇一線地絡発生用スイッチが作れたので、今後この Valve (Type11)と TACS 信号 SIG の組み合わせを使って間歇一線地絡のシミュレーションをして行きましょう。

尚、SIG1 と SIG2 の信号は地絡発生時点を示す指標として便利なため、プロット波形中にしばしば表示しています。その場合大きさは他の量との関係で見やすいように適当な倍数(上図では 20 倍)を乗じて拡大し且つあまり邪魔にならないように Offset して表示して行きます。

### 3 インダクタンス分が存在しない場合の非接地系統の間歇一線地絡現象

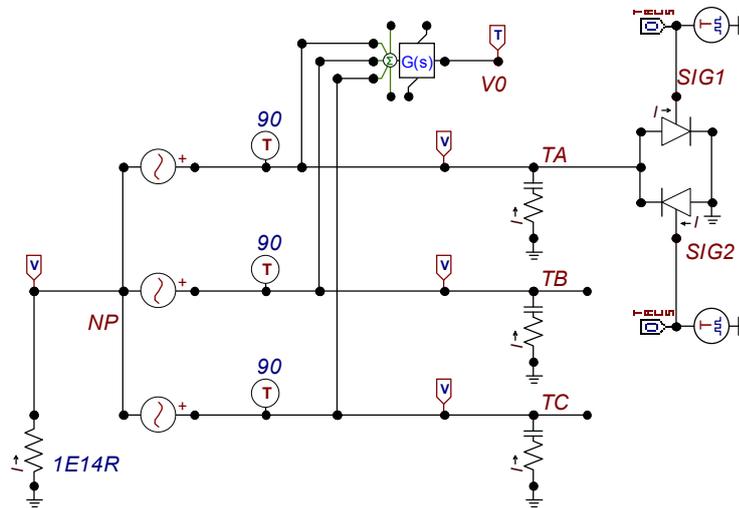
最初に対地キャパシタンスは存在するがインダクタンス分が存在しない非接地系統の間歇一線地絡現象について検討してみましょう。

対地キャパシタンスが存在する非接地系統で間歇一線地絡が発生すると健全相電圧が **Build up** して行く場合があるとされています。この単純化した回路を使って地絡時発生する零相電圧および各相電圧がどのようになるか考察してみましょう。

この検討の狙いはこの簡単な回路で基本的なところを押さえ次のインダクタンス分が存在する時の検討準備をする点にあります。

対地キャパシタンスとしては線路に存在する漂遊キャパシタンスや、サージアブソーバ用のキャパシタンス、発電機の巻線の対地キャパシタンス、発電機に接続された変圧器巻線の対地キャパシタンス、ケーブルの対地キャパシタンスなどが該当しますね。

#### 1) 検討回路



#### 2) 検討回路図の説明

中性点回路の 1E14R の抵抗は抵抗値が  $1 \times 10^{14} \Omega$  の抵抗で、これにより事実上この系統を非接地系統にしています。

三相電源はフローティングメニューの Sources → AC Ungrounded で選択できる非接地形の単相電圧源 3 つを使用しています。この A 相電源への入力データは次のとおりで、電圧の最大値はわかりやすいように 100V としています。回路最高電圧が異なる場合は当該回路の最大値に置き換えることでシミュレーションできます。

B 相 C 相の入力データは次図から Pha (位相) だけを -120, -240 としています。

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Volts	100
f	Hz	50
Pha	Deg/Rad	0
A1		0
TStart	s	-1
TStop	s	1000

- 位相遅れ 0 度を表しています
- 0 は位相単位は度の単位の宣言です
- 電源は定常状態計算から生かすという宣言です

三相電源の右側の 90 と記したアイコンは TACS 信号源の一つで、このアイコンが接続された場所の回路電圧を取り込み、TACS に渡すものです。

この 90 番の信号源はフローティングメニューから TACS→Coupling to Circuit で呼び出せます。この信号源の入力データはデフォルト状態の内容で OK です。

Type 90 と入力すれば電圧を取り込み、91 と入力すれば電流を取り込みます

この電圧信号源 90 の右上にある G(s) と記されたアイコンは伝達関数ブロックのアイコンですが、ここでは TACS 系に取り込まれた三相電圧信号の和を取ってから 3 で除して三相平均値、つまり零相電圧を演算するために使っています。

(零相電圧の検出は中性点に電圧検出プローブを取り付けてノード NP の電圧として検出できませんが TACS 機能を使う練習としてこの演算回路を設けています)

TACS 系に取り込まれた三相電圧信号の和を取ってから 3 で除して零相電圧を求めるために Gain を  $1/3=0.33333$  としています。

この G(s) のアイコンはフローティングメニューから TACS→Transfer functions→General で呼び出せます。

デフォルトで  $N0=N1=D0=D1=1$  になっていますが、この内の N1 と D1 の 1 は 0 に上書きします。

N と D の意味はそれぞれ Numerator(分子), denominator(分母)の略です。

Gain も 1 から 0.33333 に上書きします。

その結果デフォルトの伝達関数は次のように変更され、入力信号を加算して 3 で除した結果が得られるようになります。

変更前		変更後	
$\frac{1+s}{1+s} \cdot 1$	⇒	$\frac{1}{1} \cdot 0.33333$	結果として入力電圧の和に 0.33333 を乗じて零相電圧が得られます

この伝達関数ブロックの出力信号の名前は零相電圧なので V0 としています。

このブロックで三相電圧の和が取れるのは、このブロックはブロックの左側の五つの入力端子に入った入力信号のすべての和を取るよう設計されているからです。

90 番の電圧信号の右にある V と記したアイコンは回路電圧の Probe です。入力内容はデフォルトの内容でかまいません。

C-R 直列回路はこの例題の核心部分で対地キャパシタンスと数値振動抑制用抵抗を表しています。

キャパシタンス値は  $0.31 \mu F$  としています。

数値振動防止用の推奨される標準の抵抗値は  $K_s=0.1$  から  $0.2$  です。

これに相当する抵抗値はキャパシタンスの Help から次のようになります。

(フローティングメニューから Branch Linear→Capacitor を呼び出し、Help を見れば  $K_s$  の解説が現れます)。推奨される数値振動防止用抵抗値は

$$R_s = K_s \frac{\Delta t}{2 \cdot C}$$

で与えられます。  $\Delta t$  は計算刻み時間で、本稿の例では  $1E-7$  sec. です。

よって数値振動防止用抵抗値は  $0.1 \times \frac{1E-7}{2 \times 0.31E-6} = 1.613 \Omega$  から  $0.2 \times \frac{1E-7}{2 \times 0.31E-6} = 3.226 \Omega$  が推奨される振動防止の抵抗値になります。

本稿では数値振動防止用ダンピング抵抗を推奨値内の  $1.62 \Omega$  を採用しています。

尚、上図のキャパシタンスが次図の振動防止付きのキャパシタンスになっていないのは特に意味はありません。たまたま RLC 直列回路を使って表現しているだけです。



(数値振動防止抵抗付きキャパシタンスと RLC 直列回路のどちらが使い勝手が良いかという計算刻み時間を変えて何回か計算する場合は数値振動防止用抵抗付きキャパシタンスを使った方が、計算刻み時間に連動してダンピング抵抗値が前ページの式のように自動的に変わるので便利です。尚、RLC アイコンで R=1.62,C=0.31, L=0 と入力すればアイコンは自動的に R-C 直列のアイコンに変わります。)

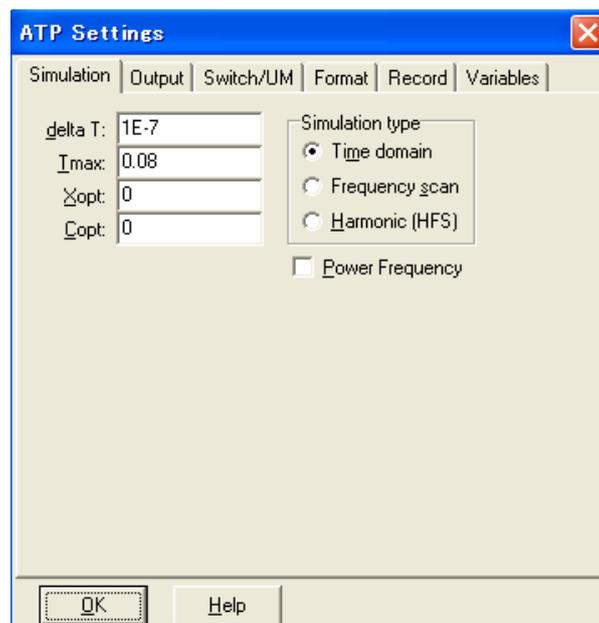
ノード TA に接続されている Valve (Type11)とこのスイッチの制御信号 SIG1,SIG2 の回路は既に紹介した内容と同一のものです。

回路図の説明は以上です。

このプロジェクトファイルの名称は R-C\_cir\_intermit\_1LG.acp と名づけています。

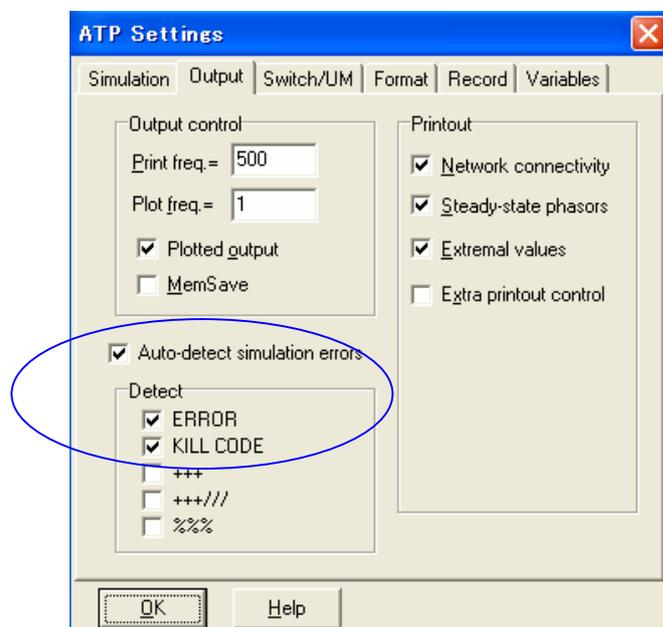
### 3) 計算条件

次のように設定しています。



尚、Output タグのところで次図でマークアップしたようにチェックを入れておくと計算後 .lis ファイルを見に行かなくても、エラーが発生していれば自動的に画面上にエラー内容を表示してくれるので便利です。

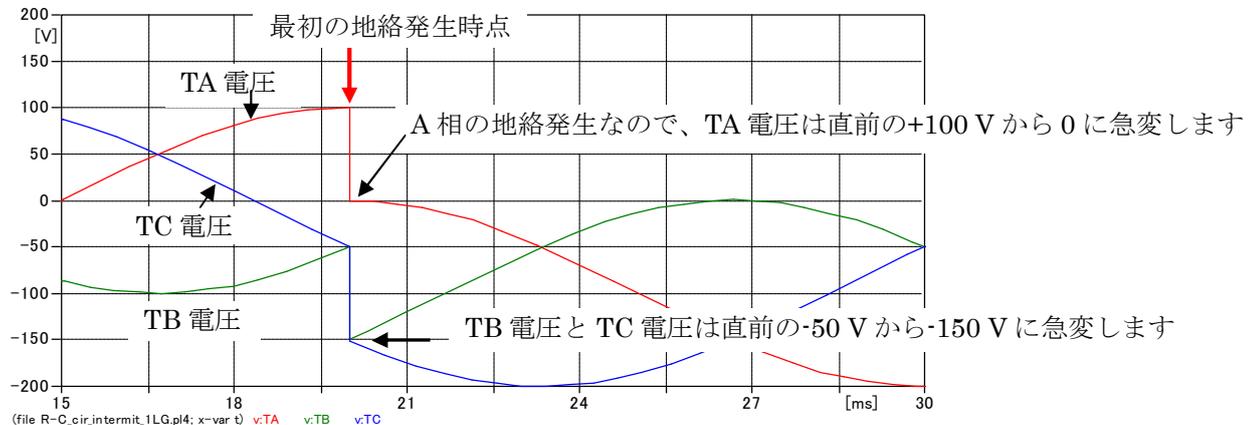
チェックを入れた二つは特に重大なエラーメッセージです。



もしこの設定をしない場合は計算終了後 R-C\_cir\_intermit\_1LG.lis ファイルを開き、エラーメッセージが出ていないことを確認しましょう。

#### 4) 計算結果と考察

ATP の計算結果を図示します。



この計算結果についての説明は次のようになります。

TA 相電圧が地絡発生で 0 V になるのはノード TA と大地間に何もインピーダンスを入れていない完全地絡のためです。

TB の電圧と TC 電圧が -50 V の値から地絡直後 -150 V に急変しているのは次の理由によります。A 相の  $V_{TA}$  が +100 V から 0 V に急変しますが A 相の誘起電圧は不変ですから、100V 分中性点電圧が押し下げられて低くなります。中性点側導体は非接地ですから、0 V に保たれることなく A 相の地絡で 100V 押し下げられて低くなり、B 相、C 相に伝えられます。このため B 相電圧  $V_{TB}$ 、C 相電圧  $V_{TC}$  は直前の -50 V の値から 100 V 下がり、 $V_{TB} = V_{TC} = -50 - 100 = -150$  V に急変します。

地絡中 TA 電圧は 0 V に保たれるので  $V_{TB}$ 、 $V_{TC}$  は -100 V 並行移動した波形になります。

そして TB、TC 電圧のマイナス側の最大値は -200 V になり、地絡が発生していない時の TB、TC 電圧の -100 V Peak よりも絶対値は大きくなるのです。

地絡後 B 相、C 相電圧の絶対値がこのように大きくなるのは A 相の地絡電流が B 相、C 相の対地キャパシタンスを經由して流れて B 相、C 相の充電電圧を大きくするからですが、上述の説明のように電流を使わず地絡相の電圧変動が中性点側導体を通して B、C 相に伝わるといふ考え方は電圧の Build up 現象を概略検討する時現象を説明しやすいものにします。以下の説明でもこの説明で行っています。

上図の計算結果で次の点は特に注目しておきたい点です。

それは B 相電圧  $V_{TB}$ 、C 相電圧  $V_{TC}$  及び零相電圧が地絡発生後直ちに振動せずに最終値になる点です。これは回路インピーダンスが R-C 直列インピーダンスのため印加電圧とバランスするように電流が直ちに流れるためですが、回路にインダクタンス分が入るとこれらを通る電流は瞬時変化できないので電圧は瞬間的な変化はできず又回路の固有振動数で高周波振動しながら時間をかけて増加するようになります。そしてこの振動が電圧 Build up 現象に深く関わってきます。詳細は「4 インダクタンス分が存在する時の間歇一線地絡現象」で解説します。

さて地絡後の三相電圧の変化を零相電圧で説明すると次のようになります。

地絡発生直後回路が非対称になるので零相電圧が生じます。

零相電圧は三相電圧の相加平均値として求められるので、

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_{TA} + V_{TB} + V_{TC}) = \frac{1}{3}(0 - 150 - 150) = -100 \text{ V}$$

となります。つまり回路電圧が非対称三相電圧になると直ちにこれら三相電圧の相加平均値の-100Vの零相電圧が各相の零相回路である対地キャパシタンスに発生し、各相電圧に重畳することになります。

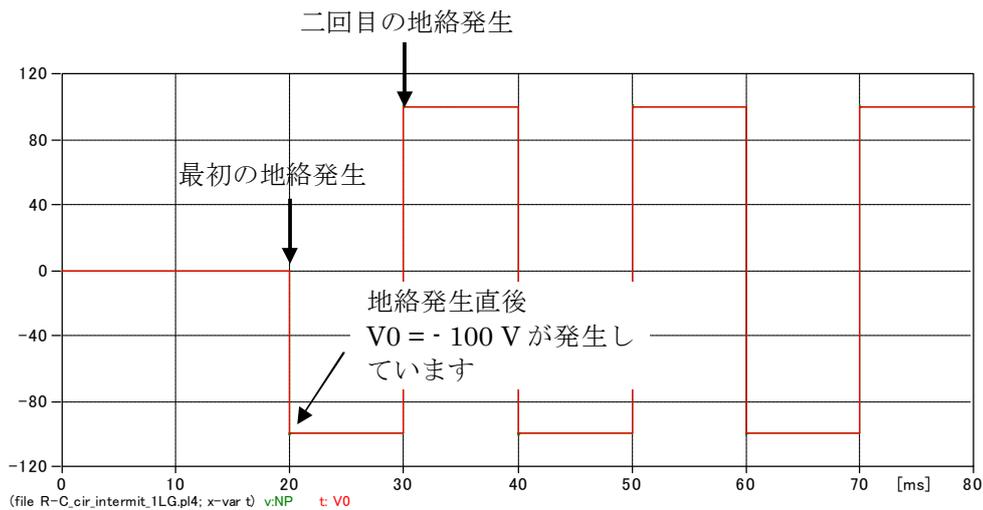
この零相電圧は中性点が非接地のため放電回路が存在しないので、-100Vのまま次の地絡まで残留します。

この零相電圧は各相に含まれるので、各相の電圧を-100 V 平行移動するので、上図に示す如く地絡後から次の地絡まで三相電圧はこの-100 V の零相電圧を中心に变化するようになります。

$V_{TB} = V_{TC} = -150 \text{ V}$  になるのはもとの-50 V にこの-100V の零相電圧が重畳するためと考えても良いですね。

零相電圧の計算結果は次図のようになります。

地絡発生直後の 20 msec. で-100 V の零相電圧が発生し、その後零相電圧は二回目の地絡発生まで-100 V の一定値に保たれ、その後の地絡でも零相電圧の Peak 値は間歇一線地絡の継続と共に漸増することなく、±100 V で一定で、キャパシタンスと抵抗だけの場合には電圧の Build up 現象にはなりません。このように変化する理由は以下に順次説明します。



零相電圧が二回目の地絡発生まで-100 V の一定の零相電圧に保たれる理由は零相回路に放電回路が無いからです。次項でこの点をもう少し詳しく説明します。

### 5) 二回目の地絡発生まで-100 Vの零相電圧が保たれる理由

線路と大地間の零相インピーダンスである R・C 直列回路を中性点に纏めてみましょう。  
 今、R・C 直列回路 3 回路分の並列合成零相インピーダンスを  $Z_{3rc}$  とします。中性点を非接地にするため挿入した  $1E14 \Omega$  の抵抗は  $R_0$  とします。

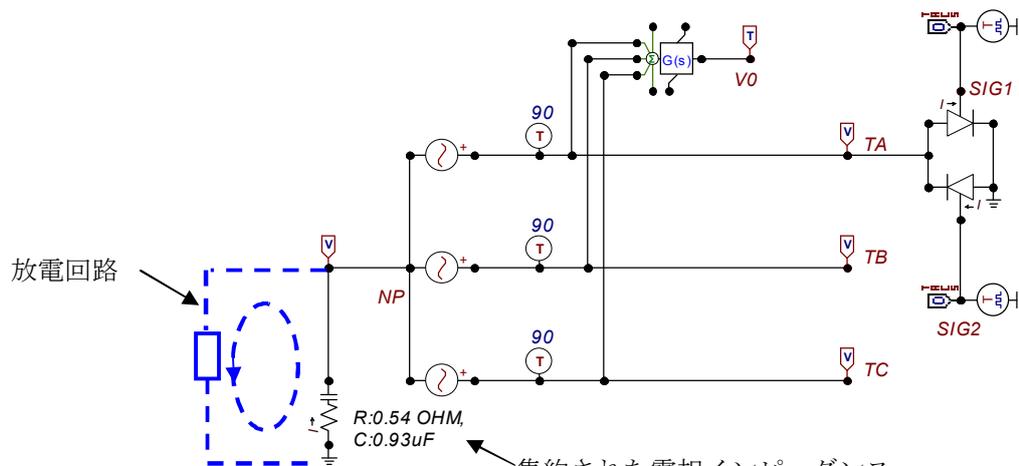
すると回路全体の零相インピーダンス  $Z_{0total}$  は

$$Z_{0total} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{3rc}} + \frac{1}{R_0}} \quad \text{になります}$$

ここで  $\frac{1}{R_0} = \frac{1}{1 \cdot E14} \approx 0$  なので、 $Z_{0total} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{3rc}} + \frac{1}{R_0}} \approx Z_{3rc}$  となります

$$Z_{3rc} \text{ の値は } Z_{3rc} = \frac{1}{3}R - j\frac{1}{3 \cdot C \cdot \omega} = \frac{1.62}{3} - j\frac{1}{3 \cdot 0.31E-6 \cdot \omega} = 0.54 - j\frac{1}{0.93E-6 \cdot \omega} \quad \text{になります。}$$

