

Rev.0 2012 年 12 月 01 日
Rev.1 2016 年 7 月 22 日 URL 変更

同期発電機のシミュレーション

ATP 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-emptp-research.o.oo7.jp/>

まえがき

この解説書は 11.項の参考文献 1)で紹介されている電力系統安定度のシミュレーション例を取り上げ、ATPDraw を使ってシミュレーションする場合について解説します。

参考文献 1)のシミュレーション例の概要は次のとおりです。

Fig.1-1 に示す一機対無限大母線の電力系統内で発電機が負荷運転中に三相短絡が発生後、4.5 サイクルで短絡を除去した時、系統の安定度が保てるかシミュレーションしています。

このシミュレーションでは発電機励磁制御系に Automatic Voltage Regulator (以下 AVR と略します)と Power System Stabilizer (以下 PSS と略します)を付加しており、それらの制御効果も入れて安定度シミュレーションしています。

ATP でこのシミュレーション例を計算させると、発電機、電気回路、及び TACS (Transient Analysis of Control Systems、以下 TACS と記述します)の諸量が計算タイムステップ毎に高速計算され、その結果をプロット波形で直ちにすることができ、ATP(EMTP)の非常に強力な機能を実感できます。

本稿では初めて同期発電機を使ったシミュレーションをする時おそらく遭遇すると思われる入力データの作成上の疑問点、留意しなければならない点、励磁系の正規化(初期化)方法、潮流計算の方法などの基礎的な諸点について特に注力して解説しました。

ATP, ATPdraw がインストールされていればこのシミュレーション例をすぐ計算できるように関連ファイルも同時にアップロードしました。

本稿中の Fig. No., 数式 No.は各項ごとに採番しています。

例 Fig.7.4-2 は 7.4 項の二番目の図という意味です。Fig. No.から項目を検索するのにご利用ください。

本稿では ATPDraw は Version 5.6p6 を使っています。

尚、十分気をつけて作成したつもりですが、力不足で至らぬ点がまだ多々あるかも知れません。

本解説書は御自由にご利用ください。但しこの解説書により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。

以上をご了解の上、御利用ください。

目次

まえがき.....	2
1. 検討対象回路.....	7
1.1 検討対象電気主回路の作成と説明.....	8
1) Synchronous generator.....	8
2) Splitter.....	9
3) 90, 91 の TACS 信号源.....	9
4) Measuring switch	9
5) 電圧 Probe	10
6) 変圧器.....	10
7) Transmission line(送電線路)インピーダンス	11
8) Line reactance compensator.....	12
9) 故障点インピーダンス.....	12
10) Fault switch.....	12
11) Infinite bus side reactance.....	13
12) Voltage source.....	13
2. シミュレーション条件	14
1) 電源	14
2) 機器データ	14
3) 三相短絡発生と除去の時間.....	14
4) 鉄心飽和.....	14
5) 検討対象電気回路.....	14
6) 励磁制御ブロック図	14
7) 同期発電機モデル.....	14
8) ATP の計算条件	14
3. シミュレーションの作業概要.....	15
1) ATPDraw による回路図作成.....	15
2) 必要な機器データの収集とデータの変換及びデータ入力作業.....	15
3) 発電機が無負荷、定格電圧で運転時の界磁電圧(V)調査.....	15
4) 潮流計算の実施	15
5) 発電機が定格電圧および 801.55MW で運転時の界磁電圧(V)調査.....	15
6) 発電機が定格電圧、801.55MW で運転時の界磁電圧の P.U.値を求める	16
7) TACS による励磁制御系の作成.....	16
8) 界磁電圧(P.U.)の正規化(初期化)作業.....	16
9) シミュレーション実施.....	16
4. 必要な機器データ、データ変換及びデータ入力.....	17
4.1 発電機関係データ	17
1) Class1 S.M. data cards 用データ.....	17
1.1) 発電機電圧 Volt.....	17
1.2) 定格周波数 Freq.....	18
1.3) 発電機電圧位相 Angle.....	18
2) Class 2 S.M. data cards	19
2.1) 裕度用カード.....	19
2.2) PARAMETER FITTING カード.....	19
2.3) DELTA CONNECTION 用カード.....	20
3) Class 3 S.M. Data cards.....	20
3.1) 極数 Poles	20
3.2) SMOUTP.....	20
3.3) SMOUTQ	21
3.4) 定格容量 RMVA	21
3.5) 発電機定格電圧 RKV.....	21

3.6) AGLINE.....	21
3.6.1) 鉄心飽和を考慮する時の入力方法	22
3.7) 発電機のリアクタンスと時定数.....	24
3.8) 突極機の模擬.....	25
4) Class 4 S.M. Data cards.....	25
4.1) HICO (原動機系と発電機系の合計慣性モーメント WR^2).....	26
4.2) 速度偏差による自己ダンピング係数 DSR.....	27
4.3) 絶対速度による自己ダンピング係数 DSD	27
5) FM と NECHUN の入力値	27
5.1) FM 値	27
5.2) MECHUN	28
4.2 発電機アイコンへの入力したデータのハードコピー	29
4.3 発電機以外の回路構成機器の入力データとデータ変換.....	31
4.3.1 変圧器データ	31
1) 与えられているデータ.....	31
2) 変圧器漏れインダクタンス値の算出	31
3) 変圧器の角変位	32
4) 変圧器アイコンへの入力データ	34
4.3.2 送電線路データ	34
1) 与えられている送電線データ	34
2) 送電線データのデータ変換.....	35
3) 送電線アイコンへの入力データ	35
4.3.3 線路補償用コンデンサ用データ	36
4.3.4 故障点インピーダンス用入力データ	37
4.3.5 短絡発生 / 除去用スイッチの入力データ	38
4.3.6 無限大母線側のリアクタンス用データ	38
4.3.7 無限大母線電圧と位相データ	39
1) 与えられているデータ.....	39
2) 無限大母線電圧源の位相について	39
3) 無限大母線用電圧源アイコンへの入力データ	40
5. 潮流計算	41
5.1 潮流計算をする理由.....	41
5.2 潮流計算のプログラムについて	41
5.3 潮流計算の作業.....	41
5.3.1 潮流計算の準備.....	41
1) 変更点その 1、潮流計算の宣言の挿入.....	41
2) 変更点その 2、潮流条件の追加	42
3) 変更点その 3) 潮流計算条件の追加	42
5.3.2 潮流計算結果	44
5.4 潮流計算結果の反映.....	45
6. 与えられた励磁系制御ブロック図.....	46
7. TACS による発電機界磁電圧制御.....	47
7.1 概要	47
7.2 ATPDraw による完成した電気回路と励磁制御ブロック図	48
7.3 ATPDraw による励磁制御ノードマップの作成と説明.....	49
7.4 発電機電圧を TACS 系に取り込む	51
7.5 発電機主回路電圧 ET (P.U.) の演算.....	52
1) 採用している電圧検出アルゴリズム.....	52
2) 電圧検出アルゴリズムの入力方法	53
3) 発電機電圧 ET の初期値	55

4) 検出される発電機電圧 $ET(P.U.)$ の値	57
7.6 ノード ET と $ET1$ 間の一次遅れ伝達関数ブロック	58
1) 一次遅れ伝達関数に使えるアイコン	58
2) Low pass filter を使う場合	58
3) Order 1 の伝達関数を使う場合	59
4) 伝達関数 General を使う場合	62
5) 伝達関数効果の確認	63
7.7 発電機電圧の偏差電圧信号の検出	64
7.8 ノード $ET0$ の発電機基準電圧用アイコン	66
1) 呼び出し方法	66
2) 発電機基準電圧アイコンへの入力データ	66
7.9 ノード $AVR1$ の伝達関数 $G(s)$	67
1) 伝達関数 $G(s)$ の呼び出し方法	67
2) 伝達関数 $G(s)$ への入力データ	67
7.10 PSS 系の説明	69
1) 発電機有効電力 “ $PG(P.U.)$ 値” の演算	69
2) $PG(P.U.)$ の初期値	71
3) ノード $PG0$ の発電機基準電力用アイコンについて	72
4) 発電機有効電力の偏差信号	73
5) ノード $PSS1$ の伝達関数 $G(s)$	73
6) ノード $PSS1$ から VS までの伝達関数群	74
6-1) ノード $PSS1$ と $PSS2$ 間の伝達関数の入力データ	74
6-2) ノード $PSS2$ と $PSS3$ 間の伝達関数の入力データ	75
6-3) ノード $PSS3$ と VS 間の伝達関数の入力データ	75
7.11 ノード $AVR1$ と $AVR2$ 間の伝達関数	76
7.12 直流信号源 $EF0(P.U.)$ を定常状態の界磁電圧として追加する	77
1) $EF0(P.U.)$ を求める式	77
2) 発電機の無負荷界磁電圧 EFD_0 を求める方法	77
3) EFD_i を求める方法	79
4) $EF0$ の値	80
5) $EF0$ 用直流信号源アイコンへの入力データ	81
7.13 ノード $AVR3$ の伝達関数 $G(s)$	82
7.14 励磁系の正規化作業	82
7.15 フィードバック回路	83
7.16 EFD を発電機モデルに渡す	83
8. 計算条件の設定	84
8.1 Simulation タグへの入力データ	84
8.2 Output タグへの入力データ	86
8.3 Format タグへの入力データ	86
9. シミュレーション	87
1) シミュレーションの実行	87
2) 計算結果の Plot 波形表示	87
3) シミュレーションの Plot 波形例	87
4) $ANG1$ の説明	91
4-1) 発電機 A 相端子電圧位相 -48.5 度、無負荷状態の $ANG1$	91
4-2) 発電機 A 相端子電圧位相 0 度、無負荷状態の $ANG1$	92
4-3) 潮流状態のベクトル図	93
4-4) $ANG1$ についての知見	93
10. PARAMETER FITTING の検討	94
11. 参照文献	96

12. 同期機モデルに関する Can /Am EMTP News の抜粋	96
1) 1996 年 10 月 Can/Am EMTP News	96
2) 1997 年 4 月 Can/Am EMTP News	96
3) 1997 年 10 月 Can/Am EMTP News	96
4) 1998 年 7 月 Can/Am EMTP News	97
5) 1999 年 4 月 Can/Am EMTP News	97
6) 1999 年 7 月 Can/Am EMTP News	97
7) 2002 年 1 月 Can/Am EMTP News	98

1.1 検討対象電気主回路の作成と説明

ATPDraw で Fig.1-1 の電気主回路を作成するにはフローティングメニューから下記の機器アイコンを呼び出します。

各機器アイコン間を接続するには機器端子でマウス左ボタンを押したまま相手側機器端子までドラッグし相手側の端子でマウスの左ボタンをクリックすれば接続線が引かれて接続されます。

各ノードにはノード名を付します。ノード名は各ノードの両端に在るいずれかの機器端子をマウス右クリックして **Node data** の窓に入力します。

ATPDraw の基本的な操作については ATP(EMTP)の小さな研究室の「初めての方の ATP の使い方」に記載しているので必要により御参照願います。

本項では各アイコンの呼び出し方法とアイコンの説明をします。各アイコンへ入力する機器データは第 4 項で説明します。

以下に Fig. 1-1 の下から上へアイコンを説明して行きます。

ATPDraw で励磁制御系を作成する方法は 7.3 項に記しています。

1) Synchronous generator

アイコン:



Fig. 1.1-1

Type 59 の同期発電機モデルです。

Type 59 は ATP(EMTP)で従来から広く使われて来ている Park の式を使った d-q-0 領域で扱う同期機モデルです。

このアイコンの呼び出し方法；ATPDraw のフローティングメニューから次の順番に選択して呼び出します。(以下同様なのでこの断り書きは以後省略します。)

Machines → SM 59 → 8 control

ここで 8 control とは発電機への入出力用 TACS 信号が 8 つまで使える同期発電機モデルの意味です。

今回は TACS 出力で発電機界磁電圧を制御するため 8 本の内、任意の一端子を TACS の発電機界磁電圧信号用に使っています。関連項目 7.2 項、7.16 項。

ATP には Type 59 のほかに Type58 のモデルが用意されています。

Type 58 は Type 59 の数値不安定現象と、鉄心の飽和模擬を改良したモデルです。

ATPDraw の Menu は現在 Type 59 の同期機モデルしかありませんが、Type 58 として働かせたいときは一度 Type 59 の同期発電機モデルを使って .atp ファイルを完成し(.atp ファイルを作成するには完成回路を計算させるかまたは Menu→Sub-process→Make ATP file で行えます。)、その .atp ファイル中の同期発電機タイプを 59 から 58 へと上書き保存し、その上書き保存した .atp ファイルを計算させれば Type 58 同期発電機モデルとして動きます。

Type 59 と Type58 同期発電機モデルの詳細な相違点については 11 項の参考文献 6).と 7).をご参照願います。

TACS 用の 8 本の入出力端子とは別に同期発電機モデルから直接出力される各種出力(発電機電圧、電流、ロータ速度など)があります(ルールブック Section VIII の Class 5 SM data cards)。後者については ATPDraw が作る .atp ファイルは自動的に全種類を出力する内容になります。したがって後者の出力を指定しなくとも計算後全種類のプロット波形を見ることができます。

このアイコンを右クリックして開くとデータ入力窓にデフォルトの入力データが示されます。これらのデータに今回用のデータを上書きすることでデータが入力されます。この点は他のアイコンも同じです。

2) Splitter

アイコン:



Fig. 1.1-2

アイコンの呼び出し方法 ;

Probes & 3-phase → Splitter(3 phase)

一本のラインで描かれている三相主回路を単相の 3 本に分割します。

この Splitter の使用目的は後述の Measuring switch と共に使うことにより、各相の電圧と電流の TACS 信号名を区別して検出するためです。区別できる理由は下記 4) 項に記しています。これら電圧、電流の検出の詳細は電圧については 7.4 項、電流については 7.10 の 1) に記しています。

検出された各相の TACS 電圧信号は TACS で模擬した AVR に発電機電圧を供給すると共に各相の TACS 電流信号と乗じて発電機有効電力の計算に使われます。

単相×3 本にした時の相配列は次のごとく大変良く設計されています。

垂直方向に Splitter を配置した時、相配列は人為的にひねらない限り、電源の位置に無関係に常に向かって右端から左端へ A,B,C 相の順になります。

この関係は 7.4 項の「発電機電圧を TACS 系に取り込む」の中で利用しています。

また水平方向に Splitter を配置した時は常に上から下へ A,B,C 相の順になります (人為的なひねりは Probe & 3-phase→Transp1~Transp4 を使えば可能です)。