つまり次図の如く零相インピーダンスである抵抗  $0.54 \Omega$  とキャパシタンス  $0.93 \mu F$  を中性点に接続すれば元の回路と等価な回路になります。



集約された零相インピーダンス。  
 地絡によりキャパシタンスは充電されますが充電された電荷を放電する左の点線で示す閉回路が無いので次の地絡まで零相電圧は充電状態に保持されます

上図で A 相の地絡電流がこの零相インピーダンスに流れて零相回路に電圧が発生します。零相電圧の発生です。

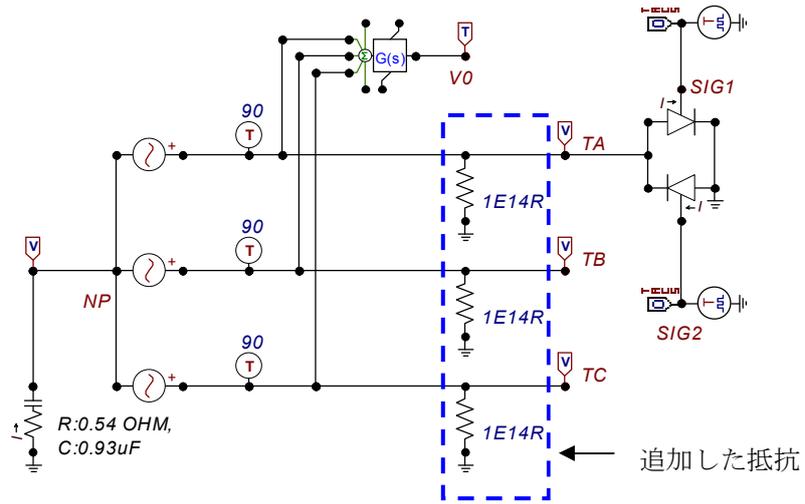
ところが上図からわかるとおり、地絡回復しても地絡電流で零相キャパシタンスに充電された電荷の放電回路が次の地絡発生までありません。

このため地絡回復しても零相電圧は次の地絡までそのまま残ります。

これが 20 msec.から 30 msec.の間零相電圧が一定で推移する理由です。二回目以降の地絡でも  $\pm 100 V$  一定になるのも同じく放電回路が存在しないからです。

(ご参考)

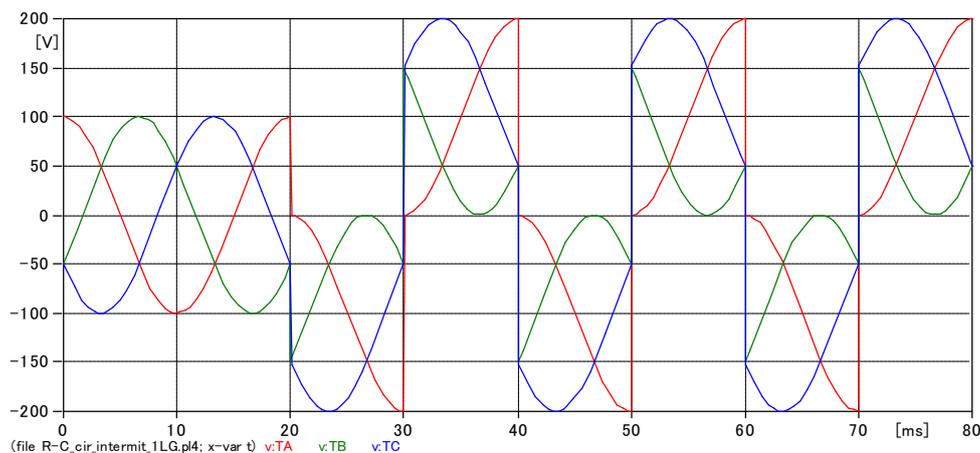
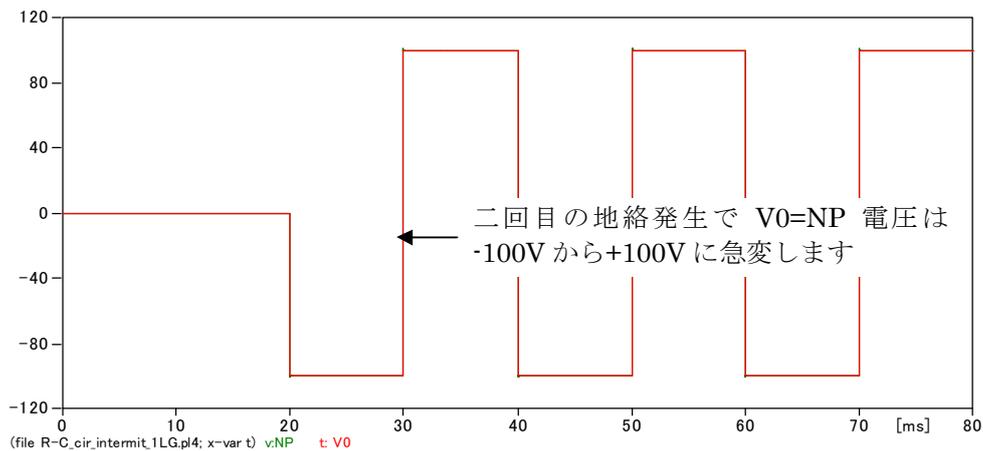
尚、上図の零相等価回路はこの図のとおり ATPDraw で作成して走らせても、電源ノードにブリランチ回路が何も接続されていないのは ATP のルールで許容されていないのでエラーになってしまいます。解決策は次図の如く回路と大地間に計算結果に影響がでないように極めて大きな抵抗を挿入すれば走ります。次図の挿入抵抗値は  $1E14$  です。



## 6) 二回目以降の间歇一線地絡時の回路電圧

次に 30 msec. で発生する二回目の地絡時の電圧の動きについて説明します。

R-C\_cir\_intermit\_1LG.acp の间歇一線地絡時の零相電圧と各相電圧の計算結果を再掲します。30 msec. で零相電圧は次図に示すように -100 V から +100 V に急変し、このため次図下段のように三相電圧は -100 V の零相電圧を中心に振動する状態から +100 V の零相電圧で振動するように急変しています。



なぜこのように零相電圧が -100V から +100V に急変するかという理由は次のとおりです。二回目の地絡直後、TA 電圧は地絡発生なので -200 V から 0 V に 200 V 急増します。つまり TA 電圧は 200 V 高く押し上げられるので、この変化は非接地系なので中性点から B 相、C 相にそのまま伝わり、TB 電圧、TC 電圧は直前の -50 V から -50 V + 200 V = -150 V に急変します。

この地絡発生直後の零相電圧は

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_{TA} + V_{TB} + V_{TC}) = \frac{1}{3}(0 + 150 + 150) = +100 \text{ V}$$

となり、+100 V の零相電圧になるので、上図上段の零相電圧のとおり -100V から +100V に急変します。この点は後述する C,L,R が存在する回路と大いに異なっています。インダクタンスを含む回路で過渡振動を発生する条件では 4 項で後述するように電圧は振動する時オーバシュートして約二倍の電圧まで到達し、これが電圧の Build up 現象に関係します。

キャパシタンスに充電された零相電圧は放電回路が無いのでそのままの値で次の地絡まで留ま

ります。

TA, TB 電圧は上図の下段に示す如く、この零相電圧の+100 V を中心にして次の地絡発生まで商用周波数で振動します。したがって TB, TC 電圧の最大値は+200 V となり、地絡発生で健全相電圧は地絡が発生していない時の 2 倍の大きさになります。

以降の間歇地絡でもこの繰り返しとなるので零相電圧は±100 V より大きくなりならず TB, TC 電圧の絶対値も 200 V Peak を超えて Build up することはありません。

### 7) 二回目の地絡時、直前の-100 V から +100 V にほんとうに急変するのか

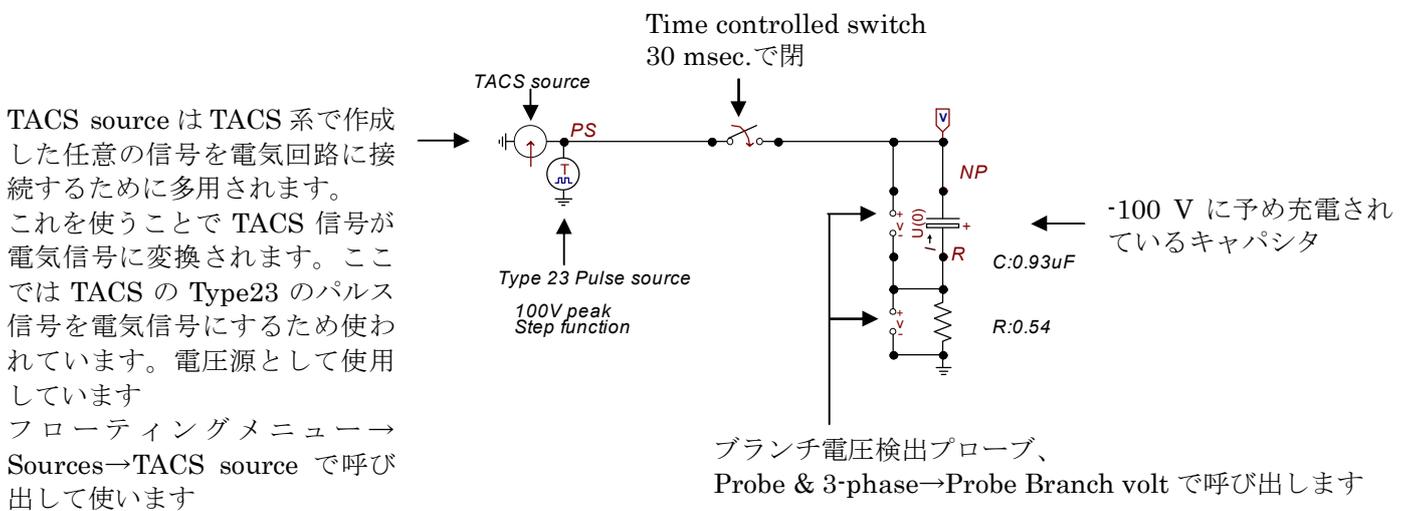
初回の地絡で零相キャパシタンス電圧が-100 V に充電されていたのに、二回目の地絡発生で +100 V に本当に急変するのか、キャパシタンスの充放電に関する現象であるから時間がかかるのではという疑問が湧くかも知れません。

この点について説明します。

R-C\_cir\_intermit\_1LG.acp から集約した零相回路を取り出し、零相キャパシタンスが最初-100 V Peak に充電されている状態で、それに+100V Peak の直流電圧(+100 V の零相電圧を模擬しています)を、スイッチを 30 msec. で閉じた時の回路電圧の応答を検査すれば上記の疑問に対する検討になるのでこれを検討してみましょう。

検討回路は次図です。

(下図は TACS の機能紹介を兼ねて+100 V の直流電圧を TACS で構成する例で示しています。簡単にやるならスイッチの左側を+100 V の直流電圧で置き換えれば同じ結果になります。)



上図の Type23 パルス信号源の入力データは次のとおりです。

DATA	UNIT	VALUE
Ampl.		100
T	s	2
Width	s	1
T_start	s	0
T_stop	s	1000

TACS source の入力データはデフォルト状態の、次のとおりです。

DATA	UNIT	VALUE
TStart	s	0
TStop	s	1000

Time controlled switch のデータは次のとおりです。

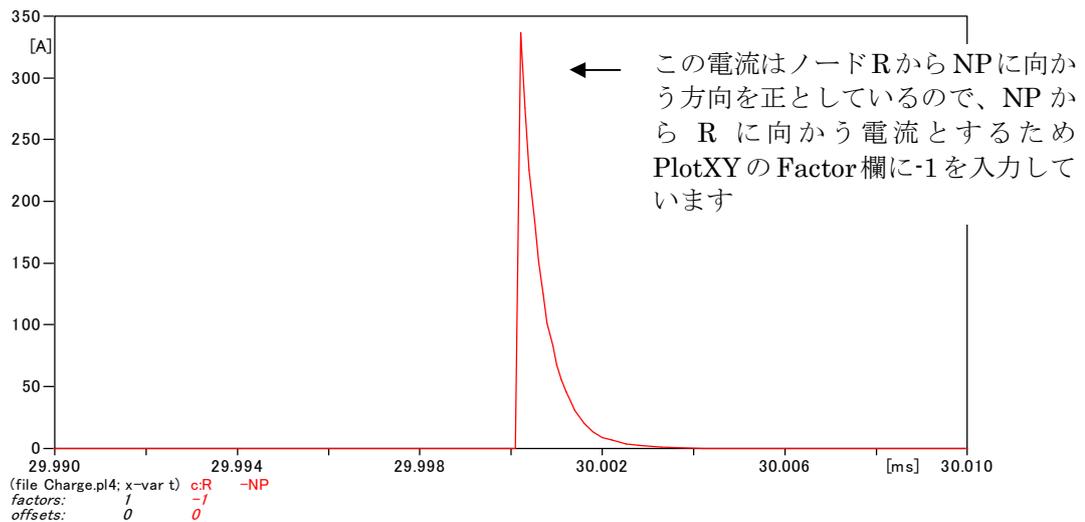
DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	0.03
T-op	s	1000
Imar	Amps	0
3-ph	0/1	0

キャパシタンスは初期状態で充電されているのでそれ用のキャパシタンスを使います。  
これはフローティングメニューから **Branch Linear**→**C:U(0)**を選択します。  
入力データは次のとおりです。

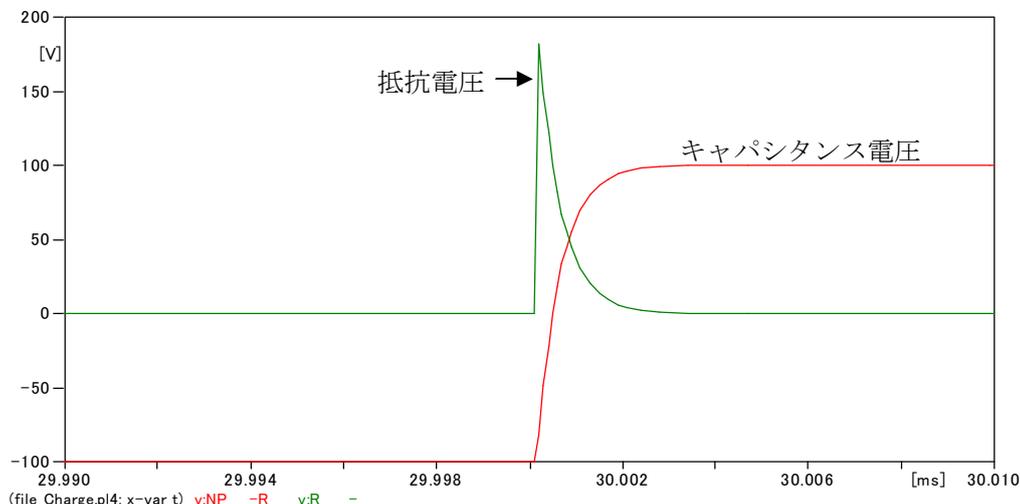
DATA	UNIT	VALUE
C	uF	0.62
U(0)+	Volts	50
U(0)-	Volts	-50

計算刻み時間は  $1E-7$  sec.としています。

地絡発生用の Time controlled switch を  $t = 30$  msec.で閉じると回路には次図の如く直ちに大きな充電電流が流れ、その後  $C \cdot R$  の時定数で減衰します。

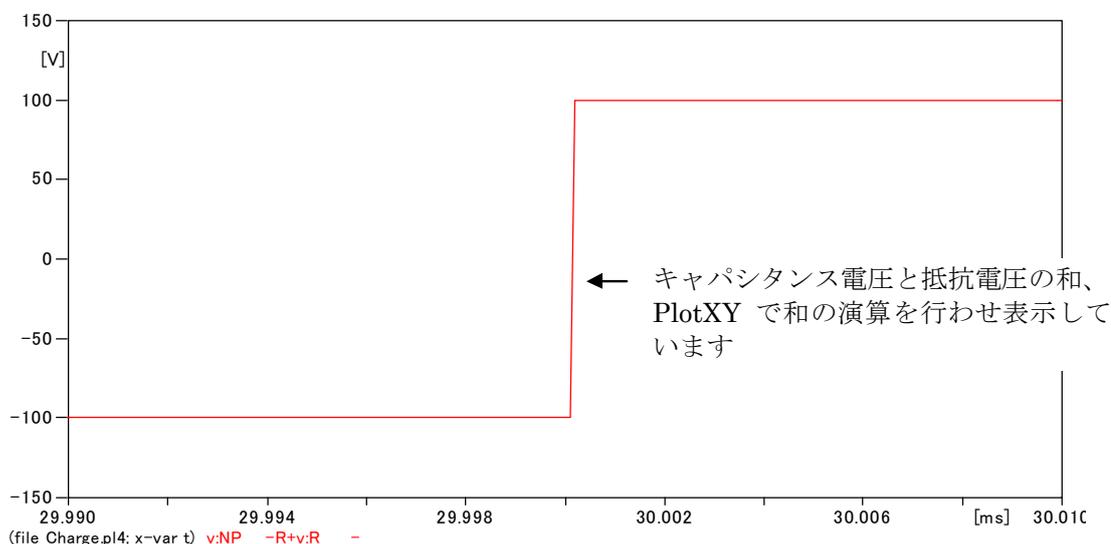


この充電電流が流れて発生する零相のキャパシタンス電圧と抵抗電圧は次図のようになります。抵抗電圧は充電電流と相似の波形になり、キャパシタンス電圧は-100 V から放電を開始し 0V で放電を完了した後、逆極性の+100 V に充電されて行きます。この変化は次図のように時間をかけて変化します。



零相電圧はこれらキャパシタンス電圧と抵抗電圧の和ですから、これらの和のプロットを PlotXY で作成すると次図のようにスイッチを閉じた瞬時に-100 V から+100 V になり、R-C 直列回路の電圧は瞬時に電源の印加電圧とバランスします。(印加電圧にバランスする逆起電力が発生するように大きな充電電流が流れるのですね)

このように抵抗電圧とキャパシタンス電圧は時定数の指数関数で変化しますが和を取れば結果として瞬時に電圧が-100 V から+100 V に急変するようになります。



スイッチが閉じられると同時に零相電源電圧と NP 電圧は同電位になりますから-100 V から+100 V になるのは当然の話ですね

尚、元の零相回路には非接地系にするため 1E14 の大きな抵抗がありました、これを考慮しても 0.54Ω の抵抗値が等価的に 0.5399999999Ω のレベルになるだけで、その影響は無視できるのでこの例では無視しています。

### 8) PlotXY でキャパシタンス電圧と抵抗電圧の和をプロットさせる方法

PlotXY でキャパシタンス電圧と抵抗電圧の和をプロットさせるには次図の①から④の順番に操作すればできます。

①最初にこのボタンを押して演算の内容を指定します

②和を取る量を連続して指定します。ここでは最初に  $V:TR - R$  (キャパシタンス電圧) をクリックし、引き続き  $V:R -$  (抵抗電圧) をクリックします

③②の指定結果が表示されます

④プロットボタンを押せば両者の和の波形が表示されます

#	File Name	# of vars	# of Points	Tmax
x 1	Charge.pl4	5	800001	0.08

Variable	#	Factor	Offset
t	a	1	0
v:TA -R+v:R	1	1	0

### 9) インダクタンス分が存在しない場合の非接地系統の間歇一線地絡現象のまとめ

a. インダクタンス分が存在しないと、間歇一線地絡時に零相電圧の大きさは初回の地絡で決まる大きさに保たれ間歇地絡が継続しても電圧の Build up 現象は発生しません。

b. 初回の地絡で決まる零相電圧が地絡回復後から次の地絡発生まで一定に保たれるのは、零相回路キャパシタンス (対地キャパシタンス) の放電回路が非接地のため、存在しないことに起因しています。

c. 初回の地絡で零相電圧が大きくなるのは地絡相が地絡することで発生する電圧変動が中性点導体を伝わり、健全相電圧に重畳するためです。この零相電圧が大きくなるメカニズムはインダクタンス分を含んだ回路の電圧 Build up 現象を説明する時にも適用されます。

#### 4 インダクタンス分が存在する時の間歇一線地絡現象

インダクタンス分とキャパシタンス分が共に存在する非接地系回路の間歇一線地絡になると電圧 Build up 現象が発生するようになります。

ここでは前項の検討回路に更にインダクタンス分と抵抗分を追加して電圧 Build up 現象を検討して行きましょう。追加するのは発電機の初期過渡リアクタンスに相当するインダクタンス値 1.21 mH と発電機巻線抵抗に相当する抵抗値 0.003988 Ω です。