3) 90, 91 の TACS 信号源

アイコン:

Fig. 1.1-3

アイコンの呼び出し方法 ;

TACS → Coupling to circuit

これらの信号源の目的は電気回路から電圧と電流を TACS 系に取り込むために使われます。

90 は回路電圧を検出する TACS の電圧信号源で、取り付けられた回路の相電圧を検出します。

91 は回路電流を検出する TACS の電流信号源で、取り付けられた相の電流を検出します。

90, 91 の切り替えはこのアイコンを右クリックして開く入力窓の Type の箇所を 90 又は 91 にすることで切り替えられます。

4) Measuring switch

アイコン:



Fig. 1.1-4

アイコンの呼び出し方法 ;

Switches → Measuring

Measuring switch は回路電流、対地電圧、電力、エネルギーを測定できるスイッチです。

このシミュレーション例では①回路インピーダンスに影響を与えずに相電圧、各相電流を検出するためと、②各相の電圧、電流の TACS 信号源の名前を区別するために使っています。

各相電圧と各相電流の TACS 信号源の名前を区別しなければならない理由は次のとおりです。もし Fig.1-1 で Measuring Switch を設けないと途中にインピーダンスもスイッチも入っていないのでノード名は GEN または GENS のいずれかに統一しなければなりません。たとえば GEN のノード名に統一すると検出される相電圧と各相電流の TACS 信号の名前は共に GENA, GENB, GENC となってしまいます。このため ATP プログラムはこれらの相電圧と相電流を区別できずエラーになるためです。

GENA, GENB, GENC となる説明: TACS 信号の名前は Splitter で分岐されるノード名に相名(A,B,C)を付けたものになるためです。

ノード名を GENS に統一しても相電圧と各相電流の TACS 信号源の名前は共に GENSA, GENSB, GENSC となってしまい区別できません。このため Measuring Switch を設けています。

この Measuring Switch を Fig. 1-1 のごとく挿入すれば、TACS 電圧信号は GENA, GENB, GENC になり、また TACS の電流信号は GENSA, GENSB, GENSC の TACS 信号になり両者を区別できるようになります。

5) 電圧 Probe

アイコン:



Fig. 1.1-5

アイコンの呼び出し方法 ;

Probes & 3-phase → Probe Volt

回路の相電圧を検出するために取り付けています(同じアイコンがノード MID, RECV にも挿入されていますが同じ役割です)。これらの電圧 Probe を付けていれば ATP で計算後、この電圧 Probe を付けたノードの相電圧プロット波形を見ることができます。

6) 変圧器

アイコン:

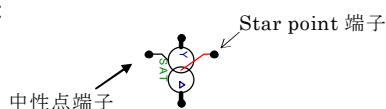


Fig. 1.1-6

アイコンの呼び出し方法 ;

Transformers→Saturable 3 phase

これで呼び出される変圧器アイコンは次のとおりです。



Fig. 1.1-7

このアイコンを右クリックして、Coupling の部分を Primary ; Star, Secondary ; Delta を選択し、且つ 3Winding の Check を外せば Fig.1.1-6 の変圧器アイコンになります。

角変位は後述の 4.3.1 の 3)項のごとく Yd1 なので Phase shift は低圧側相電圧位相は高圧側相電圧位相より 30 度進れとしています。

変圧器アイコンから出ている Star point 端子は鉄心の三相分の非線形飽和特性と鉄損抵抗を変圧器アイコンに外付けして使う場合の端子です。(これを使う時は変圧器内蔵の励磁特性に何も入力しません。)

今回は変圧器の励磁特性は線形且つ鉄損抵抗も無しと仮定するので変圧器内部の励磁特性も

入力せず、この Star point 端子も開放のままです。

Star point 端子については「ATP の小さな研究室」の解説集中の「ATP の変圧器模擬」5.1 項と 8 項でも解説しています。

7) Transmission line(送電線)インピーダンス

ノード SEND と MID 間のアイコンが送電線インピーダンスです。

この送電線は完全に対称な集中定数で表現される相互結合線路であるとしています。

アイコン:



Fig. 1.1-8

アイコンの呼び出し方法 ;

Lines/Cables → Lumped → RL Coupled 51.. → 3 ph. seq.
として呼び出します。

ご注意

3 phase では無く、3 ph. Seq.を選択します。

3 ph. Seq.の Seq.は零相、正相の対称分の意味です。

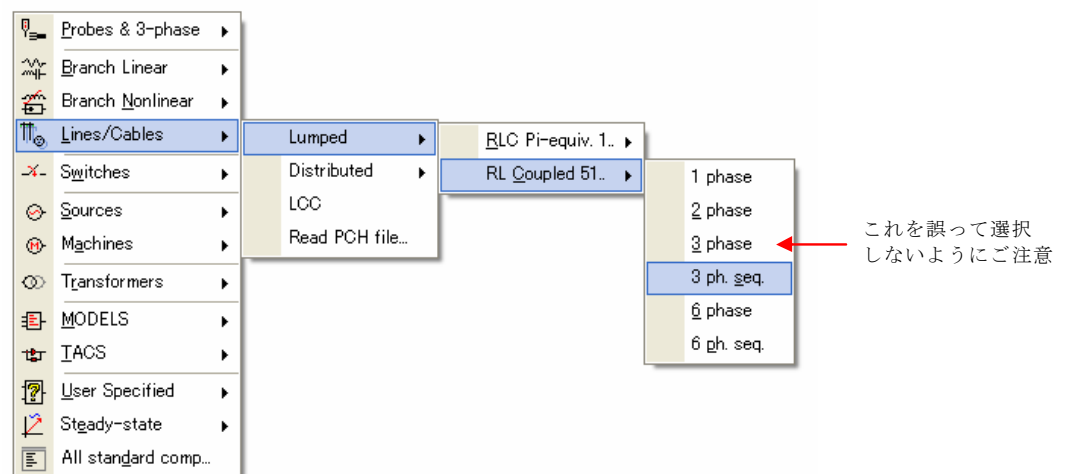


Fig. 1.1-9 送電線アイコンの呼び出し

この線路は Rule book Rb-080 のセクション IV-C の相互結合線路の Optional use で記載されている線路です。このモデルは相互結合線路の入力データとして自己インピーダンスと相互インピーダンスを入力する代わりに、零相インピーダンスと正相インピーダンスを入力するだけで済む簡便で実際的な方法です。

尚自己インピーダンスと相互インピーダンスで入力する方法を採用する時の送電線のアイコンは Lines/Cables → Lumped_RL Coupled 51.. → 3 phase で呼び出して使います。

8) Line reactance compensator

ノード MID と RECV 間のキャパシタンスは線路インダクタンスの補償用コンデンサです。

アイコン:



Fig.1.1-10

アイコンの呼び出し方法 ;

Branch Linear → RLC3-ph

この呼び出しによるアイコンは次のようになっています。



Fig. 1.1-11

このアイコンは入力窓で値を入力した回路素子へ変化します。

キャパシタンス値だけを入力し、 $R=L=0$ として OK ボタンを押せば R-L-C 直列回路のアイコンから三相のキャパシタンスアイコンに変化します。

9) 故障点インピーダンス

ノード RECV-FAULT 間のインダクタンス及び FAULT-大地間の C-R 直列回路。

アイコン:



Fig. 1.1-12

アイコンの呼び出し方法 ;

上記 8)項と同じです。

数値を入力した回路素子に変化します。

10) Fault switch

ノード FAULT と大地間に接続されたスイッチはユーザが入力した時間で閉路、開路し、三相短絡の発生と除去を模擬します。

このスイッチの右側が接地されているので、このスイッチを閉じれば(開けば)三相短絡が発生(除去)されます。

注)故障除去について;このスイッチは 4.3.5 項のごとく電流遮断は無しとしているので指定開路時間後の各相電流の零点で順次遮断されて行きます。

アイコン:



Fig. 1.1-13

アイコンの呼び出し方法 ;

Switches → Switch time 3-Ph

11) Infinite bus side reactance

ノード RECV と INF 間に接続されているインダクタンスで無限大母線側の系統リアクタンスです。

アイコン:



Fig. 1.1-14

アイコンの呼び出し方法 ;
前述の故障点インピーダンスと同じです。

12) Voltage source

ノード INF に接続されている電圧源は無限大母線の電圧源です。

アイコン:



Fig. 1.1-15

アイコンの呼び出し方法 ;
Sources → AC Source(1&3)

これで呼び出されるアイコンは次のようになっています。



Fig. 1.1-16

このアイコンで電圧源、三相、接地形を選択して Fig.1.1-15 のアイコンにします。

2. シミュレーション条件

次の条件でシミュレーションします。

1) 電源

Fig. 1-1 で発電機および無限大母線電圧源は次の状態であるとしします。

- a. 無限大母線電圧源の運転電圧は 500KV(=対地 Peak 電圧: 408248.0V)、A 相電圧の位相は -60° の対称電圧源であるとしします。無限大母線の -60 度について?と思われる場合は 4.1 項の 1.3) の説明をご参照ください。
- b. 発電機が定格電圧および有効電力出力 801.55MW (この有効電力の大きさは定格出力、定格力率時の有効電力の 0.998 P.U.の有効電力です=892.4 MVA×定格力率 0.9 遅れ×0.998 P.U.)で運転中に三相突発短絡が発生するものとしします。
- c. 短絡事故発生前の発電機 A 相端子電圧位相は不明であり、これは潮流計算を行って決定するものとしします。

2) 機器データ

系統構成機器のデータは 4.項に示すとおりとしします。

各アイコンに入力したデータは第 4 項にハードコピーで示しています。ATPDraw がインストールされていれば今回アップロードしている `tacsgen_model_with_inicon.acp` の各機器アイコンを右クリックして入力データを見ることができます。

3) 三相短絡発生と除去の時間

Fault switch を $t = 0.11462 \text{ sec.}$ で三相同時に閉じて三相短絡事故を発生させ、短絡発生後 0.075 sec.(60Hz で 4.5 サイクル)後に Fault switch を開放するものとしします (= 三相短絡事故の除去)。

この三相短絡事故の発生と除去により発生する過渡電力動揺で発電機が引き続き安定に運転継続できるかシミュレーションします。

4) 鉄心飽和

ATP で発電機及び変圧器の鉄心飽和を模擬できますが本稿では飽和は無いものと仮定しています。

飽和模擬が必要なときは次の箇所を御参照願います。

- a. 変圧器の飽和模擬：「ATP の小さな研究室」の解説集中の「ATP の変圧器模擬」
- b. 発電機の飽和模擬：本稿の 4.1 項の 3.6.1)

5) 検討対象電気回路

Fig. 1-1 に示す回路です。

6) 励磁制御ブロック図

6 項の「与えられた励磁系制御ブロック図」どおりです。

7) 同期発電機モデル

Type 59 の発電機モデルを使用してシミュレーションします。

8) ATP の計算条件

8.項の「計算条件の設定」どおりです。

3. シミュレーションの作業概要

必要な作業概要を把握しておいたほうが良いと思われるので以下に本稿でこれから説明する作業概要を記しておきます。

下記の作業順序は一例です。

電気回路図(ノードマップ)と励磁制御系ブロック図は既に入手済みであるとし、それ以降の作業から解説します。

1) ATPDraw による回路図作成

入手した電気回路図に従い、ATPDraw で Fig. 1-1 のノードマップを作成します。

各機器のアイコンの呼び出しは 1.1 に記したとおりです。

各ノードには Fig.1-1 に記されたノード名を付けます。

2) 必要な機器データの収集とデータの変換及びデータ入力作業

4.項に示す各機器へ入力するデータを収集します。

機器データの内、たとえば 線路定数の P.U.値表示のリアクタンス値やキャパシタンス値、変圧器の漏れリアクタンス(%IX)などは予め mH 値、 μ F 値へデータ変換しておきます。

これらの変換が必要な項目は 4.項の「必要な機器データ、データ変換及びデータ入力」に示しています。

このようにして準備した各種の機器データをそれぞれのアイコンに入力(デフォルトのデータに上書き)します。

4.2 項 と 4.3 項にこれら入力作業を終えた各機器の入力データのハードコピーを示しています。

3) 発電機が無負荷、定格電圧で運転時の界磁電圧(V)調査

発電機が無負荷で定格電圧で運転する時の界磁電圧 EFD_0 (V)を調べます。この電圧は本項の 6)で使うため調査するものです。

この電圧の調査方法の詳細は 7.12 項の 2)に記しています。

4) 潮流計算の実施

シミュレーション条件で述べたごとくこのシミュレーションでは発電機端子電圧位相が不明のため ATP で潮流計算を行わせ発電機の定常状態の負荷運転中における A 相端子電圧の位相を決定します。

潮流計算の詳細は 5 項に記しています。

5) 発電機が定格電圧および 801.55MW で運転時の界磁電圧(V)調査

上記 4)の潮流計算で得られた A 相の発電機端電圧位相を発電機アイコンに入力して ATP を再計算させれば発電機が定格電圧および有効電力出力 801.55MW 時の計算になります。

計算後に生成される .lis ファイルからこの運転時の界磁電圧値 EFD_ℓ (V)を調べます。この調査方法の詳細は 7.12 項の 3)に示しています。

調べた界磁電圧値 EFD_ℓ (V)は上記 3)の界磁電圧 EFD_0 (V)と共に次の 6)で使います

6) 発電機が定格電圧、801.55MW で運転時の界磁電圧の P.U.値を求める

TACS 内の諸量は通常 P.U.値で扱います。

指定潮流で定常運転時の界磁電圧にあたる TACS 量も P.U.値で扱います。

この指定潮流で定常運転時の界磁電圧の P.U.値は上記 3) と 5)の界磁電圧から次式で求めます。

$$\text{指定潮流で定常運転時の界磁電圧(P.U.)} = \frac{5)\text{の界磁電圧(V)}}{3)\text{の界磁電圧(V)}} \quad (3-1)$$

注) (3-1)式は後述の 7.12 項の 1)に示す(7.12-1)式と同じです。

TACS による界磁電圧制御は(3-1)式で表される界磁電圧(P.U.値)を正規化した上でスケーリングして使うことになっています。(Rule bookRb-080-LEC, VIII-A. General description, 及び同 Rule bookVIII-C-6 項)。

このため(3-1)式で求めた指定潮流で定常運転時の界磁電圧(P.U.)を先ず界磁回路に加えておきます。Fig. 7.2-1 の TACS 系のノード EF0 の直流信号源がこの加えた定常時の界磁電圧(P.U.)です