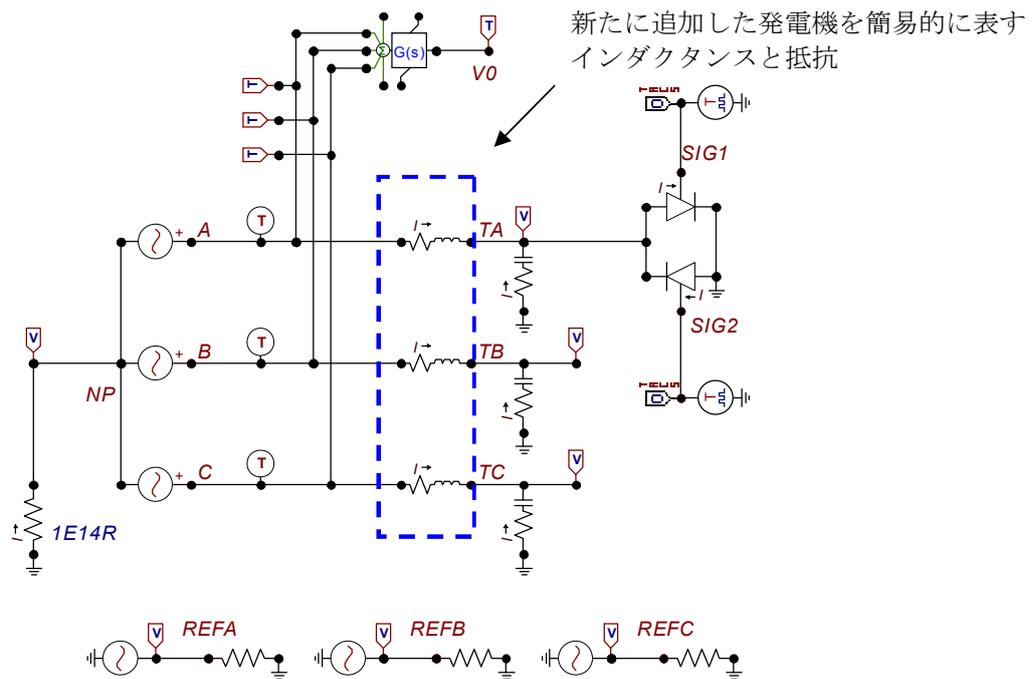
検討回路を次図に示します。

次図の点線で囲んだ R-L 直列回路が追加されたインピーダンスです。その他の回路定数は R-C\_cir\_intermit\_1LG.acp と同一です。

尚、発電機をこれらの定数を使って簡易的に表す方法のほか、ATP には Type58 や type59 の Park の式を使った同期発電機モデルが用意されていますのでそれらを使って更に詳細に検討することもできます。

尚、次図の検討回路は非接地の発電機に無負荷状態の発電機主回路が接続された状態や非接地の変圧器に接続された無負荷回路で発生する間歇一線地絡現象の検討する場合の回路に相当します。

#### 1) 検討回路



この図の最下段に設けた三つの単相電圧源は上段の三相回路のものと同じ位相、大きさを持った電圧です。以下の間歇一線地絡の検討過程で地絡が発生していない時の回路電圧をしばしば参照したい時があるのでこの電圧回路を設けています。例えば REFA とは間歇地絡が発生していない健全時の TA 電圧に相当します(厳密には充電電流による R-L 回路の電圧降下がありますが微小で無視できます)。

## 2) 計算条件

計算時間刻みは高周波振動電圧波形の詳細を観察するため  $1E-7$  sec. と細かくしています。  
計算時間は 0.2 sec. としています。

## 3) 計算結果の概要

### 3.1) TA, TB, TC 電圧の計算結果

説明はこれから行うとして最初にノード TA, TB, TC の各電圧と回路に現れる零相電圧の計算結果を次図に示します。次図の下部のパルス状の信号は SIG1 と SIG2 の信号で、これらの信号が立ち上がっている時点で地絡が発生しています

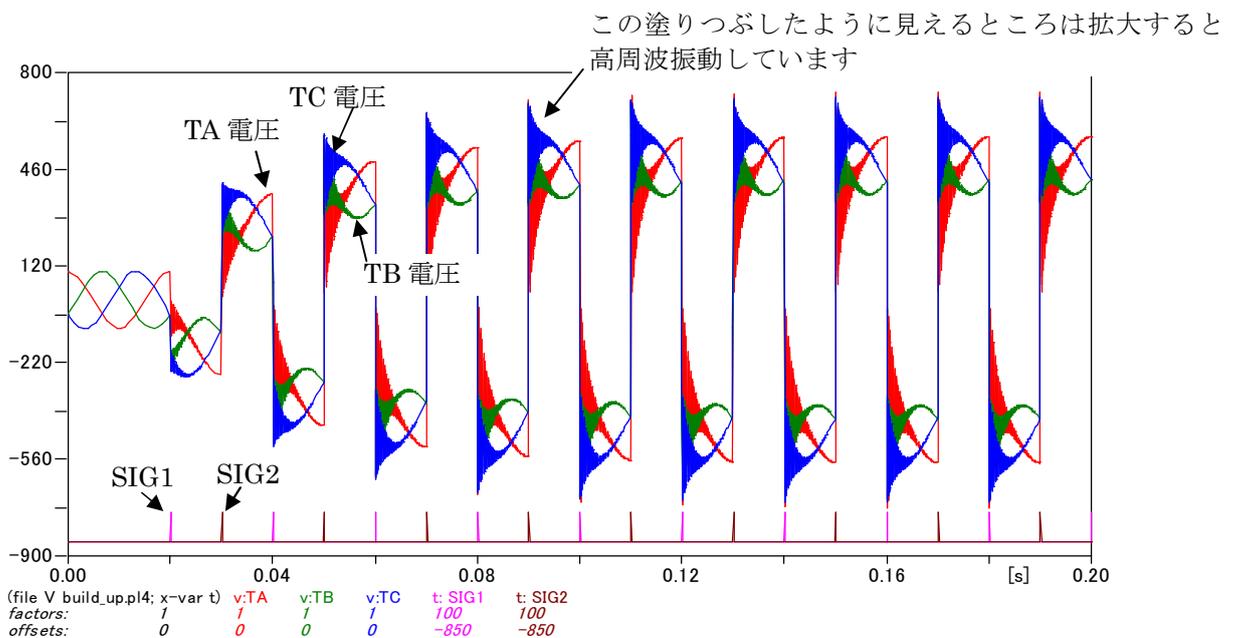
この計算結果の注目すべき点は次の四点です。

①地絡が発生してから次の地絡が発生するまで、三相電圧は最初の地絡でマイナス側へ、次の地絡でプラス側へ、更に次の地絡で再びマイナス側へと平行移動した形になっています。これは後で説明しますが零相電圧が重畳したためこのように平行移動した形になるものです。零相電圧が振動の中心電圧になります。

②地絡の発生都度、TA, TB, TC 電圧は高周波振動しています。この振動が実は電圧の Build up に深く関わっていて、極めて大事な点です。詳細は後述いたします。

③地絡相の TA 電圧も地絡の発生都度、漸増して行き、やがて大きさは飽和傾向になります。地絡相電圧は大きくならないと誤解しやすいですが、このように間歇一線地絡では上昇します。注意したい点です。

④健全相の B 相、C 相の TB, TC 電圧も地絡発生都度、漸増しやがて大きさは飽和傾向になります。つまり間歇一線地絡が続いても TB, TC, それに TA 電圧も無限大に大きくならないで大きさは或る一定値に収束します。



### 3.2) 零相電圧の計算結果

零相電圧の計算結果を次図に示します。この計算結果の注目すべき点は次の二点です。

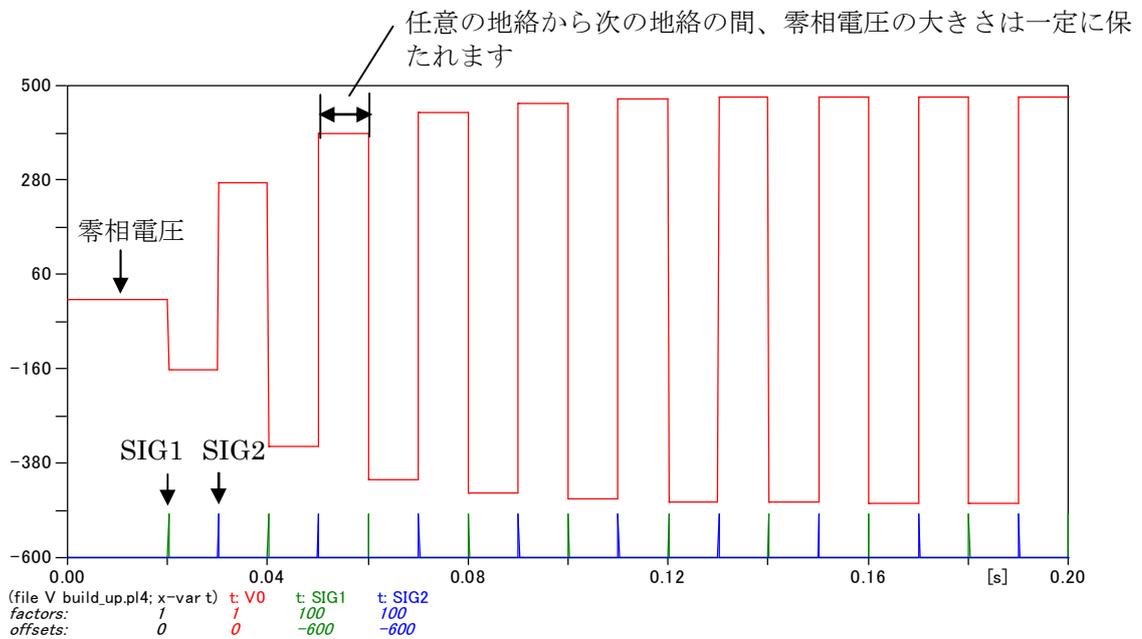
① 最初の地絡が回復し次の地絡発生するまでの間、零相電圧の大きさは一定に保たれます。詳細は後述しますがこのように零相電圧が次の地絡発生まで減衰しないのは大変問題で、非接地系の間歇一線地絡で各相電圧が **Build up** して行く要因になっています。

② 零相電圧の大きさは先の R-C\_cir\_intermit\_1LG.acp では地絡の繰り返しにかかわらず ±100 V の一定値でしたが、この場合は最初の地絡から早くも絶対値は約 160V 以上になっていて、地絡を繰り返すごとに次図のようにステップ状に漸増して行き、やがて飽和し一定値に収束します。

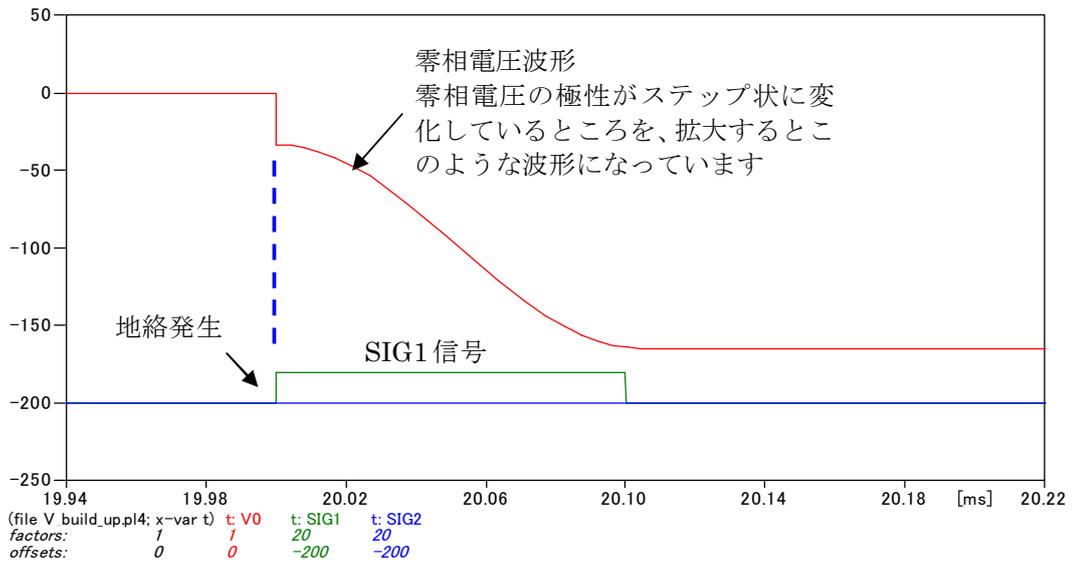
最大収束値については後述致します。

零相電圧は各相の電源電圧に重畳するので、間歇一線地絡が持続している間、各相電圧の大きさも漸増しやがて一定の大きさに収束します。

但し、地絡回復から次の地絡発生までに地絡相の過渡振動が減衰していないとこのように漸増せず途中で零相電圧が急増する場合があります。その例は「7 地絡相の電圧振動が次の地絡発生まで収束しない場合、発生零相電圧は 5 PU を越える」で解説しています。



尚、上図で零相電圧はステップ状に漸増すると言いましたが、時間軸を拡大して表示すると次図の波形になっています。次図は最初の地絡の発生、回復時の零相電圧の部分を表しています。他の時点の地絡時の零相電圧を拡大しても、このように変化していて厳密にはステップ状の変化ではありません。このように変化する理由については後述の 4) f で説明します。



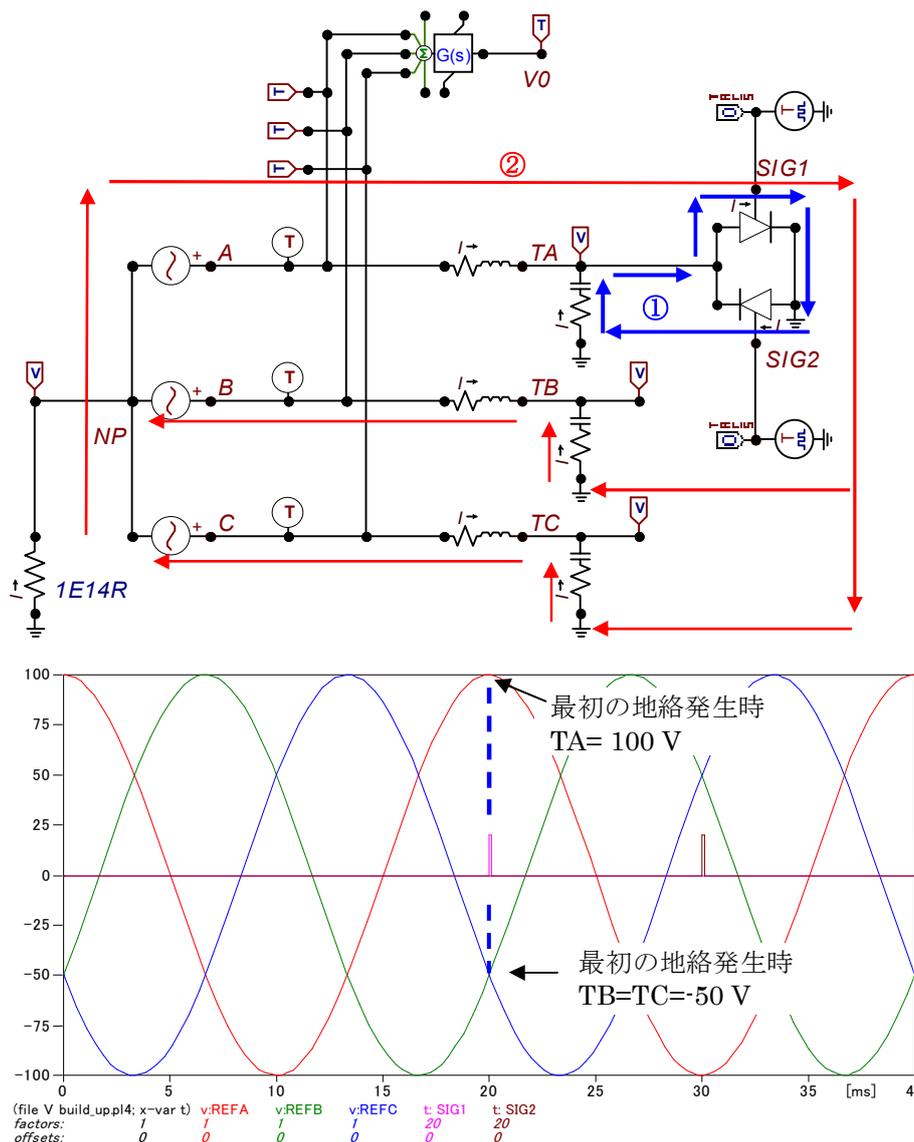
#### 4) 計算結果の詳細考察

##### 4.1) 最初の地絡時の現象

最初の地絡発生時に流れる電流ルートを検討してみましょう。  
 この目的は、二つあって一つは間歇地絡時と地絡回復後の電流ルートを知り、TB 電圧、TC 電圧の電圧上昇は地絡電流が流れることによることを理解するためです。  
 二つ目は電圧 Build up に過渡振動が深く関わっているので取り敢えず過渡振動周波数を算出するためです。電流ルートがわかればそのルートの回路定数から地絡発生時に発生する過渡振動周波数を算出できますからね。  
 地絡発生と地絡回復後では電流の流れるルートが異なって来ることを以下に説明します。

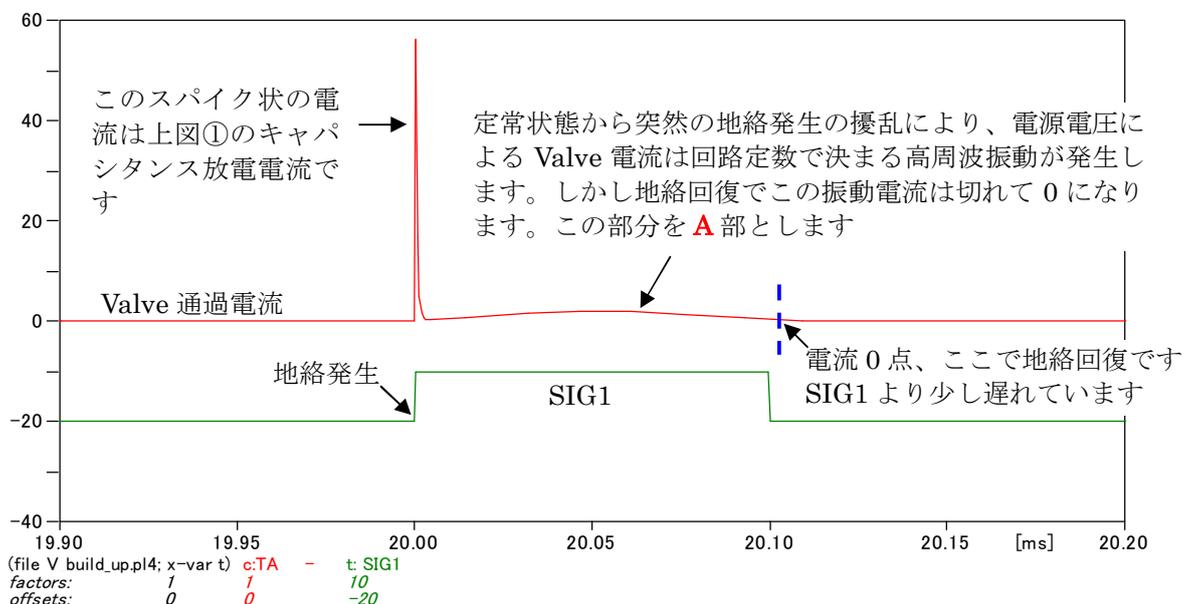
##### a. 地絡発生から回復までの各相回路電流の流れ方

計算開始後 20 msec. の A 相の+最大電圧のタイミングで地絡が発生するように TACS で組んでいるので、この条件で最初の地絡が発生します。  
 地絡が発生する直前、A 相の対地キャパシタンスも+の最大電圧に充電されていて、地絡発生と同時に次図①で示すルートで A 相のキャパシタンスの放電電流が流れます。  
 同時にこの放電電流に赤矢印の②のルートで電源電圧による電流が重畳して流れます。  
 地絡直前の TA 相は最大電圧になっていて B 相電圧、C 相電圧よりも高い状態にあるので(次図の下段の図参照願います)、B 相電圧、C 相電圧と A 相電圧の電圧差でこのように流れるのですね。電源電圧による電流は TA と大地間の CR 回路には流れず、すべてインピーダンス 0 の Valve を通って B 相、C 相に流れます。



地絡電流は上図のルートで流れるので B 相、C 相対地キャパシタンスの充電電圧がそれぞれの電源電圧に重畳するので 3.1 で示したように TB,TC 電圧はマイナス方向に大きくなって行きます。