正規化作業はこの後の 8)で行います。

7) TACS による励磁制御系の作成

与えられた励磁制御系ブロック図に従い ATPDraw で Fig. 7.2-1 のごとく励磁系を作成します。各ノードには与えられた励磁制御ブロック図に記されたノード名を付けます。

ATPDraw で作成した励磁系の各種伝達関数は与えられた励磁制御ブロック図に則り、機械的に入力できます。

詳細は 7.項で解説します。

尚、次の 8)に関する TACS 部分は与えられた励磁制御ブロック図に無いもので、ユーザが設ける部分です。

8) 界磁電圧(P.U.)の正規化(初期化)作業

6)項で加えた定常時の界磁電圧 EF0 を正規化(初期化)して発電機モデルに渡します。

正規化した値で発電機モデルに渡すと言う事は EF0 の値を 1.0 P.U.に変換して発電機モデルに渡すことを意味します。

この変換は Fig.7.2-1 のノード EFD の Fortran statement で行っています。

この部分は Fig.6-1 の与えられた励磁制御ブロック図中に K で示した部分になります。

この作業が TACS の励磁系で最も意外な点であると思います。

この正規化をしないと与えられた励磁制御ブロック図どおり入力しても正しいシミュレーションができません。

正規化作業の詳細は 7.14 に記載しています。

9) シミュレーション実施

以上の作業を終えるといよいよシミュレーションの実施(ATPDraw で作成した回路を開いた状態でメニューバーから ATP→Run ATP をクリックして計算実施)となります。

以上のごとく作業量が多いですが、一つ一つの作業内容は単純です。

各作業を確実にこなして次の作業に進むことが肝要です。

4. 必要な機器データ、データ変換及びデータ入力

今回のシミュレーション例に必要な機器データと必要なデータの変換、及びデータ入力について説明します。

4.1 発電機関係データ

発電機に必要な入力データは以下のとおりです。

ATPDraw の発電機アイコンへ入力する順番で説明します。

ATPDraw の発電機アイコンのデータ入力窓では、入力データが Rule book の Section VIII(同期機用)の Class 1 S.M. Data Cards から Class 5. S.M. Data Cards までのどの Class の Data card に属するか区別していません。Rule book を参照する場合もあると考えられるので以下の説明では各入力データがどの Class の Data cards に属するか表示しておきます。

ATP の同期発電機の Rule book は JAUG のパスワード保護サーバに Rb-080.pdf と Rb-080-LEC.pdf が用意されています。後者の方が後からリリースされたもので内容の一部は新しくなっています。

新しくなっている部分の例:-

MECHUN の追加	(本稿の参照箇所：4.1 項 5.2))
PARAMETER FITTING の内容	(本稿の参照箇所：4.1 項 2.2)および 5.1))
XCAN の追加	(本稿の参照箇所：4.1 項 3.7)

1) Class1 S.M. data cards 用データ

下記の必要なデータ項目の右側に記されている英語名称が ATPDraw で表示されるデータ入力項目です。

発電機の各種リアクタンス、時定数、抵抗のことを一般に発電機定数とか発電機データと呼ばれますが、Rule book ではこれらをパラメータと称しているのでご注意ください。

例)本項の 2.2)の PARAMETER FITTING は発電機定数を Park モデルに合うように最適化するという Special request word になります。

1.1) 発電機電圧 Volt

入力値 = 21228.9 V

事故発生前の発電機端子相電圧の Peak 値の運転電圧を Volt の単位で入力します。

この入力項目はあくまでも運転電圧であり、指定の潮流条件によっては必ずしも定格電圧の相電圧の Peak 値になりません。潮流計算結果の発電機相電圧の peak 値にする必要です。

この例ではシミュレーション条件より発電機は定格電圧で運転しているとしているので Peak 値は

$$\frac{26000}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 21228.9 \quad (\text{V}) \quad (4.1-1)$$

この値を入力します。

尚、5 項で発電機有効電力と 21228.9(V)の発電機電圧を拘束して潮流計算していますがこの潮流計算結果も発電機電圧 21228.9 V、A 相端子電圧位相が -48.5° で収束するので 21228.9 V で支障ありません。

発電機が無負荷状態から突発短絡が発生する場合は潮流計算は不要ですが、発電機入力項目には発電機電圧のほかに下記 1.3)の発電機電圧位相もあります。発電機が或る潮流で運転している時の発電機電圧位相は通常不明であり潮流計算を行って発電機電圧と発電機電圧位相を決めてやる必要があります。

潮流は無限大母線電圧の大きさとその位相、線路インピーダンス、発電機端子電圧の大きさと発電機端子電圧の位相から決まる潮流になります。

1.2) 定格周波数 Freq

系統および発電機の定格周波数が 60Hz なので入力値 = 60 とします。

50Hz の場合で且つ XOPT,COPT に 50 を入力する場合は 8.1 で述べているごとく Power frequency の項目にチェックを入れます。これにより .atp ファイルに POWER FREQUENCY 50 の special request card が自動挿入されます。Power frequency の項目にチェックを入れる理由は 8.1 に記しています。

1.3) 発電機電圧位相 Angle

入力値 = -48.5 度

この -48.5 度は A 相の発電機端子電圧の位相値です。-48.5 度を測る基準の位相は 0 度です。今回のこの Angle 値は潮流計算の結果で得られています。

B,C 相の端子電圧位相の入力は発電機電圧は対称電圧のため不要です。

この A 相端子電圧位相 Angle のベクトル図を Fig. 4.1-1 に示します。

発電機端子電圧、無限大母線電圧の大きさおよび線路インピーダンスの大きさが固定されていれば潮流の大きさを決定するのは発電機端子電圧位相と無限大母線電圧位相に依存することになるので、無限大母線電圧の相電圧位相についても言及しておきます。

無限大母線相電圧位相は多くの場合 0 度にとられますがこのシミュレーション例では 2.項のシミュレーション条件に示したごとく -60 度(下図をご参照願います)に取っています。

潮流は上述のごとく無限大母線電圧、発電機電圧、および線路インピーダンスが固定なら無限大母線相電圧位相と発電機端子相電圧位相の位相差とで決まります (Fig.5.1-1 の朱記部)。

このため無限大母線の電圧位相値を任意に取っても発電機位相との位相差の 11.5 度を変えなければ同じ潮流になります。

このため無限大母線電圧の位相を 0 度では無く、-60 度としてもなんら差し支えありません。

多くの場合無限大母線電圧位相を 0 度にするということは下図ベクトル図で C を中心にして三角形 ABC を半時計方向に回転させ無限大母線電圧位相を 0 度の位置にあわせて計算することを意味します。この時同じ潮流を流すには発電機 A 相端子電圧位相を +11.5 度にします。-48.5 度、-60 度の位相が与えられていればこのように 11.5 度は簡単に求められますが、無限大母線電圧の大きさと 0 度の位相、流れる潮流、発電機電圧の大きさが与えられ、発電機位相が不明であれば潮流計算を実施して発電機位相を決定します。

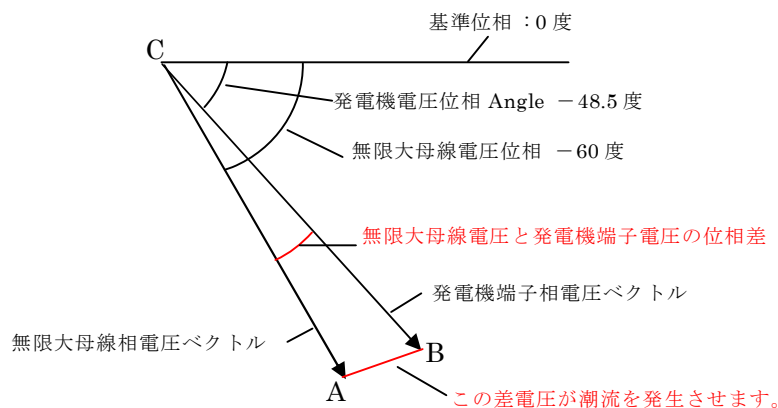


Fig.4.1-1 A 相の発電機端子電圧および無限大母線電圧の位相値の説明

Angle という名称から発電機内部誘起電圧と端子電圧間の位相 δ ないしは A 相の力率角などを思い浮かべられるかもしれませんが上述のごとく 0 度の位相を基準にした発電機の A 相端子電圧の位相角です。

参考までにこの例題の計算結果である、基準相電圧位相(0 度)に対する主回路各ノードの A 相の電圧位相を示すと次のようになっています。(tacsgen_model_with_inicon.lis から読み取っています。小数点以下 3 桁以降は省略しています)

GENA $\angle -48.5^\circ$

説明; GENA の基準電圧位相に対する位相は -48.5° です。GENSA と GENA 間にインピーダンス無いため GENA の位相は GENSA に等しくなります。

SENDA $\angle -26.06^\circ$

説明; 変圧器角変位が Yd1 のため、SENDA の基準電圧位相に対する位相は無負荷状態なら -48.5° から 30° 進みの -18.5° になりますが、潮流があるため漏れインダクタンスで遅れ、 -26.06° になっています。このように変圧器の角変位も計算結果に自動的に加味されます。

MIDA $\angle -53.22^\circ$

説明; MIDA の位相は送電線のインダクタンス分で更に SENDA から遅れ、基準電圧位相に対する位相はこの値になります。

RECVA $\angle -32.68^\circ$

説明; 線路リアクタンス補償のキャパシタンスにより RECVA の基準電圧位相に対する位相は MIDA から位相が進んでこの値になります。

INFA $\angle -60.0^\circ$

そして最後は無量大母線の背後インダクタンスで遅れ、INFA の位相は $\angle -60.0^\circ$ になっています。この -60 度は無量大母線電圧源に入力した値でもあります。

2) Class 2 S.M. data cards

このグループに属するカードは下記のごとく全部で三種類あります。しかしながら 2.2)の PARAMETER FITTING を除いてあまり使われないカードです。このため ATPDraw では 2.1)、2.3)の入力窓は設けられていません。必要な時は手動で入力します。

また PARAMETER FITTING はほとんどのケースで設ける必要があるため、人間系で入力せずとも ATPDraw が自動入力してくれます。

2.1) 裕度用カード

通常はデフォルトで組み込まれている裕度で十分であり、異なる裕度を指定する必要はあまり無いでしょう。

このため ATPDraw の発電機アイコンの入力窓でこの裕度用の入力窓は省略されています。必要な場合は.atp ファイルを作ってから手動で新しい裕度を Rule book に従って追加します。裕度用カードの詳細は Rule book Section VIII の Class2 S.M. data cards を御参照願います。

このカードは TOLERANCES のカード無しで計算させた時に計算結果の数値が振動的である時や計算結果の.lis ファイルにロータ速度の収束状況に問題あるとプリント出力された時に使います。

2.2) PARAMETER FITTING カード

二種類目のカードは PARAMETER FITTING の Special request card です。

この card は発電機メーカーから入手した発電機データを使う場合には必ず設けます。ほとんどのシミュレーションケースは発電機メーカーのデータを使います。このため ATPDraw ではこの Special request card を人為的に PARAMETER FITTING と入力しなくとも自動的に入力するようになっています。またメーカーのデータであることを示す、FM 値(=1)も同時に自動で入力されます。

この FM 値の詳細は後述の 4.1 項の 5.1)および 10 項を御参照願います。

ユーザは発電機製造業者からの各種データをそのまま入力すれば ATP の方でこれらのデータから Park の発電機モデル用の各種の抵抗、自己インダクタンス、相互インダクタンスに最適化して変換して使ってくれます。

この理由で発電機定数インピーダンスを系統インピーダンスとベースを合わせる作業も不要で、発電機メーカーからのデータをそのまま入力できます。ただし本項の 3.7)で述べるごとく未飽和値(不飽和値)で入力する必要があります。

PARAMETER FITTING カードに関する Rule book は Rb-080-LEC の VIII-C-2, Class 2 SM data card (optional) に則る必要があります。Rb-080 の当該箇所の記述は Rb-080-LEC より古いからです。詳細は 10 項に記載しています。

2.3) DELTA CONNECTION 用カード

三種類目のこのカードは発電機の電機子巻線がデルタ巻線の時に使いますが、殆どの発電機の電機子巻線は星型接続になっているので ATPDraw の発電機アイコンではこの入力窓は省略されています。必要があれば手動で.atp ファイルに追加します。

3) Class 3 S.M. Data cards

続いてはデータは Class 3 S.M. Data cards になるのですが下記の理由でこのところを入力する項目は無いのでこの Class 用の ATPDraw の入力窓は設けられていません。

ATPDraw の入力窓は軸系を励磁機無しの単一質点系として扱う場合になっていて、ATPDraw では NUMAS(軸系につながれている質点数)=1、KMAC(発電機の質点番号)=1、KEXC(励磁機の質点番号)=ブランクと自動的に入力してくれます。

しかしながらもし多質点系として軸ねじれ現象を解析する場合は Rule book Rb-080-LEC の Section VIII - C - 3 にしたがって、これらを手動で入力します。

このシミュレーション例でも軸系を単一質点系としているのでこの Class の入力項目はありません。

3.1) 極数 Poles

入力値 = 2

この項目は極対数で入力するのでは無く、このように S 極と N 極の極の合計値 = 極数で入力します。極数は次式で求められます。

例 定格回転数が 3000rpm で、定格周波数 50Hz の発電機の極数 p は、

$$p = \frac{\text{定格周波数} \times 120}{\text{毎分の定格回転数}} = 2 \quad (4.1-1)$$

3.2) SMOUTP

ATPDraw の入力窓でこの項目は SMOVTP の名称になっていますが正しくは SMPOUTP です。

入力値 = 1

この SMOUTP はクロスコンパウンド発電設備のようにひとつの原動機に対して二つの発電機が接続される時に使用します。たとえばプライマリ発電機の有効電力が 0.6 P.U.、セカンダリ発電機の有効電力が 0.4 P.U.で定常運転しているのであれば、プライマリ発電機の

SMOUTP に 0.6 を入力し、セカンダリ発電機の SMOUTP に 0.4 を入力します。
発電機が一台だけの場合の SMOUTP は発電機アイコンの入力窓に表示されているデフォルトの 1 のままにしておきます。

1 で無い値を入力しなければならない場合、この項目に関する例題が Rb-080-LEC の Section VIII の項目 VIII-D-2 にあるのでご参照ください。

3.3) SMOUTQ

入力値 = 1

上記と同じ意味です。ただし SMOUTQ は無効電力の分担に関するものです。
ATPDraw の入力窓で SMOVTQ と表示されていますが、正しくは SMOUTQ です。