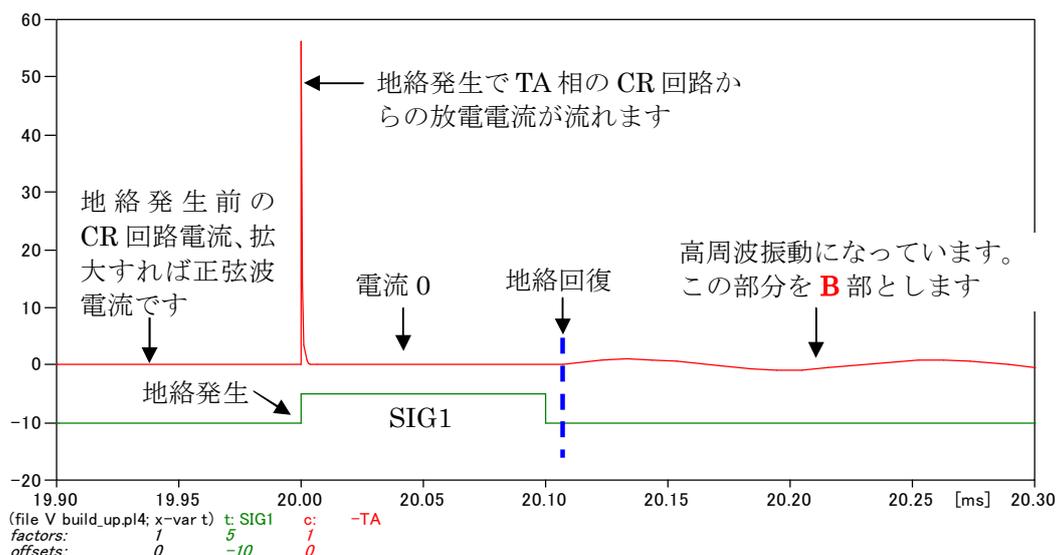
最初の地絡発生前後の Valve を流れる②の電流の計算結果と説明を次図に示します。



次に最初の地絡発生前後の期間で A 相の対地キャパシタンスを通る電流の計算結果は、次図です。地絡発生で TA の電圧は 0 になるのでキャパシタンスからの放電電流が①のルートで流れ込み、すぐ放電終了して、放電電流は 0 になり、地絡回復まで CR 回路は Valve で短絡されるので、CR 回路両端電圧が 0 になり CR 回路電流も 0(A)の状態が続きます。

地絡が回復すると電源電圧による A 相の CR 回路電流は次図 B 部の如く高周波振動電流になります。この振動周波数は A 部の振動周波数より高くなります。

理由は電流通過ルートが変わるので回路定数が変わるためですが詳細は第 4 項の 4.1) c.項の「地絡回復後の電流ルートと振動周波数、振動周期、過渡振動の減衰時定数」で示します。



**b. A 部の地絡発生中の振動周波数の検討**

A 部の電流が流れる時、電流ルートは②のルートの電流です。

発電機を表す抵抗値を  $r$ 、インダクタンスを  $L$ 、CR 直列回路のキャパシタンスを  $C$ 、抵抗を  $R$  とすれば、この時電源電圧で流れる回路の合成インピーダンスは A 相のインピーダンスに、B 相、C 相の並列インピーダンスを加えたもので次のようになります。

$$r + j\omega \cdot L + \frac{\left( r + R + j\left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \right)}{2} = \frac{3 \cdot r + R}{2} + j\omega \cdot \frac{3}{2}L - j\frac{1}{\omega \cdot 2 \cdot C}$$

これより合成抵抗分は  $\frac{3 \cdot r + R}{2} = \frac{3 \cdot 0.003988 + 1.62}{2} = 0.815982 \text{ } \Omega$ 、

合成インダクタンス分  $L_t$  は  $L_t = \frac{3 \cdot L}{2} = \frac{3 \cdot 1.21E-3}{2} = 1.815E-3 \text{ (H)}$

合成キャパシタンス分  $C$  は  $C_t = 2 \cdot C = 2 \cdot 0.31E-6 = 0.62E-6 \text{ (F)}$

回路全体は R-L-C 直列回路になり、これらの大小関係は

$R_t^2 - 4 \cdot \frac{L_t}{C_t} = -11708.9 < 0$  となるので回路に電氣的擾乱が与えられた時回路の電圧電流は振動します。(R-L-C 直列回路がいつも振動的になるのではなく、過渡現象のテキストなどに紹介されている如くこの関係が成立する時だけ振動するようになります。)

回路に擾乱が与えられた時の回路の固有振動数は

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_t \cdot C_t}} = 4744.451 \text{ (Hz)}$$

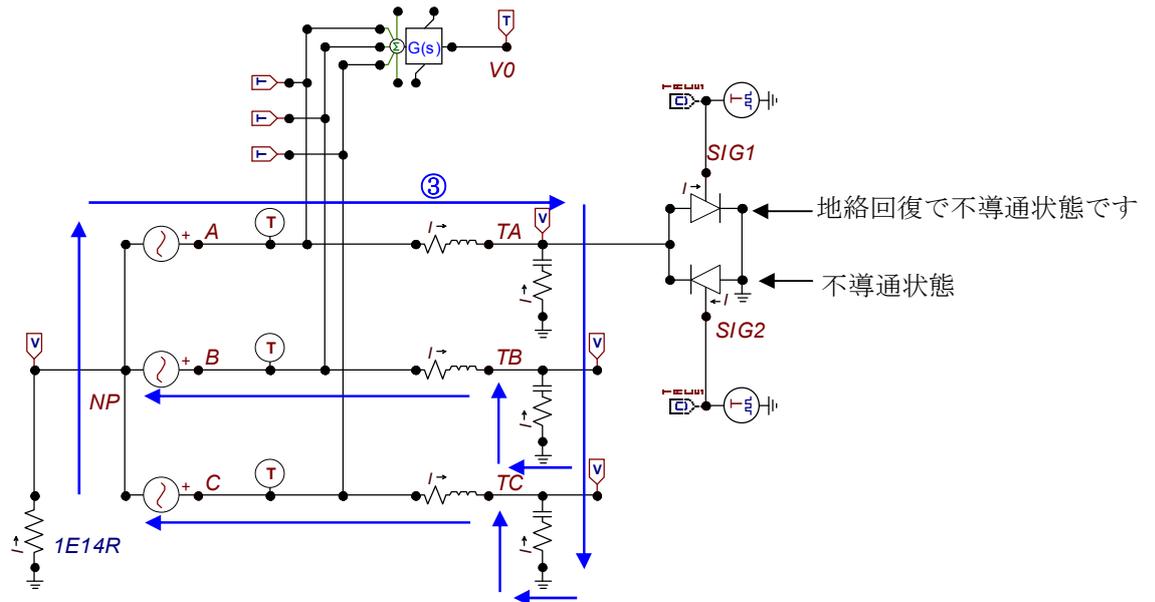
となります。

### c. 地絡回復後の電流ルートと振動周波数

地絡回復後の電流は地絡中とは異なり、下図の③の矢印のルートで流れ、A相のCR直列回路を  
通って矢印のように各相に流れるようになります。

この電流ルート変更によって回路定数が地絡時と異なって来るので振動周波数も前項の値から  
異なって来ますね。

この時点でもまだA相電圧がB相、C相電圧より高いのでA相の電流は次の如く流れます。



A相回路を流れる電流ルートのインピーダンスは次のようになります。

$$r + j\omega \cdot L + R - j \frac{1}{\omega \cdot C} + \frac{\left( r + R + j \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \right)}{2} = \frac{3 \cdot (r + R)}{2} + j\omega \cdot \frac{3}{2} L - j \frac{1}{\omega \cdot \frac{2}{3} \cdot C}$$

$$\text{これより合成抵抗分は } \frac{3 \cdot (r + R)}{2} = \frac{3 \cdot (0.003988 + 1.62)}{2} = 2.435982 \text{ } \Omega、$$

$$\text{合成インダクタンス分 } L_t \text{ は } L_t = \frac{3 \cdot L}{2} = \frac{3 \cdot 1.21E-3}{2} = 1.815E-3 \text{ (H)}$$

$$\text{合成キャパシタンス分 } C \text{ は } C_t = \frac{2}{3} \cdot C = \frac{2}{3} \cdot 0.31E-6 = 0.206667E-6 \text{ (F)}$$

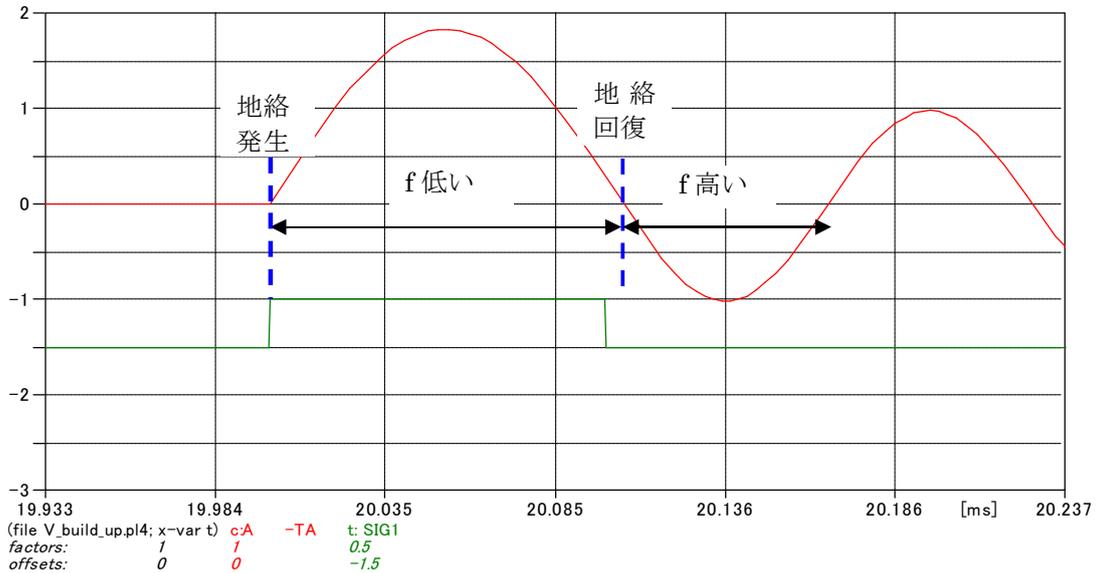
以上から回路に擾乱が与えられた時の回路の固有振動数は

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_t \cdot C_t}} = 8217.63 \text{ (Hz)}$$

となり、地絡中の固有振動数よりも高くなります。

ノード A からノード TA へ流れる地絡発生から地絡回復後の回路電流の計算結果を次図に示します。

この電流波形から高周波振動周期が地絡中と地絡回復後で異なり、地絡回復後の振動周波数の方が地絡中の振動周波数より高くなっているのがわかりますね。



#### d. 最初の地絡発生前後の TA, TB, TC ノード電圧の概要

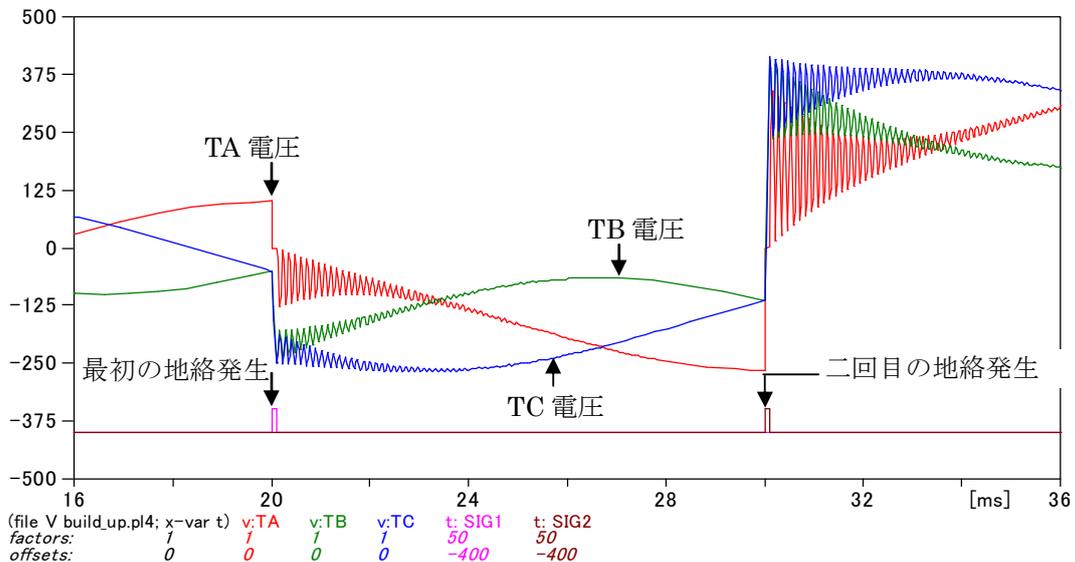
これからがいよいよ「なぜインダクタンス分が存在すると電圧 Build up するか」という核心部分に関する説明になります。

最初の地絡発生前後の TA, TB, TC 電圧の計算結果を拡大表示すると次図のとおりです。注目点は次の二点です。

①地絡発生後、回路が振動条件  $R_t^2 - 4 \cdot \frac{L_t}{C_t} < 0$  を満たしているため TA, TB, TC 電圧に高周波振動

が発生していますが、この回路では二回目の地絡発生まではこの振動は抵抗分により減衰しています。

もしこの振動が次の地絡発生までに減衰していないと振動成分が商用周波数成分に重畳して電圧 build up の大きさを変えるので注意が必要です。詳細は「7 地絡相の電圧振動が次の地絡発生まで収束しない場合、発生零相電圧は 5 PU を越える」で説明します。



②次に注目したい点はこの図で最初の地絡が発生した後、三相電圧は零相電圧を中心に振動するようになりますが、この零相電圧の大きさは R-C\_cir\_intermit\_1LG.acp の時の-100 V よりも既にマイナス側に大きくなっているのが観察されます。(この理由の詳細は後述の f 項で説明しています)

### e. 最初の地絡発生直後から次の地絡回復までの TA, TB, TC ノード電圧の変化

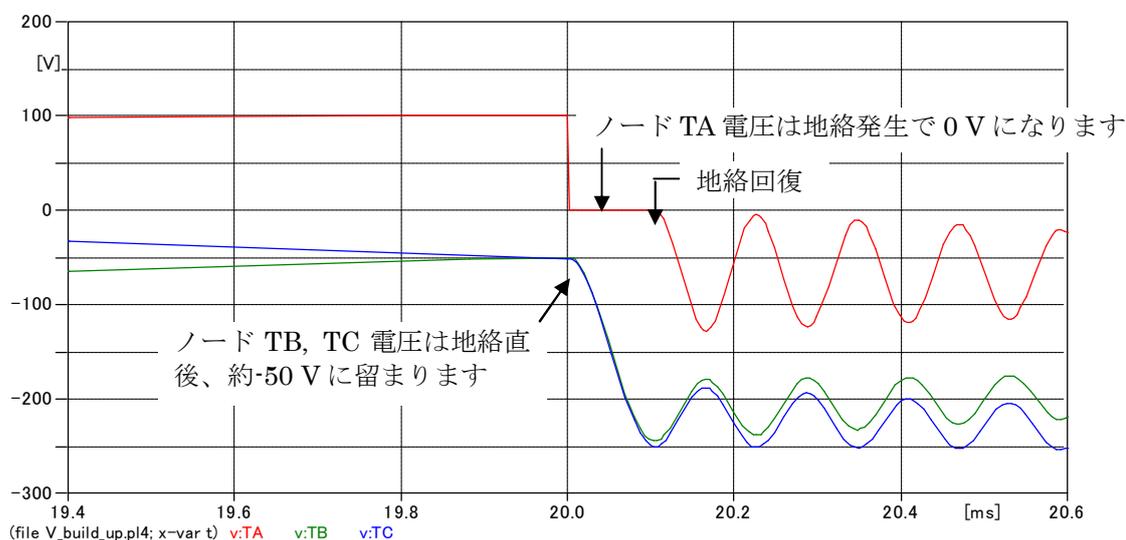
地絡後のこれら電圧の変化を調べることで電圧 Build up 現象がわかるようになるので見て行きましょう。

上図の最初の地絡発生時点の波形をさらに拡大したのが次図です。

TA 相電圧は地絡と同時に大地電位の 0 V になり、地絡が回復するまで 0 V に留まります。

TB, TC 電圧は地絡直後、直前の-50 V に留まりますが、その後、時間の経過とともに A 相からの回路定数で決定される周波数で振動する電流で B 相、C 相のキャパシタンスが充電されて行くのでマイナス側に振動しながら充電されて行き大きくなって行きます。

地絡直後-50 V に留まるのは大地からノード TB, TC に流入する電流波形がインダクタンス分のため地絡瞬時に電流は突然変化することができず、以前の電流値に留まるためですね。



さて TA 電圧が地絡発生で+100 V のピーク値から 0 V に急変しますが、A 相の誘起電圧は不変ですから、TA 電圧の変動分の 100V だけ中性点側導体の電圧が押し下げられます。

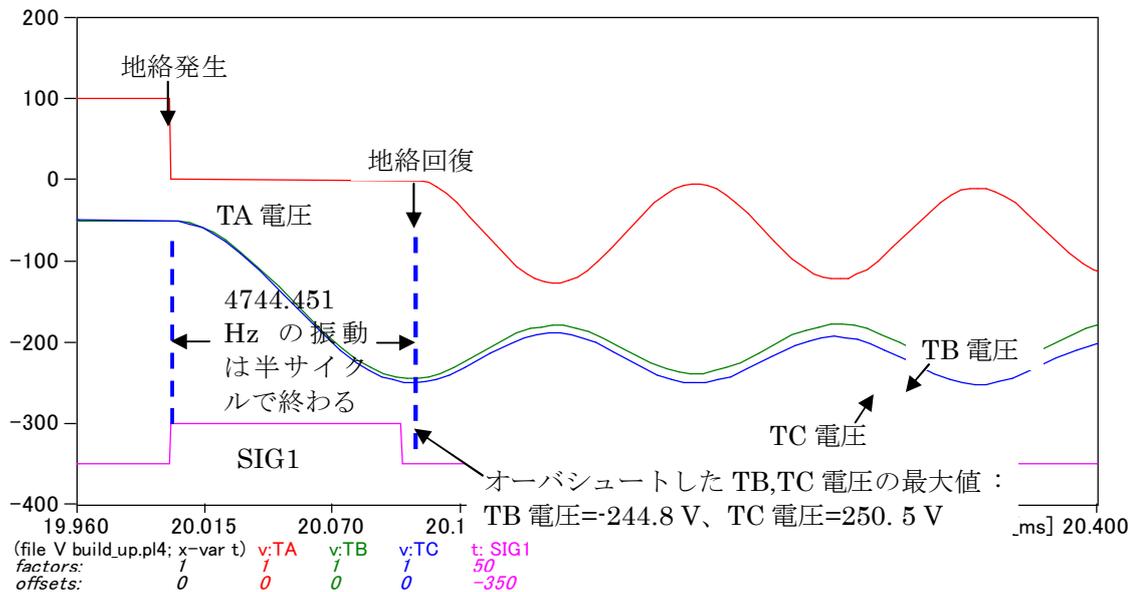
中性点は非接地ですから、0 V に保たれることなく A 相の地絡で 100V 押し下げられます。

この中性点側の電圧変動は B 相、C 相に伝わり、B 相電圧  $V_{TB}$ 、C 相電圧  $V_{TC}$  は直前の-50 V の値から 100 V 下がり  $V_{TB} = V_{TC} = -50 - 100 = -150$  V になろうとします。

この電圧変化は A 相からの回路定数で決定される周波数で振動する電流で B 相、C 相のキャパシタンスが充電されて行く電圧なので急には-150 V にならず上図のごとく固有振動数で振動しながら変化して行きます。ただし回路抵抗値が小さいためダンピングが弱いので、変動分である 100V 小さくなったところで留まらずに約 100%オーバシュートしてしまい 200 V 近くまで小さくなるとうとします。このため次の電圧になろうとします。

地絡後の TA 電圧=地絡後の TC 電圧=  $-50 \text{ V} - 2 \times 100 \text{ V} = -250 \text{ V}$

これに商用周波数で変化して行く B 相、C 相電源電圧の変化分と回路の微小抵抗による減衰が加わり、結果として次図の如く TB 電圧=250.5 V、TC 電圧=-244.79 V となるものです。