1 で無い値を入力しなければならない場合、この項目に関する例題が Rb-080-LEC の Section VIII の項目 VIII-D-2 にあるのでご参照ください。

3.4) 定格容量 RMVA

入力値 = 892.4

発電機の定格容量を MVA の単位で入力します。

3.5) 発電機定格電圧 RKV

入力値 = 26

ここには発電機の運転電圧ではなく発電機の定格電圧を入力します。
発電機定格電圧は定格線間電圧の実効値で表わされます。この定格電圧値を KV の単位で入力します。

実際の運転電圧は 4.1 の 1.1) で指定します。

3.6) AGLINE

入力値 = 1800

この AGLINE とは Fig. 4.1-2 に示すごとく、発電機無負荷飽和曲線上の Air gap line と無負荷定格電圧 1.0 P.U. の交点の AGLINE と図示している界磁電流値を指します。この AGLINE は発電機の無負荷飽和曲線より読み取れます。

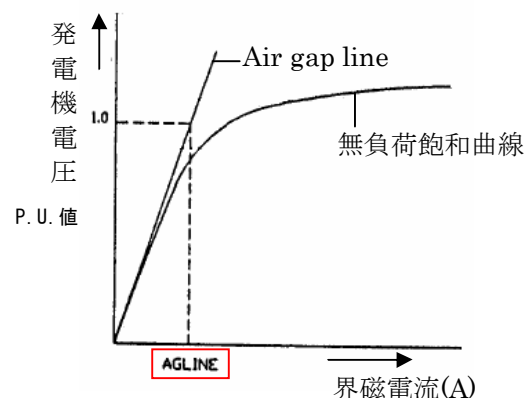


Fig. 4.1-2 AGLINE の説明

鉄心飽和を考慮しない場合の界磁電流データはこの AGLINE 値だけで十分です。
鉄心飽和を考慮する場合は下記 3.6.1) のデータも用意します。

3.6.1) 鉄心飽和を考慮する時の入力方法

ATP の Type 59 同期発電機モデルでは Rule book どおり入力しても飽和模擬が正しく行えないことが発表されています(参照文献 4))。

この欠点は Type 58 同期発電機モデルで改良されています(参照文献 5))。このため飽和を模擬するときは Type 59 では無く、Type 58 の同期発電機モデルを使い、Rule book Rb – 080 - LEC の Class 3 S.M. Data cards に従ってデータを次のように入力します。

AGLINE 値にマイナス符号を付け、更に飽和特性曲線状の次の 2 点の界磁電圧に対する界磁電流値も入力します。ATPDraw では鉄心飽和用の次の S1D,S2D の入力窓は省かれているので、必要な場合は手動で Class 3 S.M. Data cards の Rule book を参照して入力します。

1 点目は無負荷飽和曲線上の 1.0 P.U.の無負荷発電機電圧を発生させる界磁電流値 (S1D の値として入力します)

2 点目は無負荷飽和曲線上の 1.2 P.U.の無負荷発電機電圧を発生させる界磁電流値 (S2D の値として入力します)

鉄心飽和を模擬するとき次の拡張カードも必要です。この窓も ATPDraw では省略されているので必要な時は手動で.atp ファイルに追加しましょう。

拡張カードには下記のように入力項目は 7 項目ありますが、AD1(=1.0PU), AD2(=1.2PU), AQ1(=1.0PU), AQ2(=1.2PU)を採用する場合、AGLQ に対して -1. を入力しその他の項目はすべてブランクにします。

このようにすると AD1(=1.0 PU), AD2(=1.2 PU), AQ1(=1.0 PU), AQ2(=1.2 PU)を採用し、且つ Q 軸の鉄心飽和特性は不明であるという一般的な条件を採用したことになります。

ベンチマーク(これは ATP に登録されている模範例題です。ATP ホルダー内の bnchmark ホルダーに収納されています。メモ帳、テキストエディタで見ることが出来ます。) DC53 の最初のシミュレーションケースが飽和を模擬する例です。御参照ください。

拡張カードに関する AD1~AQ2、AGLQ、S1Q、S2Q の意味を整理すると次のとおりです。

AD1	D 軸の発電機鉄心飽和特性を規定する最初の点の発電機電圧(PU 値)を入力します。デフォルト値の 1.0 を使う場合、この入力場所はブランクでかまいません。
AD2	D 軸の発電機鉄心飽和特性を規定する二番目の点の発電機電圧(PU 値)を入力します。デフォルト値の 1.2 を使う場合、この入力場所はブランクでかまいません。
AQ1	Q 軸の発電機鉄心飽和特性を規定する最初の点の発電機電圧(PU 値)を入力します。デフォルト値の 1.0 を使う場合、この入力場所はブランクでかまいません。
AQ2	Q 軸の発電機鉄心飽和特性を規定する二番目の点の発電機電圧(PU 値)を入力します。デフォルト値の 1.2 を使う場合、この入力場所はブランクでかまいません。
AGLQ	Q 軸の Air gap line が不明な一般の場合、ここに -1 を入力すれば ATP 内部で Q 軸を Air gap line 模擬してくれます。

尚、Q 軸 Air gap line が既知の場合は、発電機定格電圧 1.0 p.u.を発生させるのに必要な Q 軸 Air gap line 上の界磁電流を入力し、且つ次の S1Q, S2Q の値を入力します。

- S1Q Q軸飽和特性が既知の時のQ軸の発電機鉄心飽和特性を規定する最初の点の発電機電圧(PU 値)に対する界磁電流を入力します。
- S2Q Q軸飽和特性が既知の時のQ軸の発電機鉄心飽和特性を規定する二番目の点の発電機電圧(PU 値)に対する界磁電流を入力します。

3.7) 発電機のリアクタンスと時定数

Class 3 S.M. Data cards の次の入力項目は発電機の各種のリアクタンスと時定数です。
入力に際して特に注意すべき点は次のとおりです。

これらの入力値は鉄心の飽和を考慮する場合でも、考慮しない場合でも未飽和(不飽和)値で入力します。

この根拠は ATP の Theory Book の 8.2 項で飽和は(プログラムのほうで)別途考慮されるのでこれらは未飽和値でなければならないと明記されているからです。

これに関する入力例がベンチマーク DC53 にあります。

DC53 の一番目ケースは AIR GAP LINE の界磁電流値にマイナス符号がついているので、飽和を考慮するケースです(Rule book で飽和を考慮する時は AIR GAP LINE 界磁電流にマイナス符号を付ける決まりになっています)。

DC53 の二番目のケースは AIR GAP LINE の界磁電流にマイナス符号が付いていないので鉄心飽和を無視するケースで、当然使用するリアクタンス、時定数は未飽和の値です。

一番目と二番目のケースの各種リアクタンスと時定数を比較すると全て同じ値となっていて、Theory book に則り、一番目の飽和を模擬する場合でもこれらはすべて未飽和値で入力されているのがわかります。

飽和の影響を模擬する時はリアクタンス、時定数を未飽和の値で入力した上で、励磁特性を使って Rb-080 中の Class 3 S.M. data cards に記載されている方法で模擬するようになっています。(Rb-080-LEC の VIII-C-3 Class 3 S.M. data cards も同じ内容です)

下記の抵抗と各種リアクタンスは発電機容量ベースの P.U.値で、発電機の定格容量 892.4 MVA と定格電圧 26 KV から決まるベースインピーダンス値($26^2/892.4 = 0.7575 \Omega$)で抵抗の Ω 値、各種リアクタンスの Ω 値を除いたものです。