このように TB,TC 電圧が弱いダンピングのため振動で大きくなるので次項で述べる如く零相電圧も大きくなります。

#### f. 地絡で発生する零相電圧についての考察

地絡発生中、TB, TC 電圧は既に示したごとく回路の固有振動周波数 4744.451 Hz で振動し始めますが充電電流 0 点で地絡が回復するのでこの振動周波数の振動部分は上図に示す如く半サイクルしか続きません。この半サイクルの地絡している間、TB,TC の対地キャパシタンスは上図に示す如く上昇し、充電電流が 0 になる地絡回復時には B 相、C 相キャパシタンスは最大値に充電されます。

その後は A 相の電流ルートが Valve から A 相の対地キャパシタンスと変わるので振動周波数は 8217.63 Hz で振動しながら減衰します。

地絡発生中は TB, TC 電圧がこのように振動するので零相電圧は

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_{TA} + V_{TB} + V_{TC}) = \frac{1}{3}(0 + V_{TB} + V_{TC})$$

ですから、零相電圧もこの式に従って振動電圧となり、

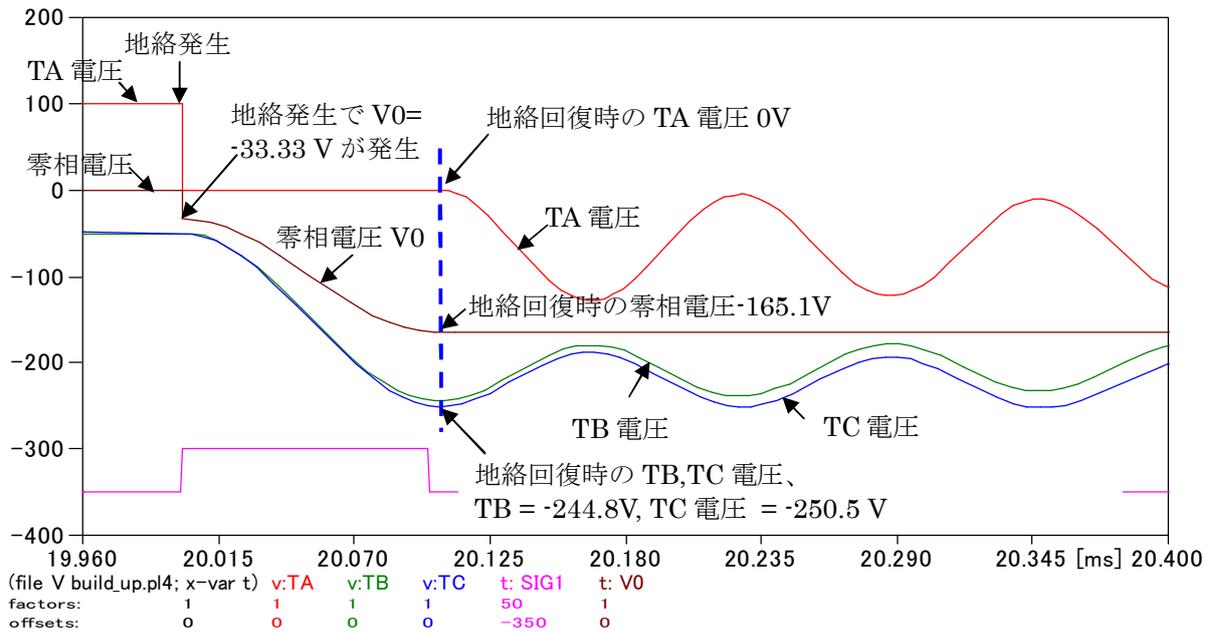
次図の如く振動でマイナス側に大きく振れて行きます。

地絡回復した直後の TA, TB, TC 電圧は次図に示す通り、TA 電圧=0 V、TB 電圧=-244.8V、TC 電圧=-250.5V となり振動の最大値まで充電されています。零相電圧は三相電圧の相加平均電圧ですから、TB,TC 電圧の最大値は零相電圧の絶対値の大きさを大きくし、次の最大値になります。

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_{TA} + V_{TB} + V_{TC}) = \frac{1}{3}(0 - 244.8 - 250.5) = -165.1 \text{ V}$$

この充電電圧は零相回路に放電回路が無いのでこの零相電圧がそのまま次の地絡発生まで保たれて行き、次の地絡でも又 TB,TC がオーバーシュートするので零相電圧は更に高くなって行きます。(二回目地絡による電圧上昇は次項で説明します)

このように地絡発生の擾乱で回路電圧に振動が発生し、抵抗が小さくてダンピングが弱いので健全相の TB,TC 電圧が振動して約二倍の大きさまでオーバーシュートするので零相電圧が先の R-C\_cir\_intermit\_1LG.acp の時より高くなり電圧の Build up になっていきます。



ところで TA 電圧が地絡発生で+100 V のピーク値から 0 V に急変しますが、A 相の誘起電圧は不変ですから、100V 分中性点側電圧が押し下げられて低くなろうとすると述べました。この傾向は正しいのですが、地絡直後は上図の拡大図のとおりで中性点側電圧  $V_0$  は -33.33 V で -100 V ではありません。この点の解釈は次のとおりです。

TA 電圧は地絡発生で+100 V のピーク値から 0 V に急変しますが、回路にインダクタンス分があるため TB 相、TC 相電圧は充電電流による電圧変化分は直ちに発生しません。そのため零相電圧は地絡直後

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_{TA} + V_{TB} + V_{TC}) = \frac{1}{3}(0 - 50 - 50) = -33.33 \text{ V}$$

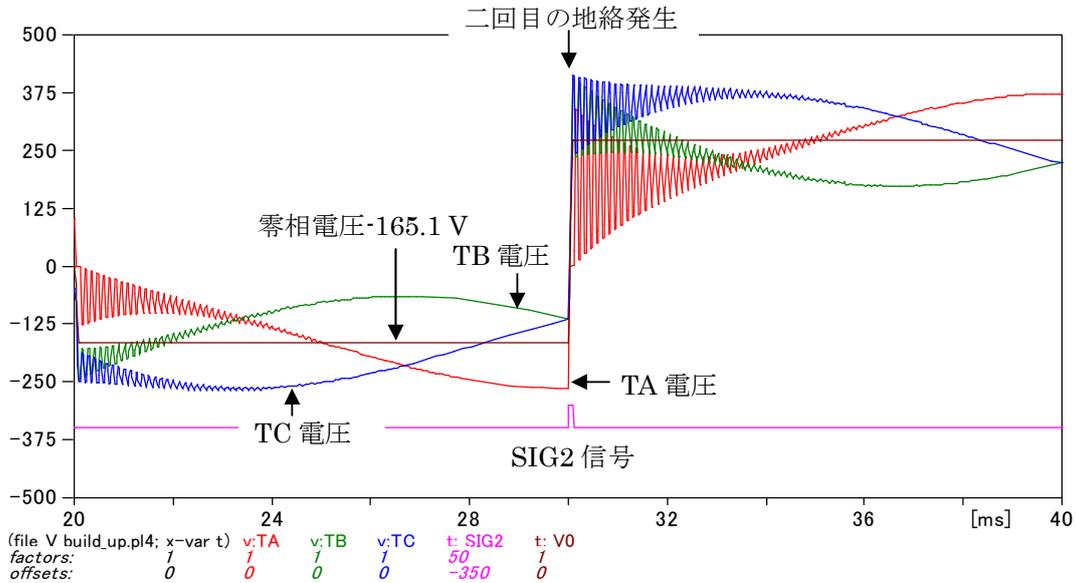
となるものです。

#### 4.2) 二回目の地絡時の現象

##### a. 地絡発生時の TB, TC 電圧と零相電圧

二回目の地絡は 30 msec. で SIG2 信号によって発生し、発生前後の TA, TB, TC 電圧及び SIG2 信号の状態を次図の通りです。

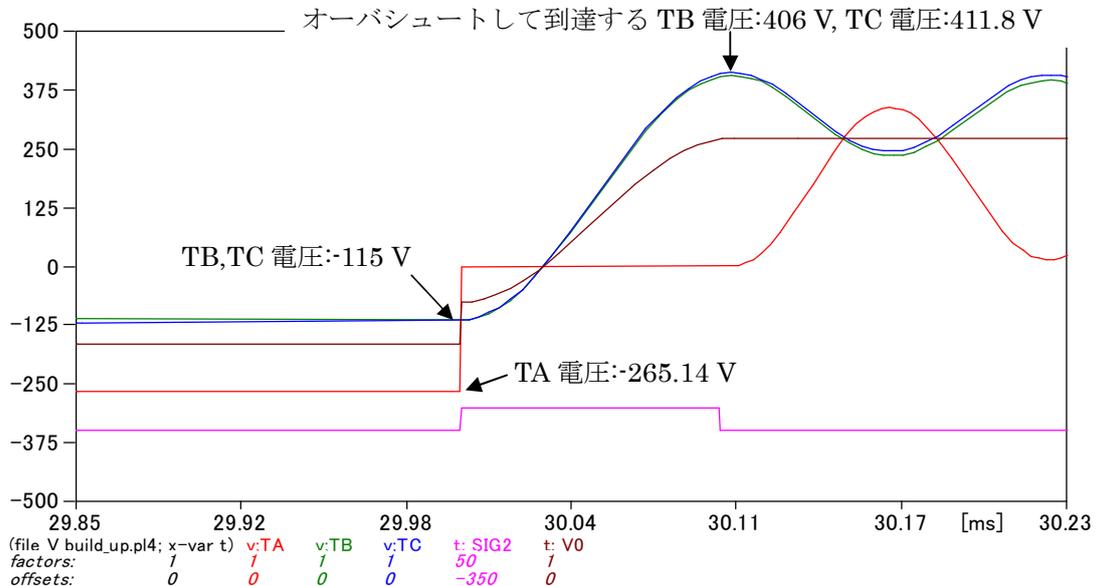
二回目の地絡発生直前まで零相電圧の -165.1 V が次図のように放電されずに残留するので、TA, TB, TC 電圧は、この零相電圧で -165.1 V を中心に商用周波数で振動しています。



二回目の地絡が発生した時の TA, TB, TC 電圧の動きについて考察してみましょう。

これらの電圧の動きは最初の地絡発生時と同様です。

上図の拡大図である次図を用いて考察してみます。



TA 電圧は地絡発生で零相電圧が重畳した -265.14V のピーク値から 0 電圧に急変します。

A 相の誘起電圧は不変ですから、265.14V 分中性点側電圧が押し上げられて高くなろうとします。中性点は非接地ですから、0 V に保たれることなく A 相の地絡で 265.14V 押し上げられて高くなろうとします。

この中性点側の電圧変動は B 相、C 相に伝わり、B 相電圧  $V_{TB}$ 、C 相電圧  $V_{TC}$  は直前の -115 V の

値から 265.14V 高くなり  $V_{TB} = V_{TC} = -115 + 265.14 = 150.14 \text{ V}$  になろうとします。

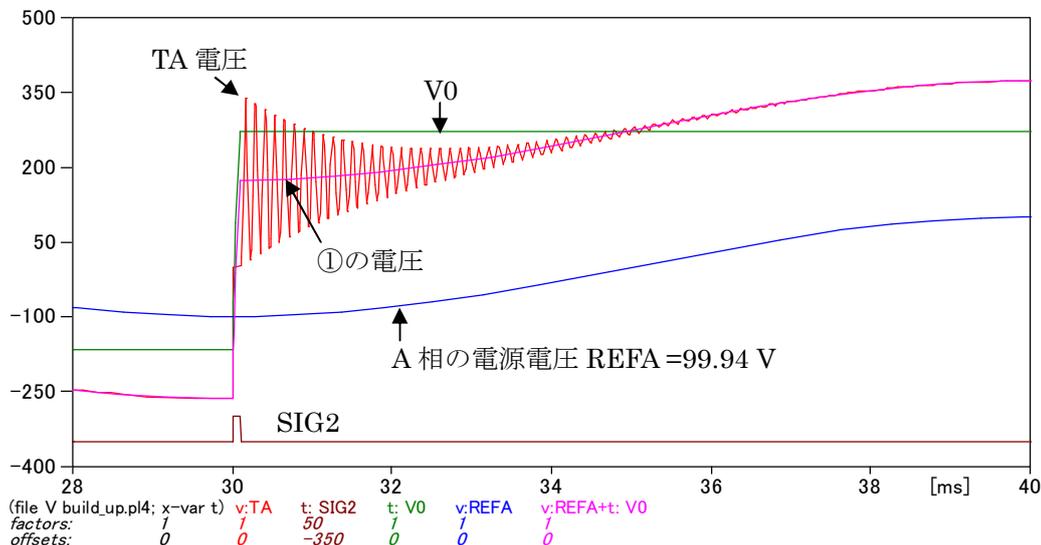
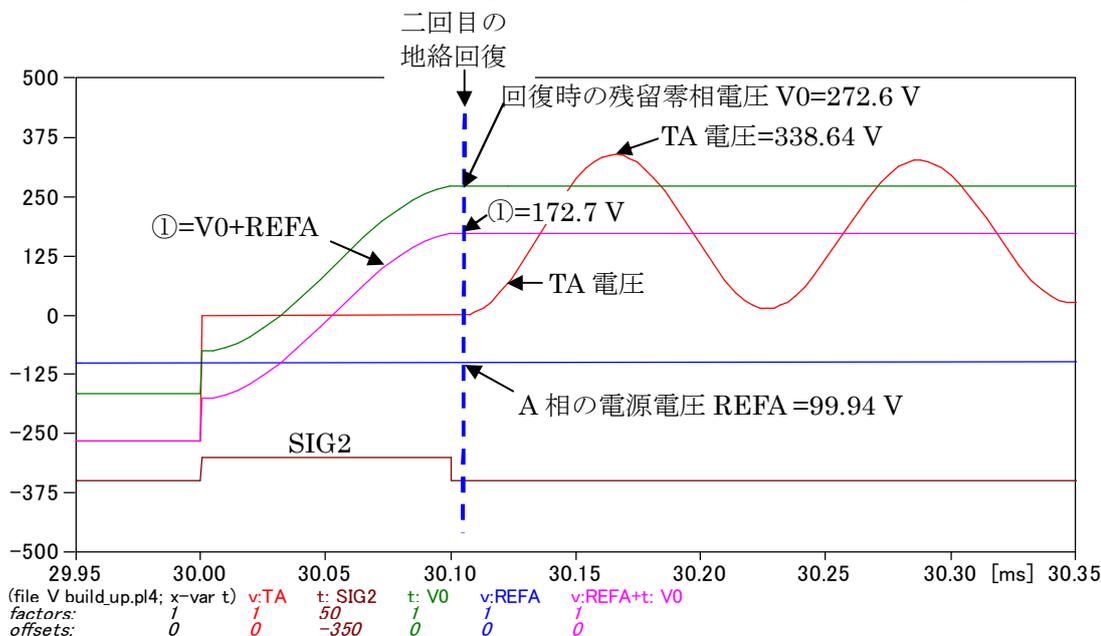
この電圧変化は A 相からの回路定数で決定される周波数で振動する電流で B 相、C 相のキャパシタンスが充電されて行くので急には 150.14V にならず上図のごとく固有振動数で振動しながら変化して行きます。ただし回路抵抗値が小さいためダンピングが弱いので、変動分である 265.14V 高くなったところで留まらずに約二倍までオーバーシュートしてしまい  $2 \times 265.14\text{V}$  近くまで高くなろうとします。このため次の電圧になろうとします。

地絡後の TB 電圧=地絡後の TC 電圧=  $-115 \text{ V} - 2 \times 265.14\text{V} = 415.28 \text{ V}$

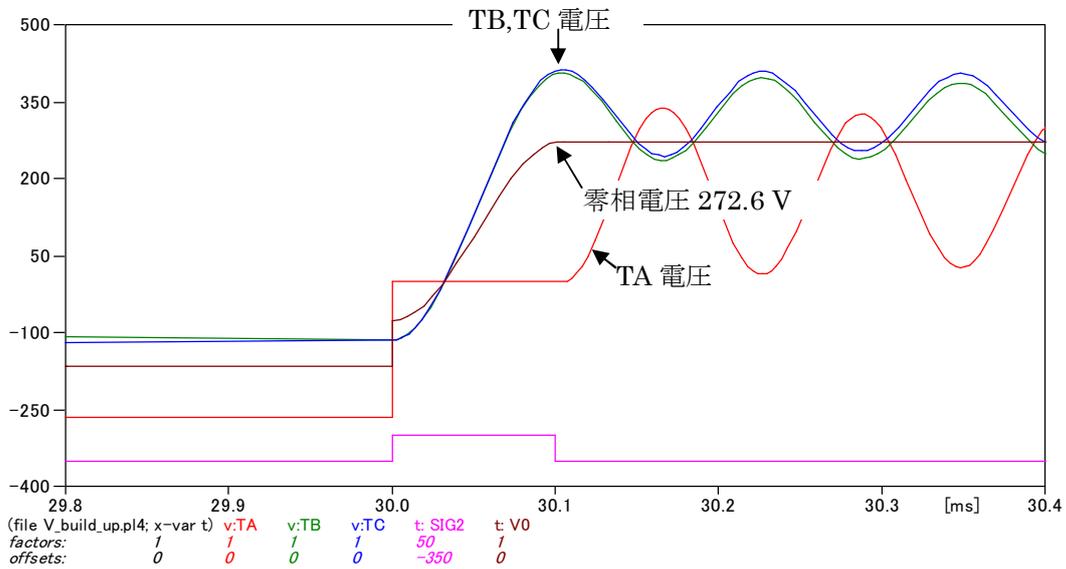
この電圧に商用周波数で変化して行く B 相、C 相電圧の商用周波数電圧の変化分と回路の微小抵抗による減衰が加わり、結果として上図の如く TB 電圧=406V、TC 電圧=411.8 V まで達します。

### b. 二回目の地絡回復後の TA 電圧

二回目の地絡回復で TA 電圧は 0V の地絡状態から、A 相の電源電圧 REFA と残留零相電圧が重畳した次図に示す①の電圧を中心にして振動するようになります。この①の電圧は地絡回復時 172.7 V です。しかし TA 電圧はダンピングが弱いので①の電圧で留まらず、約二倍弱オーバーシュートして 338.6 V に達します。その後①の電圧を中心に振動していき、抵抗分で振動分は減衰して行き、TA 電圧と①の電圧は次図下段のように一致します。



c. 二回目の地絡と地絡回復時の零相電圧



地絡回復直後 TA 電圧は 0 V, TB,TC 電圧は上図のように振動しながら大きくなります。

TB,TC 電圧が最大に充電された時に地絡が回復しこの時の零相電圧は TA,TB,TC 電圧の相加平均で  $V_0 = \frac{1}{3}(V_{TA} + V_{TB} + V_{TC}) = \frac{1}{3}(0 + 406 + 411.8) = 272.6 \text{ V}$  になります。その後零相電圧の放電回路が無いので零相電圧は +272.6 V のまま次の地絡発生まで推移します。初回の零相残留電圧は -165.1 V でしたから二回目の地絡回復では零相電圧の絶対値は大きくなっています。

以後このメカニズムで電圧が漸増して行きます。

## 5 電圧 Build up メカニズムのまとめ

回路にインダクタンス分が無い R-C\_cir\_intermit\_1LG.acp では零相電圧は地絡発生回数に無関係に±100 V の値に留まりましたが、インダクタンスを含む回路の間歇一線地絡ではこれを越えて大きくなることがわかりました。

インダクタンス分があると零相電圧が間歇一線地絡の継続で大きくなるメカニズムを纏めてみましょう。

a. 中性点が非接地系では中性点電圧は中性点直接接地の如く 0 電圧に拘束されていないので地絡相の電圧変動分（±の相電圧 Peak 値、取り上げた例では A 相の最初の地絡で±100 V→0 V になる電圧変動で変動分は 100 V）は、中性点側回路を通り B 相、C 相回路に伝えられ、電源電圧で決定されている TB、TC 電圧に重畳します。

b. 回路の抵抗分が小さくてダンピング効果が弱いとこの電圧変動分はオーバシュートで約二倍の大きさに達して TB、TC 電圧に重畳します。

また回路が振動的である条件を満足すればこの重畳電圧は回路定数で決定される高周波振動が発生します。

c. 地絡が継続している半サイクル間、A 相電圧は地絡で 0 V で一定、TB、TC 電圧は地絡直前の値から中性点側の電圧変動の影響を受けて高周波振動するので零相電圧も高周波振動電圧になります。

d. TB、TC 電圧は地絡直前の値に中性点側から伝わる約二倍の振動電圧変動分が重畳するので大きくなり、半サイクル後の地絡回復時には最大の電圧になります。三相の相加平均である零相電圧の絶対値も地絡回復時には TB、TC 電圧が最大になるので最大になります。

e. 地絡が回復しても、対地キャパシタンスに充電された非接地系では零相電圧の放電回路が無いのでこの零相電圧は±の最大値で次の地絡発生までそのままの大きさで残留します。

この零相電圧は地絡相電圧を含めた三相電圧値を大きくし、特に地絡相の大きさは次の地絡で発生する中性点電圧変動を大きくして、B 相、C 相電圧、零相電圧をさらに大きくするので電圧が Build up して行きます。

f. 地絡相の電圧は次の地絡まで高周波振動成分が減衰する場合と減衰しない場合がありますが減衰していない場合は商用周波数電圧に高周波電圧が重畳した中性点の電圧変動を生じるのでさらに電圧が高くなる場合もあります。これは後述の「7 地絡相の電圧振動が次の地絡発生まで収束しない場合、発生零相電圧は 5 PU を越える」で解説しています。

以上が電圧 Build up のメカニズムです。

このように結果が原因となり新しい結果がまた次の新たな結果を生むという繰り返りで電圧が Build up して行きますが、簡単に言ってしまうと、地絡回復で発生した零相電圧が次の地絡発生まで減衰しないで残留するから電圧の Build up が発生するのですね。これを逆手に取って、次の地絡発生までに零相電圧を速やかに減衰させて一線地絡時の電圧の Build up を抑制する方法が採用されています。これは第 9 項で紹介しています。

以上からわかるように電圧 Build up の要因は次のとおりです。

- 1) 非接地系で零相電圧の放電回路が存在していないこと
- 2) 対地キャパシタンスとインダクタンス分が存在して回路が振動的になっていること(回路定数が振動的になる  $R_t^2 - 4 \cdot \frac{L_t}{C_t} < 0$  の条件を満足していること)
- 3) 回路の抵抗値が小さくダンピングが小さいこと

## 6 電圧 Build up の最大値

間歇一線地絡の電圧 Build up の最大値として零相電圧 Peak 値は 5pu に、健全相電圧の Peak 値は 7.5 pu に達すると言われています。

本項ではこの解説をします。

しかしながらこれらの数値が当てはまるのは次の地絡までに地絡相の電圧振動が減衰して無くなっている場合のみです。回路定数によっては地絡回復後から次の地絡発生までに地絡相の電圧振動が続いている場合は商用周波数電圧に高周波電圧が重畳した中性点の電圧変動を生じるので、さらに電圧が高くなる場合もあるので留意が必要です。この例は第 7 項で示しています。

しかしながら零相電圧 Peak 値は 5pu に、健全相電圧の Peak 値は 7.5 pu に達するという結果を導く過程の考えは電圧 Build up 現象の基本的な考え方のためここに紹介するものです。

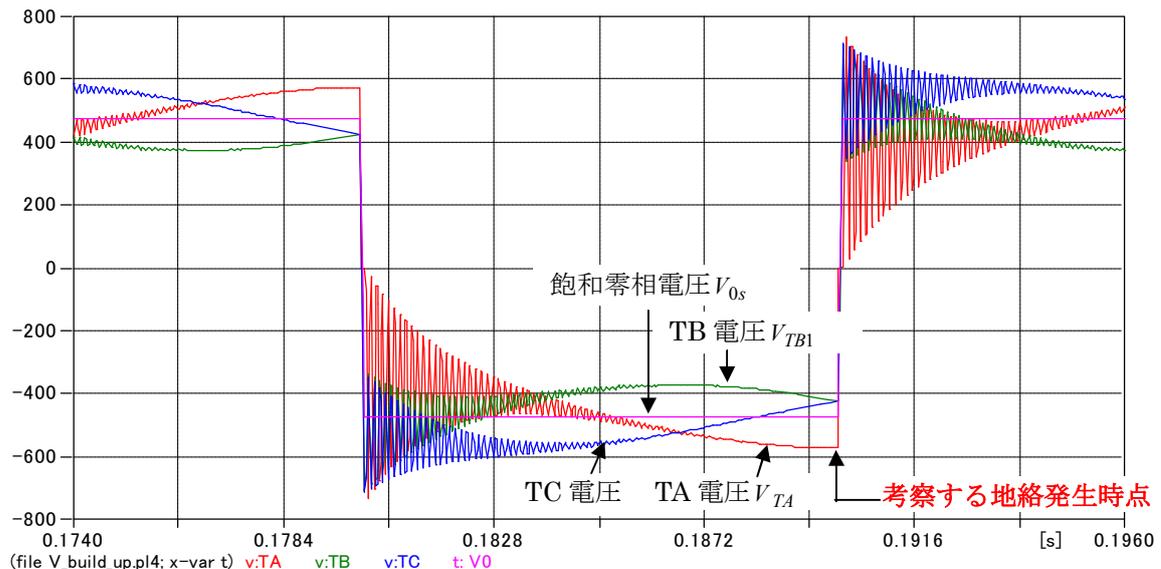
零相電圧、健全相電圧の大きさは回路定数に依存しているので実際には ATP を使い回路ごとに検討が必要である点に御留意ください。

### 1) 零相電圧と健全相電圧の電圧 Build up による最大値

次の地絡までに地絡相の高周波電圧振動がおさまる場合、前項までに示したように、零相電圧と各相電圧は地絡の都度 Build up して行きますが、無限に大きくなるのではなく、一定値に収束します。

本項ではこれらの最大の一定値はどのような値なのか検討します。

検討のためにほぼ飽和状態になっている零相電圧、各相電圧の大きさを次図に示します。



零相電圧の大きさが既に飽和状態になっていれば地絡が A 相の正極性の最大値で発生しても、負極性の最大値で発生しても結果の零相電圧の大きさの絶対値は飽和で一定なので、ここでは上図右下に示している地絡発生時点の地絡で最大電圧を検討します。またこの考察では回路のダンピングはすべて無視しているので結果は高めになっている点にご留意をお願いします。

零相の飽和した電圧を  $V_{0s}$  とします。

地絡発生の直前 A 相の電圧は負極性の最大値になっています。この電圧を  $V_{TA}$  とします。この  $V_{TA}$  は電源誘起電圧である -100 V Peak に零相電圧が重畳したものとなっています。つまり

$$V_{TA} = V_{0s} - 100 \quad (1)$$

また地絡直前の B, C 相の TB 電圧、TC 電圧は等しい大きさの Peak 電圧になっており、この大きさを B 相電圧で代表させ  $V_{TB1}$  とします。

$V_{TB1}$  は飽和零相電圧  $V_{0s}$  より 50 V 高くなっていますから

$$V_{TB1} = V_{0s} + 50 \quad (2)$$

この状態から地絡が発生すると、A相電圧の $V_{TA}$  は地絡ですから0 Vになり、 $-V_{TA}$ の電圧変動が発生します。

この電圧変動は中性点が非接地なので、中性点側導体を通り、そのままB相、C相に伝わろうとしますが、抵抗分が小さく回路のダンピングが弱いので地絡が回復した時、この電圧変動は約二倍の大きさまでオーバシュートし $-2 \cdot V_{TA}$ の電圧がB相、C相電圧に重畳します。

これらの重畳した後のB相、C相の電圧の大きさを $V_{TB2}$ で代表させれば $V_{TB2}$ は次式のように表せます。

$$V_{TB2} = V_{TB1} - 2 \cdot V_{TA} \quad (3)$$

(3)に(1),(2)の関係式を代入すれば次式が得られます。

$$V_{TB2} = V_{0s} + 50 - 2 \cdot (V_{0s} - 100) \quad (4)$$

零相電圧は飽和している状態を考えていますから、この地絡回復後直後発生する零相電圧は $-V_{0s}$ となります。この $-V_{0s}$ は次式で求まります。

$$-V_{0s} = \frac{1}{3}(0 + V_{TB2} + V_{TB2}) = \frac{2}{3} \cdot V_{TB2} \quad (5)$$

(5)式に(4)式の関係式を入れて次式が得られます。

$$-V_{0s} = \frac{2}{3} \cdot V_{TB2} = \frac{2}{3} \cdot (V_{0s} + 50 - 2 \cdot (V_{0s} - 100)) \quad (6)$$

(6)式を解いて $V_{0s} = -500 \text{ V}$  (7)が得られます。

つまり飽和状態の零相電圧の大きさは電源電圧のPeak値を100 Vとしているので5 puのPeak電圧になります。

この時のB相、C相の健全相電圧 $V_{TB2}$ は(4)式に(7)の結果を代入して次の値が得られます。

$$V_{TB2} = 750 \text{ V} \quad (8)$$

これから健全相電圧は7.5 puのピーク値になることがわかります。

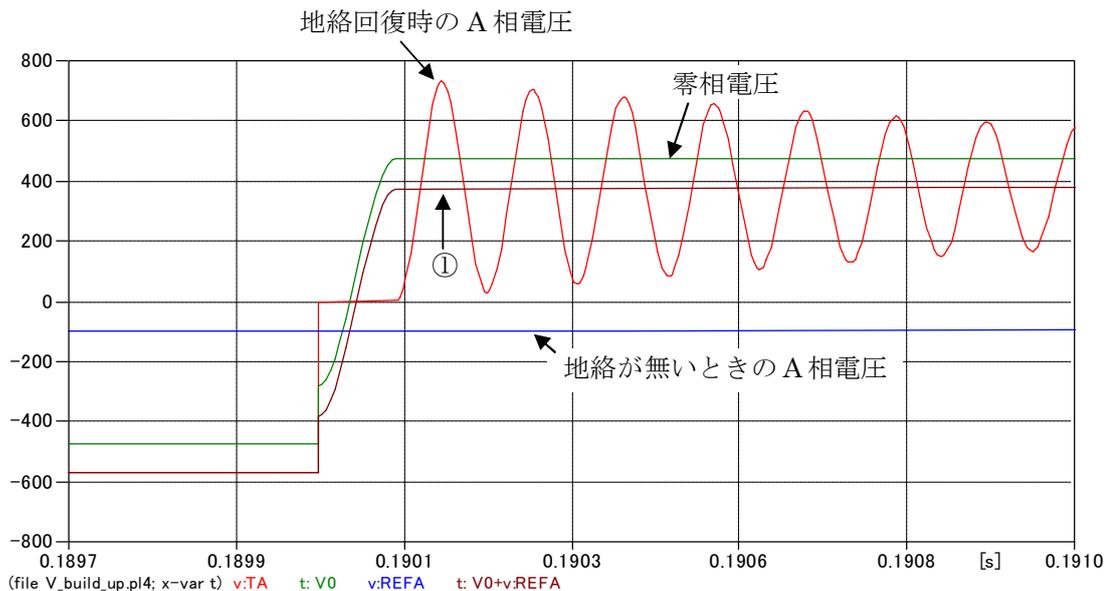
## 2) 地絡相の電圧 Build up の最大値

次に地絡相である A 相の電圧の最大値を検討してみましょう。ダンピングを無視しているのと地絡相の電圧振動が地絡直前までに減衰して無くなっているという条件は前項と同様です。

地絡が回復すると A 相には A 相の電源電圧 REFA と回復時の零相電圧  $v_0$  が重畳した電圧①が印加されます。この①の電圧は地絡回復後の A 相振動電圧の振動中心電圧です。

①の電圧の内、零相電圧は前項の結論から飽和状態では最大の 500 V に達しています。

電源電圧は-100 V ですから、①の電圧は  $500-100=400$  V になります。(次図はまだ完全に飽和していないケースのため 400 V に近い値です)



すると A 相電圧は回路のダンピングが無いので地絡回復と共に①の電圧の二倍の電圧まで振動してオーバシュートします。

つまり 800 V に達するように振動するので、地絡相の最大電圧は 8PU になります。

上記はダンピングを無視した概略の検討であり、回路定数が既知であれば ATP で詳細に計算して戴きたいと思います。

## 3) どうして電圧 Build up は飽和するのでしょうか

この点を以下に説明していますが、仮定条件は上記と同じく、

- 1) 地絡相の地絡回復による振動は次の地絡発生まで減衰してなくなっていること
- 2) 回路のダンピングは無い  
としています。

電源の相電圧のピーク値を  $v_m$  とします。  $v_m = 100$  V です。

初回の A 相の地絡で  $+v_m$  V から 0 V の  $-v_m$  の電圧変動が発生しますがダンピングが無いので  $2 \cdot (-v_m) = -2 \cdot v_m$  まで振動します。これが中性点側の導体を通り B 相、C 相に伝わります。

地絡発生直前の TB,TC 電圧は  $\frac{-v_m}{2}$  です。

これに A 相の電圧変動分が重畳するので TB,TC 電圧は地絡回復時、次の電圧までオーバシュートします。

$$V_{TB1}=V_{TC1}=\frac{-v_m}{2}-2\cdot v_m=\frac{-5}{2}v_m$$

地絡回復時  $V_{TA1}=0$  V なので、地絡回復時の零相電圧は

$$V_{01}=\frac{1}{3}\left(0-\frac{5}{2}\cdot v_m-\frac{5}{2}\cdot v_m\right)=-\frac{5}{3}\cdot v_m \quad \text{となりこの零相電圧が二回目の地絡まで残留します。}$$

二回目の地絡の直前 A 相の地絡時 A 相電圧は零相電圧が重畳しているので  $-v_m - \frac{5}{3}\cdot v_m$  V から 0 V の  $\frac{8}{3}v_m$  の電圧変動が発生します。ダンピングが無いとしているので  $2\cdot\frac{8}{3}\cdot v_m = \frac{16}{3}\cdot v_m$  まで振動しようとしています。これが B 相、C 相に伝わります。

二回目の地絡発生直前の TB,TC 電圧は零相電圧  $V_{01}$  が重畳して  $\frac{+v_m}{2} - \frac{5}{3}\cdot v_m = \frac{-7}{6}\cdot v_m$  です。

これに A 相の電圧変動分が重畳するので TB,TC 電圧は地絡回復時、次の電圧までオーバーシュートします。

$$V_{TB2}=V_{TC2}=-\frac{7}{6}\cdot v_m + \frac{16}{3}\cdot v_m = \frac{25}{6}\cdot v_m$$

地絡回復時  $V_{TA2}=0$  V なので、地絡回復時の零相電圧は

$$V_{02}=\frac{1}{3}\left(0+\frac{25}{6}\cdot v_m + \frac{25}{6}\cdot v_m\right)=\frac{25}{9}\cdot v_m \quad \text{となりこの零相電圧が次の地絡まで残留します。}$$

この二回目に発生する零相電圧の初回地絡の零相電圧からの増加分は

$$\frac{25}{9}\cdot v_m - |\text{初回の零相電圧 } \frac{-5}{3}\cdot v_m| = \frac{10}{9}\cdot v_m \quad \text{です。初回の地絡の零相電圧増加分は } \frac{5}{3}\cdot v_m \text{ でしたからね。}$$

三回目の地絡の直前 A 相の地絡時 A 相電圧は零相電圧が重畳しているので  $+v_m + \frac{25}{9}\cdot v_m$  V から 0 V の  $-\frac{34}{9}v_m$  の電圧変動が発生します。

ダンピングが無いとしているので  $-2\cdot\frac{34}{9}\cdot v_m = -\frac{68}{9}\cdot v_m$  まで振動しようとしています。これが中性点側の導体を通り B 相、C 相に伝わります。

三回目の地絡発生直前の TB,TC 電圧は零相電圧  $V_{02}$  が重畳して  $\frac{-v_m}{2} + \frac{25}{9}\cdot v_m = \frac{41}{18}\cdot v_m$  です。

これに A 相の電圧変動分が重畳するので TB,TC 電圧は地絡回復時、次の電圧までオーバーシュートします。

$$V_{TB3}=V_{TC3}=\frac{41}{18}\cdot v_m - \frac{68}{9}\cdot v_m = -\frac{95}{18}\cdot v_m$$

地絡回復時  $V_{TA3}=0$  V なので、地絡回復時の零相電圧は

$$V_{03}=\frac{1}{3}\left(0-\frac{95}{18}\cdot v_m - \frac{95}{18}\cdot v_m\right)=-\frac{95}{27}\cdot v_m \quad \text{となりこの零相電圧が次の地絡まで残留します。}$$

$$\text{この零相電圧の二回目の地絡の零相電圧からの増加分は } \frac{95}{27}\cdot v_m - \frac{25}{9}\cdot v_m = \frac{20}{27}\cdot v_m$$

このように地絡のたびごとに零相電圧の増加分は、 $\frac{5}{3}\cdot v_m$ ,  $\frac{10}{9}\cdot v_m$ ,  $\frac{20}{27}\cdot v_m$  というように小さくなるのでやがて零相電圧の Build up は無くなり飽和します。

### 7 地絡相の電圧振動が次の地絡発生まで収束しない場合、発生零相電圧は 5 PU を越える

間歇一線地絡時発生する零相電圧の大きさは回路定数に依存していて、地絡相の高周波電圧変動が次の地絡まで減衰しない場合、前項の 5PU を超える場合があります。零相電圧が 5pu を超えるので健全相電圧も 7.5 pu 以上、地絡相電圧も 8 pu 以上になります。

どうしてこうなるのかその理由は以下に示していますが、結論を先に言っておくと、地絡回復後、地絡相電圧は振動電圧となり、もしこの地絡相の電圧振動が次の地絡まで無くならないで残る場合、次の地絡によって発生する電圧変動の大きさにこの振動電圧分も重畳するので電圧変動が大きくなる場合があります、結果として中性点側導体を通じて与えられる電圧変動に振動電圧が重畳して大きくなるので TB,TC 電圧が結果として大きくなるので、零相電圧も、健全相電圧も、地絡相電圧も上記の値を超えた値になります。

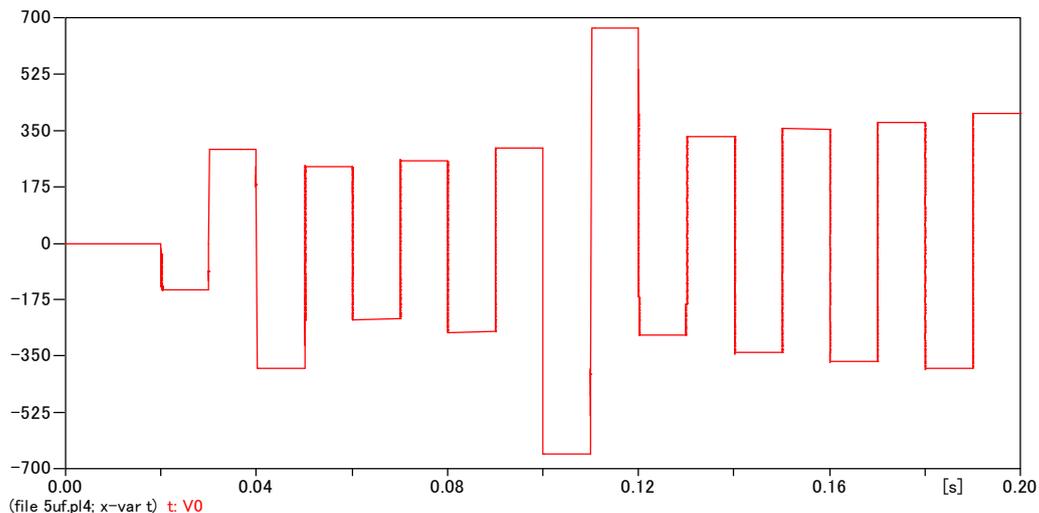
ここではその一例として対地キャパシタンスの値が大きい場合の例として  $0.5 \mu F$ 、対地キャパシタンスが小さい場合の例として  $0.07 \mu F$  にした時のシミュレーション結果を次図に示します。その他の回路定数は V\_build\_up.acp と同じとしています。

数値振動防止用抵抗値は  $K_s=0.15$  として次式で決定される抵抗値としています。

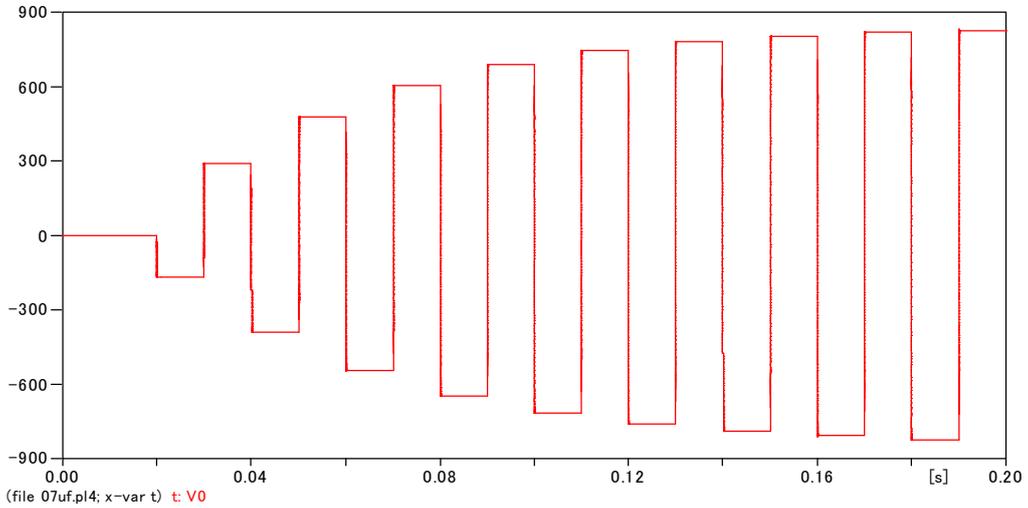
$$\text{数値振動防止用抵抗値} = K_s \times \frac{1E-7}{2 \times \text{Capacitance value}(F)}$$

$0.5 \mu F$  の対地キャパシタンスとした場合の零相電圧の計算例を次図に示します。

0.1 ~ 0.12 sec. で零相電圧は急増し、零相電圧は 6.7 pu に達しています。

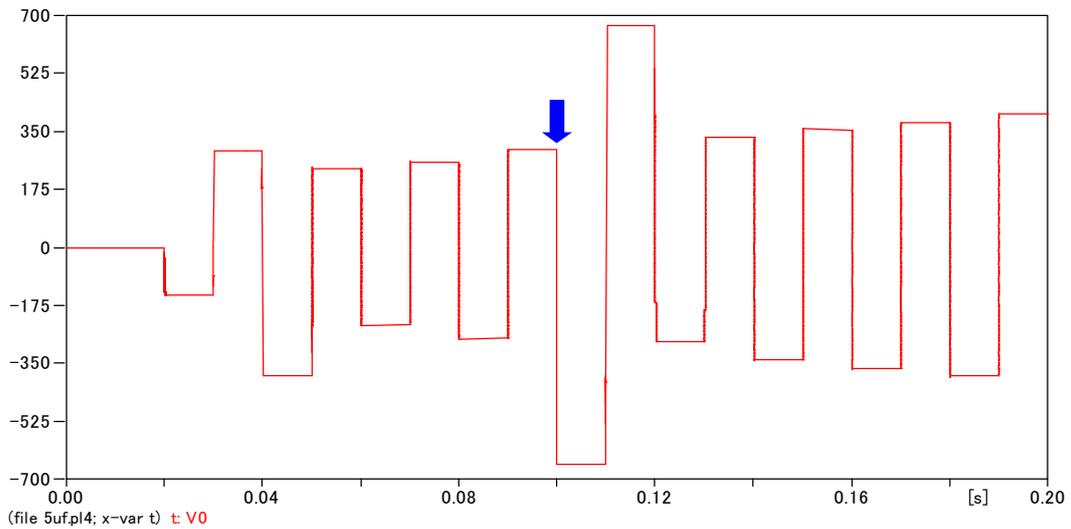


0.07  $\mu$ F の対地キャパシタンスとした場合の零相電圧の計算例を次図に示します。  
 この場合、零相電圧は次図の如く漸増しますが 5pu を超え、t=0.2 sec.では既に 8.28 pu にも達  
 していますが、やがて飽和する傾向を示しています。



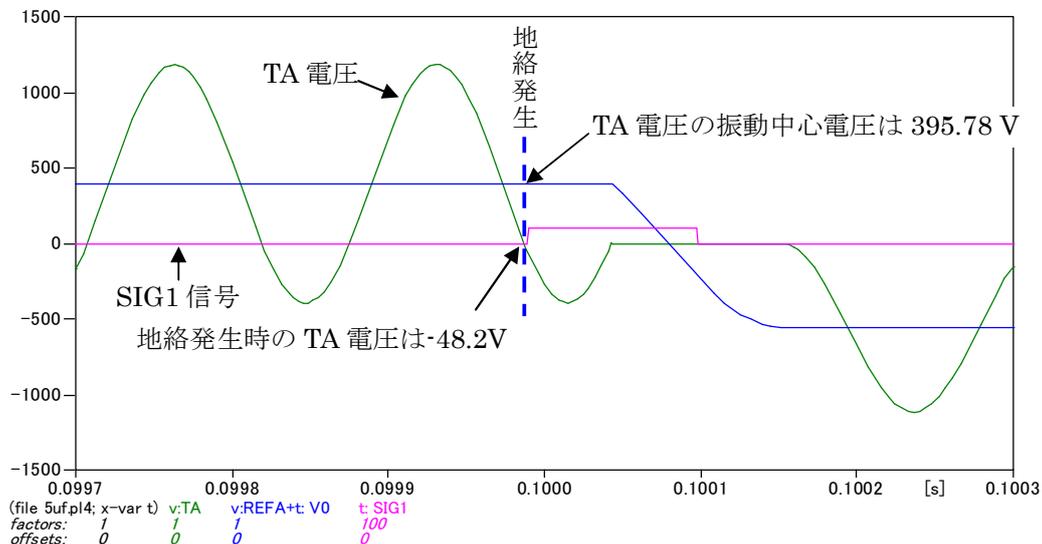
#### 1) 0.5 $\mu$ F の零相電圧が途中で急増する説明

零相電圧の計算結果を再掲します。次図矢印部の地絡で零相電圧が急増しているなのでこの箇所を  
 考察しなぜ零相電圧が大きくなるのか解説します。



この地絡が発生する直前の TA 電圧を次図に示します。

このケースでは TA 電圧は地絡発生時点でも高周波振動が減衰しておらず振動しています。地絡発生により TA 電圧の振動の中心電圧 395.78 V は 0V になります。



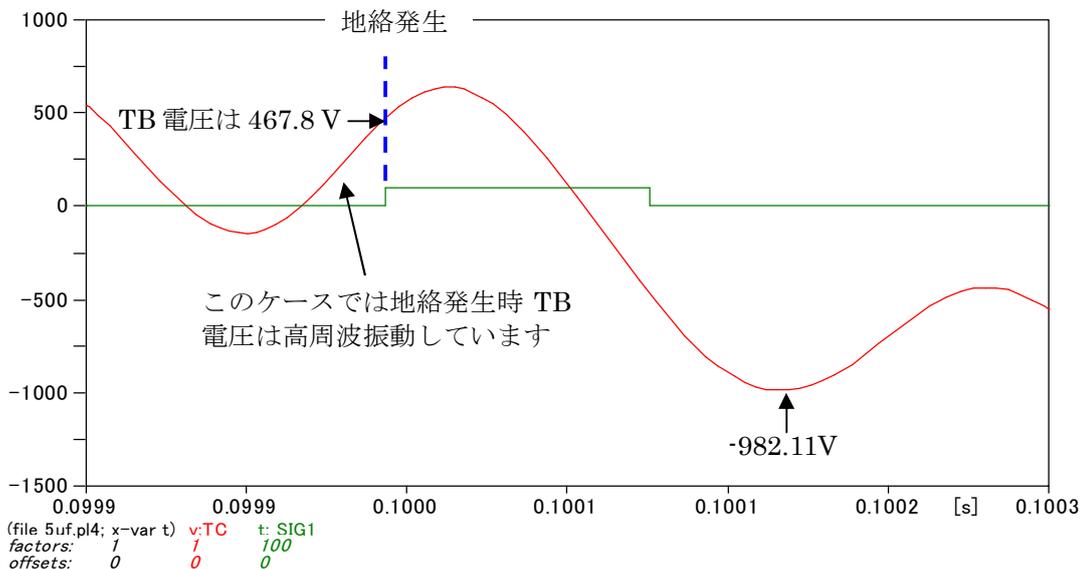
この時発生する振動中心電圧の電圧変動分は -395.78 V、これに地絡発生時の TA 電圧は上図の如く -48.2 V です。この値は振動中心電圧から更に 443.98 V ( $395.78\text{V} + 48.2\text{V} = 443.98\text{V}$ ) 低いので ( $-395.78\text{V} - 443.98\text{V}$ ) の電圧変動になります。ダンピングが無いとすればこの二倍の値にまでオーバーシュートして大きくなります。

この値は  $2 \times (-395.78\text{V} - 443.98\text{V}) = -1679.52\text{V}$

この電圧が中性点側導体を通り TB, TC 電圧に重畳します。

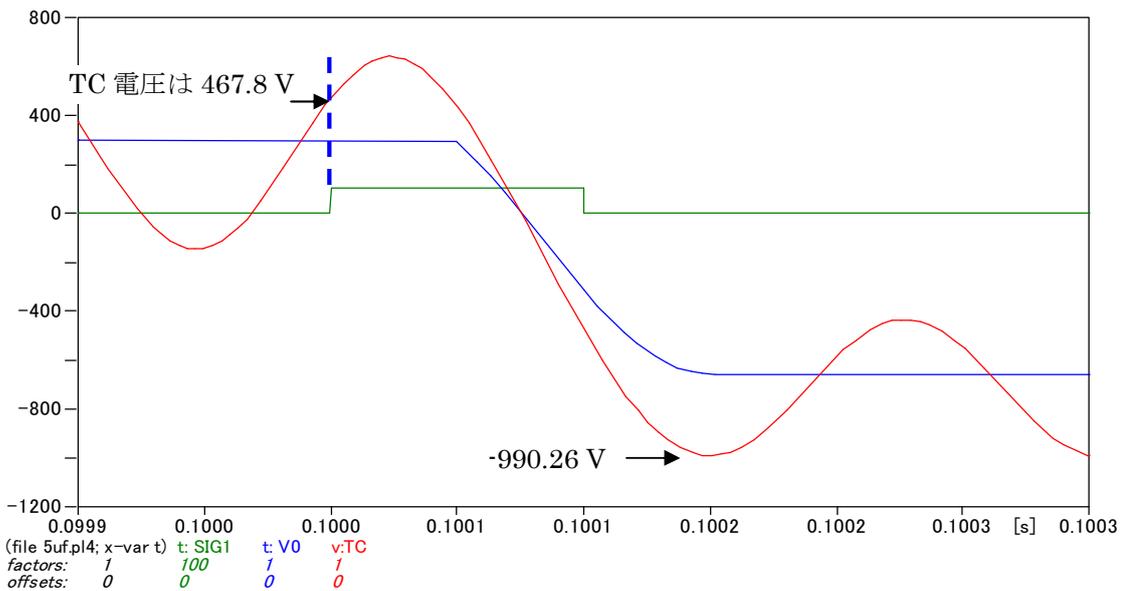
この地絡発生時の TB 電圧は次図の如く 467.8 V です。この電圧に -1679.52 V が重畳するので TB 電圧は -1211.72V になろうとします。

しかしながら実際には回路の抵抗分によるダンピングがあるので、次図に示す如く -982.11V になります。このように TB 電圧が大きくなるのは TA 振動中心電圧に地絡回復時の TA 電圧の振動電圧が重畳しているためです。



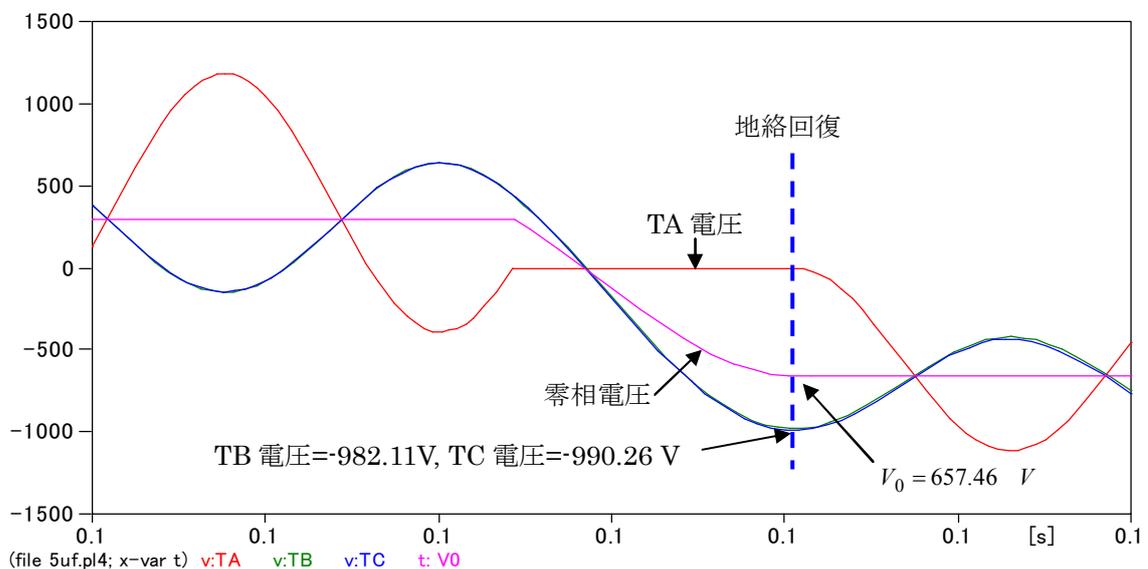
またこの時の TC 電圧についても同様の説明になります。つまり地絡発生直前の TC 電圧は次図の如く 467.8 V です。この電圧に上記の-1679.52 V が重畳するので TC 電圧は-1211.72V になろうとします。しかしながら実際には回路の抵抗分によるダンピングの影響を受け、次図に示す如く-990.26V に達します。計算結果が TB 電圧の-982.11V と若干ずれるのは商用周波成分電圧の時間推移による影響です。

このように TC 電圧が大きくなるのは TA 振動中心電圧に地絡回復時の TA 電圧の振動電圧が重畳しているためです。



地絡発生後の地絡回復直前のこれら TA, TB, TC 電圧と零相電圧の関係を次図に示します。地絡が回復する直前 TA 電圧は 0 V で TB, TC 電圧は次図の如く地絡回復時に最大に充電されます。このため、零相電圧も

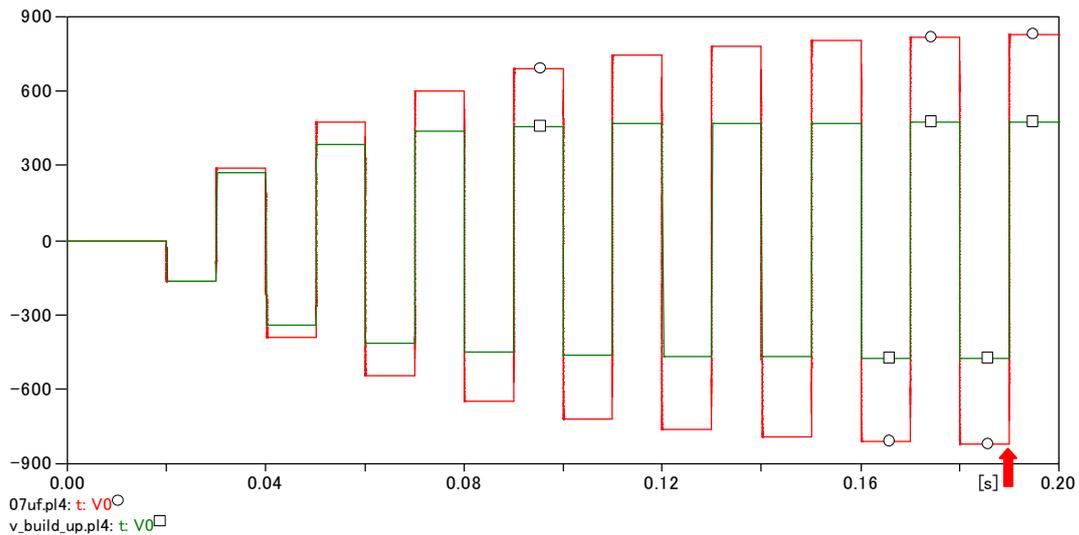
$V_0 = \frac{1}{3}(V_{TA} + V_{TB} + V_{TC})$  の関係で次図の如く地絡回復時に零相電圧絶対値は最大になり、次の地絡発生まで零相放電回路が形成されないので一定値に留まります。この一定零相電圧は  $V_{TB} = -982.11$ ,  $V_{TC} = -990.26$ ,  $V_{TA} = 0$  の関係から  $V_0 = 657.46$  V に達しています。



## 2) 0.07 μF の零相電圧が 5PU を超える説明

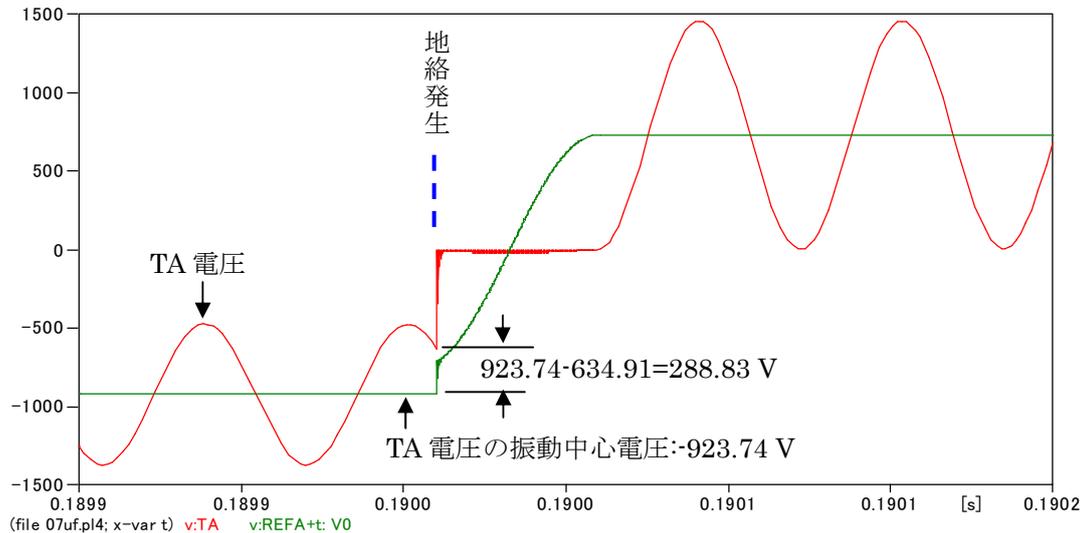
次図に対地キャパシタンスが 0.31 μF の時の零相電圧の Build up 状況(□のプロット)と 0.07 μF の時の零相電圧の Build up 状況(○のプロット)の比較を示します。

0.07 μF の方が Build up で到達する電圧が高くなっていて、0.2 sec. では 8.28 pu にも達しています。



0.07 μF のケースで図示赤矢印の地絡発生でどうしてもこのような零相電圧になるか概略検討してみます。結論から先というと前項と同じく、地絡相の地絡回復時の振動電圧が次の地絡まで減衰はするものの残るためです。

TA 電圧は次図のように変化します。

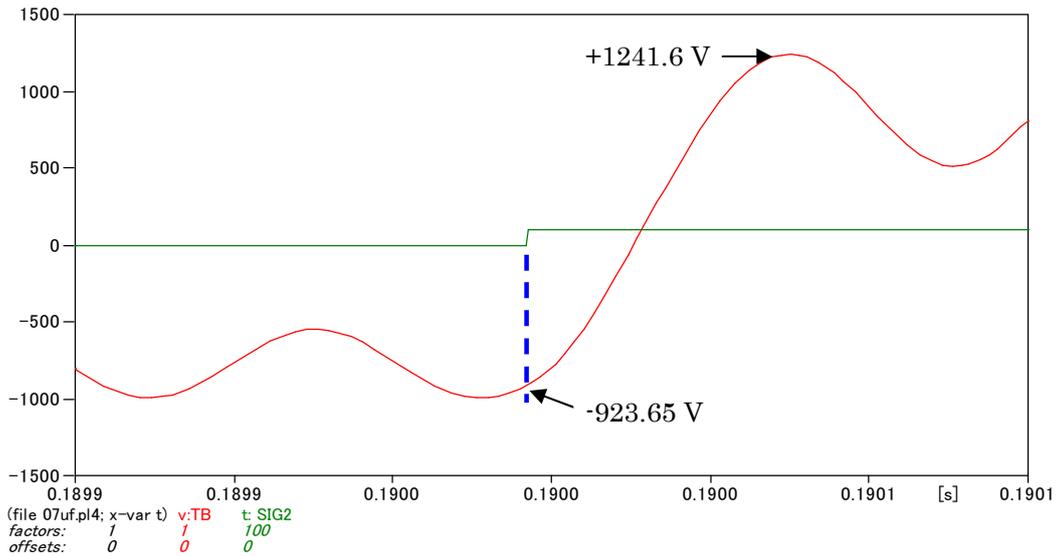


地絡発生で TA 電圧の振動中心電圧は -923.74 V から 0V になります。

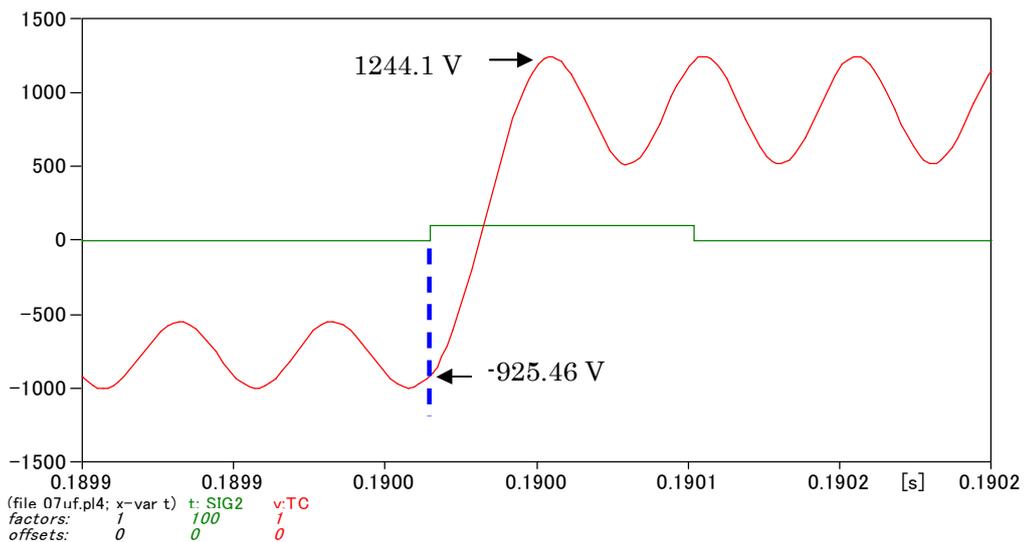
この時発生する振動中心電圧の電圧変動分は +923.74 V、これに地絡発生時の TA 電圧は上図の如く更に 288.83 V 高いのでこれらの和の電圧変動になります。ダンピングが弱いためこの変動分の二倍オーバシュートすると仮定すると

電圧変動分は  $2 \times (+923.74 \text{ V} + 288.83 \text{ V}) = 2425.14 \text{ V}$

この電圧が中性点側導体を通り TB,TC 電圧に重畳します。  
 この地絡発生時の TB 電圧は次図の如く -923.65 V です。この電圧に上記の 2425.14 V  
 が重畳するので TB 電圧は 1501.49 V になろうとします。  
 しかしながら実際には回路の抵抗分によるダンピングがあるので、次図に示す如く 1241.6 V  
 になります。このように TB 電圧が大きくなるのは TA 振動中心電圧に地絡回復時の TA 電圧の振  
 動電圧が加わって来るためです。



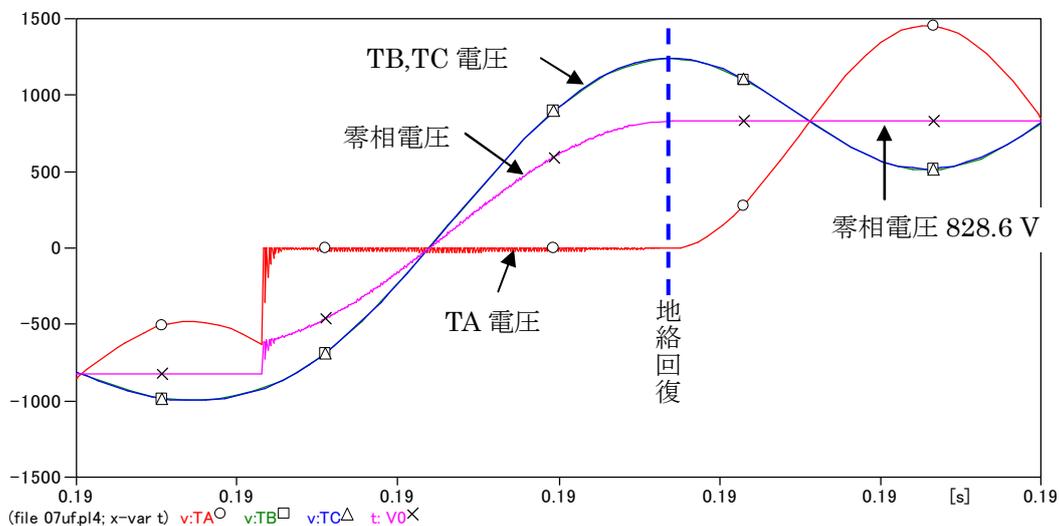
次に TC 電圧についてですが地絡発生時の TC 電圧は次図の如く -925.46 V です。この電圧に上  
 記の 2425.14 V が重畳するので TC 電圧は 1499.68V になろうとします。  
 しかしながら実際には回路の抵抗分によるダンピングがあるので、次図に示す如く 1244.1V に  
 なります。このように TC 電圧が大きくなるのは TA 振動中心電圧に地絡回復時の TA 電圧の振  
 動電圧が加わって来るためです。



地絡発生直後のこれら TA, TB, TC 電圧と零相電圧の関係を次図に示します。  
 地絡の期間中 TA 電圧は 0 V で TB, TC 電圧は次図の如く地絡回復時に最大に充電されます。  
 このため、零相電圧も

$V_0 = \frac{1}{3}(V_{TA} + V_{TB} + V_{TC})$  の関係で次図の如く地絡回復時に零相電圧は最大になり、次の地絡発生ま

で零相放電回路が形成されないので一定値に留まります。  
この一定零相電圧は  $V_{TB} = 1241.6$ ,  $V_{TC} = 1244.1$ ,  $V_{TA} = 0$  の関係から  $V_0 = 828.6$  V に達しています。



以上のごとく零相電圧が 5 pu を超えて大きくなるのは地絡時に前回の地絡回復時の TA 電圧の高周波振動成分が継続して商用周波数電圧に重畳するために発生しています。

## 8 電圧 Build up 現象シミュレーション上の留意点

上述のごとく電圧 Build up による最大電圧は地絡相の地絡回復時の電圧振動が回路定数に依存しているため、回路ごとに ATP でシミュレーションします。

発電機や変圧器の鉄心には飽和特性が存在しているため過電圧はこの飽和特性にも影響されます。したがって鉄心の非線形励磁特性も考慮する必要があります。

接続されている変圧器、発電機の巻線の対地キャパシタンス、回路の漂遊キャパシタンスも考慮します。

避雷器が設置されている時はその放電特性も考慮します。避雷器にとって間歇一線地絡の過電圧は持続性の過電圧となるため処理エネルギーが大きくなり厳しいものになります。

## 9 間歇一線地絡の過電圧抑制をするにはどうすれば良いかな

今までの説明で非接地系では間歇一線地絡が回復しても零相キャパシタンスに放電回路が無い  
ため、零相電圧は次の地絡発生まで一定値に留まるため、地絡相の電圧は零相電圧の影響を受け  
高い状態に留まるので次の地絡で発生する電圧変動分が大きくなりこれが B 相、C 相電圧に伝  
わり電圧の Build up につながるということがお分かり戴けたと思います。

このことから推測できるようなもし、対地キャパシタンスの残留電圧を放電させて次の地絡まで  
小さくしてしまえば次の地絡時の地絡相の電圧変動分が小さくなり、電圧 Build up は抑制され  
る筈ですね。

このことを利用しているものに例えば IEEE の C62.92 発電機の中性点接地抵抗(Neutral  
Grounding Resistor)の決定方法があります。このガイドに従って決定される抵抗値を中性点に  
設置すれば対地キャパシタンスと並列回路が形成され、放電回路が形成されるので、残留電圧を  
放電させて次の地絡まで地絡相電圧を小さくすることができます。

### 1) IEEE C62.92 の概略内容

(地絡時の kW loss/地絡が発生していない健全時の Capacitive kVA)  $\geq 1$  を満足するように中性  
点接地抵抗を選択すれば間欠一線地絡時の対地過電圧は常規対地電圧の約 2.6 倍に押さえるこ  
とが出来ることが紹介されています。

kW loss/Capacitive kVA  $\geq 1$  の意味は次のとおりです。

1 相の対地キャパシタンス値を C とし、NGR の中性点接地変圧器一次側換算値を R とします。  
1 線地絡電流での中性点接地抵抗の kW loss は、1 線地絡時の中性点電圧は中性点がされてい  
れば線間電圧 V の  $V/\sqrt{3}$  となるため次のようになります。

$$KW Loss = \frac{(V/\sqrt{3})^2}{R} = V^2 / (3 \cdot R) \quad (1)$$

又健全時の 3 相の Capacitive kVA は

$$Capacitive KVA = 3 \cdot \text{相電圧} \cdot \text{電流} = 3 \cdot (V/\sqrt{3}) \cdot (\omega \cdot C \cdot V/\sqrt{3}) = \omega \cdot C \cdot V^2 \quad (2)$$

です。

(1)、(2) より kW loss/Capacitive kVA  $\geq 1$  の時は  $V^2/3 \cdot R \geq \omega \cdot C \cdot V^2$  ですから、この式を変形すれ  
ば

$$R \leq 1/(3 \cdot \omega \cdot C) \quad (3)$$

の関係にすれば間欠一線地絡時の健全相の対地過電圧は約 2.6 倍に押さえることが出来るとい  
うことを言っています。

この時には CR 回路の時定数は

$3 \cdot C \cdot R \leq 1/\omega = 1/314.159 = 3.18 \text{ msec.}$  となります。

間欠一線地絡が半サイクルの 10 msec. 毎に起きるとすれば、充電された零相電圧は地絡が消滅  
して半サイクル後には中性点抵抗で

$e^{-0.01/3.18 \cdot 10^{-3}} = 0.043$  で 4.3% まで減衰してしまうので、健全相電圧の対地電圧は 2.6 倍に抑えら  
れるといっています。

このようになるか次の検討回路でシミュレーションしてみます。

## 2) 検討回路

今検討対象回路の対地キャパシタンスが  $0.31 \mu\text{F}$  の場合、IEEE の C62.92 の推奨に従うと、必要な中性点接地抵抗  $R$  は(3)式より  $R \leq 1 / (3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.31 \times 10^{-6})$  から  $R = 3422 \Omega$  となります。

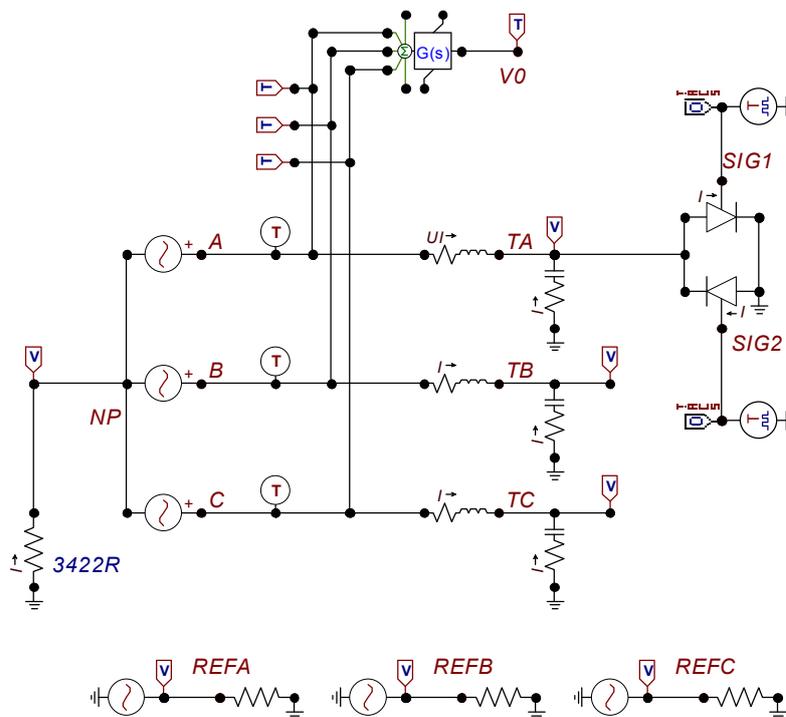
このように IEEE の C62.92 の推奨結果は高抵抗接地系となります。中性点接地抵抗を直接接地にすれば電圧の Build up は無くなりますが、その代わり地絡点の損傷はひどくなります。IEEE の C62.92 は地絡電流を制限しながら尚且つ電圧 Build up を抑制するための指針になっているのですね。

時定数は  $3 \cdot C \cdot R = 3 \cdot 0.31 \cdot 10^{-6} \cdot 3422 = 3.18 \text{ msec.}$  となります。

先の ATP シミュレーションの V\_build\_up.acp の中性点を  $3422 \Omega$  の抵抗で接地して間歇一線地絡を発生させ、零相電圧、健全相電圧、及び地絡相電圧の大きさを調べてみましょう。

その他の回路定数は V\_build\_up.acp と同じです。

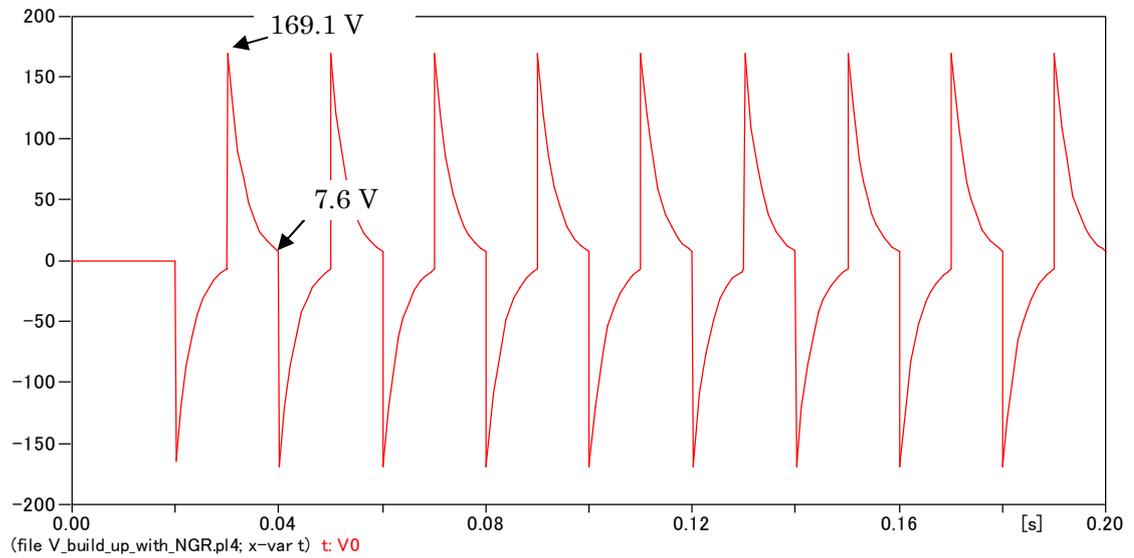
この  $3422 \Omega$  で接地した検討回路は次図の通りでプロジェクトファイル名は V\_build\_up\_with\_NGR.acp とします。



### 3) 計算結果

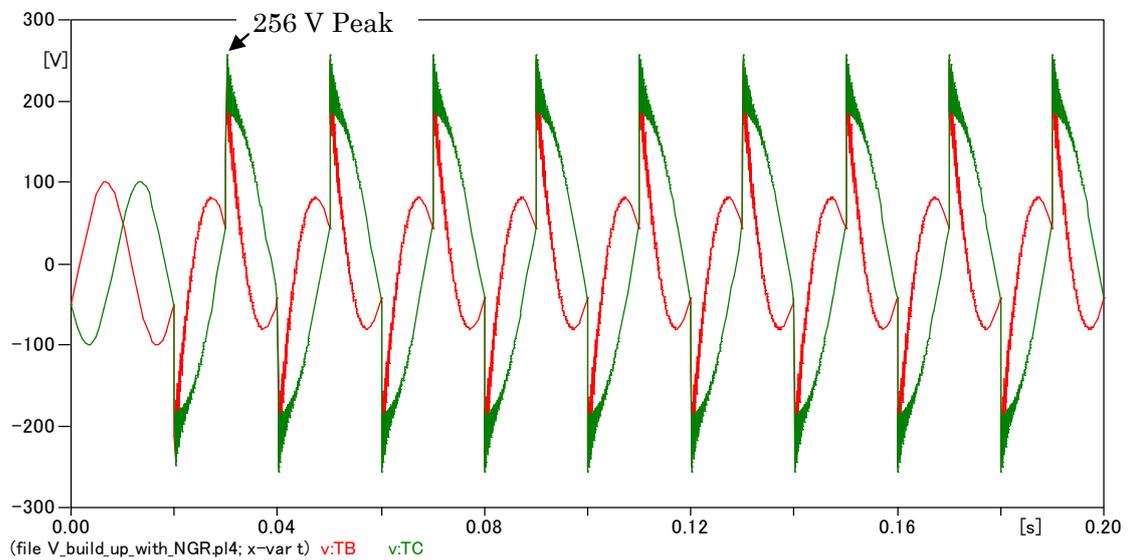
#### a. 零相電圧の大きさ

次図のごとく零相電圧は最大で  $1.691 \text{ pu} < 2.6 \text{ pu}$  となり、最大値になった後、零相キャパシタンスと NGR 抵抗で決まる時定数で次の地絡までに約  $7.6 \text{ V}$  に減衰しています。



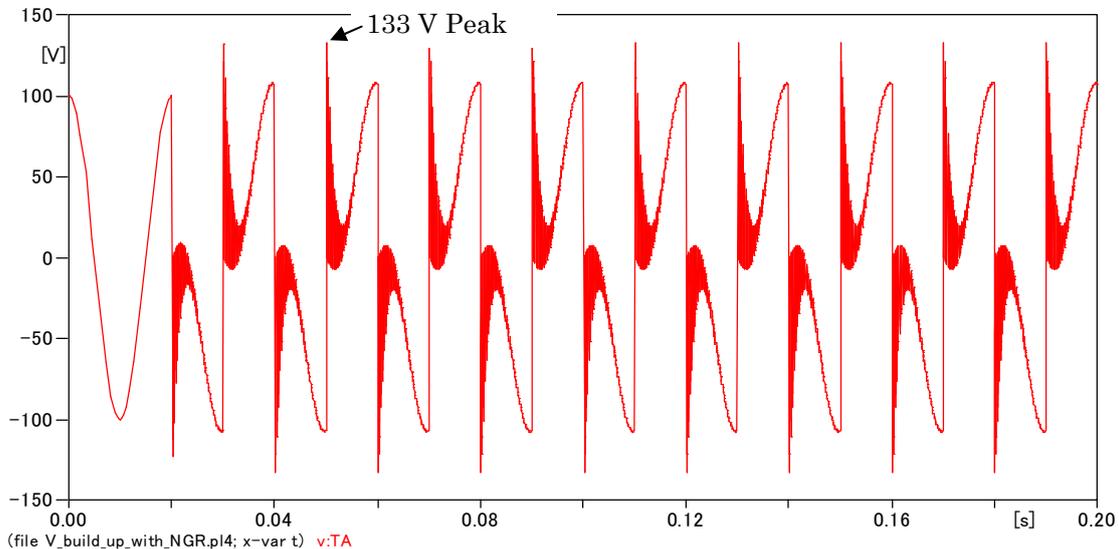
#### b. TB,TC 電圧の大きさ

健全相の最大電圧は  $256 \text{ V} < 2.6 \text{ pu}$  で規格の言っている通りになります。



### c. 地絡相の電圧の大きさ

地絡相電圧は 133 V となります。



このように IEEE C62.92 の推奨にしたがって中性点抵抗を選択すると、この中性点抵抗が零相キャパシタンスに蓄えられた電荷の放電回路となって、零相電圧を次の地絡発生までに下げるので、間歇一線地絡による電圧の Build up 現象は上図のように無くなります。

中性点接地抵抗はこのように実は零相キャパシタンスの放電回路の役割を担っているのですね。

尚同 Application guide C62.92 には横軸に (KW LOSS IN RESISTOR/CAPACITIVE KVA) 縦軸に %PEAK TRANSIENT VOLTAGE をとった図が掲載されています。これは 1953 年頃アナログ計算機の一つの Transient analyzer で計算した結果をプロットしたのですが、当時のものに比してはるかに処理能力がアップしている現在の PC でこのプロットどおりになるか検証するのも面白いことと思います。

## 4) IEEE C62.92 による間歇一線地絡時の過電圧抑制方法のまとめ

- この Application guide は非接地系を高抵抗接地系にして電圧 Build up を抑制するための抵抗値選定ガイドです。
- このガイドで算出された抵抗値を中性点に挿入すると、零相キャパシタンスとこの抵抗値が極めて短い零相電圧の減衰時定数を構成するので、一線地絡で生じる零相電圧を次の地絡発生まで速やかに減衰し、電圧 Build up の発生を抑制することができます。