メーカーより与えられるリアクタンス類は発電機ベースの P.U.値になっているのでそのまま発電機アイコンの入力窓に転記すれば OK です。

時定数は秒で連絡され、それらもそのまま転記すれば OK です。

このシミュレーション例では以下のように抵抗と各種リアクタンスの P.U.値を入力する通常の方法ですが、この代わりに各種の抵抗とインダクタンス値を P.U.値で入力する方法も用意されていますが、使用頻度が低いので省略します。興味のある方は Rule book VIII の Class 3 S.M. Data cards をご覧ください。

下記のリアクタンス、時定数は未飽和(不飽和)値です。

電機子抵抗 R_a 0.0 pu

注) 電機子抵抗は微小値です(Ex. 0.002 p.u など)。このため本例では略して 0.0 p.u.としています。

電機子漏れリアクタンス X_ℓ 0.13 pu

d 軸同期リアクタンス X_d 1.79 pu

q 軸同期リアクタンス X_q 1.71 pu

d 軸過渡リアクタンス X_d' 0.169 pu

q 軸過渡リアクタンス X_q' 0.228 pu

d 軸初期過渡リアクタンス X_d'' 0.13504 pu

(=d 軸次過渡リアクタンス)

q 軸初期過渡リアクタンス X_q'' 0.20029 pu

(q 軸次過渡リアクタンス)

d 軸開路過渡時定数 T_{do}' 4.3 s

q 軸開路過渡時定数 T_{qo}' 0.85 s

d 軸開路初期過渡時定数 T_{do}'' 0.032 s

q 軸開路初期過渡時定数 T_{qo}'' 0.05 s

零相リアクタンス X_0 0.13 pu

中性点抵抗 R_n 0 pu

中性点リアクタンス X_n 0 pu

注) ここでは対称事故である三相短絡を模擬しているため中性点インピーダンスは 0 としていますが、もし発電機回路の地絡事故などの非対称事故をシミュレーションする場合、中性点インピーダンス値は省略しないで入力します。大型タービン発電機の中性点は高インピーダンス接地が一般的です。

XCAN 0.13 pu

XCAN の意味は Canay's characteristic reactance の意味で、漏れリアクタンスの一種です。

Rule book Rb-080 の入力リアクタンス中にこの XCAN の入力項目は設けられていません。

Rb-080-LEC になり設けられました。

Theory book Section 8 に記載されているように XCAN を使えば、ATP の計算結果の過渡時の界磁電流値が漏れリアクタンス X_ℓ を使う場合より、正しい値に近づきます。

このことは Theory book の Fig.8.3 に示されています。

しかしながら實際上 XCAN はほとんどのケースで不明で、その場合はアイコンの Help に記載されているように $XCAN = X_\ell$ と入力すれば、 X_ℓ を使って計算が行われます。本例でも

XCAN は不明なので、

XCAN 0.13 pu

と入力して漏れリアクタンス値を入力しています。

3.8) 突極機の模擬

同期発電機が突極機で突極性(d, q 軸で磁気抵抗が異なること)を考慮しなければならない場合の各種データの入力方法について述べておきます。

その突極発電機用として入手した上述の各種データ値をそのまま入力すれば突極性を模擬できます。

突極機のこれらデータは既に突極性が反映されているからです。

尚、このときも PARAMETER FITTING 1.0 として、データの最適化をします。

4) Class 4 S.M. Data cards

引き続き ATPDraw の発電機入力データは Class 4 S.M. Data cards の入力データになります。軸ねじり現象を除くほとんどの同期機シミュレーション例では質量番号 ML = 1(この意味は

原動機系、発電機系を 1 質点系として扱うという指定になります)、与えられる動力の各質点への分配率 **EXTRS** =1.0(この意味は入力動力は 1 質点系に全て入力されるという指定になります)及び全体の慣性モーメントの大きさ **HICO** の 3 点で十分です。

この内、質量番号 **ML** = 1、分配率 **EXTRS** = 1.0 は人為的に入力しなくとも **ATPDraw** の発電機アイコンを使えば自動的に **.atp** ファイルに入力されます。

このため入力窓に **ML** と **EXTRS** の項目は用意されていません。ユーザが入力しなければならないデータは軸系全体の慣性モーメントの **HICO** だけとなります。

発電機アイコンの入力窓には **HICO**, **DSR**, **DSD** が設けられていますが、上述のごとく軸ねじりのシミュレーションをしないのであれば **HICO** の入力をするだけで良く、**DSR**, **DSD** はデフォルトの 0 のままにしておけば **OK** です。

軸ねじり現象のシミュレーションの場合の入力例はベンチマーク **DC53** を参照しながらデータを入力する必要があります。

以下に **HICO**, **DSR**, **DSD** の入力値について簡単に説明します。

4.1) **HICO** (原動機系と発電機系の合計慣性モーメント WR^2)

原動機、発電機、励磁機(もしあれば)の慣性モーメント値の和を入力します。

慣性モーメント WR^2 の単位はデフォルト状態では **Million pound feet²** で入力するようになっています。

発電機アイコンの最後の入力窓で **MECHUN**=1 とした場合は **HICO** 値はメトリック単位の **Million_Kg_m²** で入力することができます。**MECHUN** の所に何も入力しなければデフォルト状態となるため、**Million_pound_feet²** の単位で入力しなければなりません。

いずれの単位系でも **Million** の単位で入力する理由は原動機と発電機の慣性モーメントを **pound-feet²** 又は **Kg-m²** の単位で計算すると慣性モーメントの値が極めて大きくなってしまいます。

今回の **HICO** = 0.7752 この数値の単位は **Million pound feet²** です。

ご参考

合計の慣性モーメントを求める方法

軸系の慣性モーメントは通常下記の例のごとく構成機器ごとに与えられます。

これらの個々の慣性モーメントから全体の慣性モーメントを求めるには単純に各慣性モーメントの和を求めればそれが全体の慣性モーメントになります。

この理由は慣性モーメントが微小質点の質量とその質量までの距離の二乗を全ての部分にわたって積分したものであるためです。(慣性モーメントについては「**ATP(EMTP)**の小さな研究室」の「回転運動に関するまとめ」も参考になるかも知れません)

一例をあげると次のとおりです。

軸系構成機器	各機器の WR^2 (Million pound feet ²)
タービン#1	0.027691
タービン#2	0.046379
タービン#3	0.255958
タービン#4	0.263573
発電機	0.258887
励磁機	0.0101995
軸系合計 WR^2	0. 8626875 (Million pound feet ²)

Table 4.1-1 軸系全体の慣性モーメントは個々の慣性モーメントの和として求められる

軸ねじり現象を問題にしなければ原動機と発電機の軸系を 1 質点系として扱えるので、上記のように各機器の慣性モーメントの和である、一つの WR^2 の値で代表することができます。

軸ねじり現象をシミュレーションする場合は軸系を多質点系とし、軸と軸の間を重量の無いスプリングで結んでシミュレーションします(ベンチマーク DC53 を御参照願います)。

4.2) 速度偏差による自己ダンピング係数 DSR

DSR の入力値 = 0

この入力項目は軸ねじりシミュレーションの時だけ必要になる項目です。

このダンピング係数は軸系を構成する各質点の同期速度からの相対的な速度偏差によるその質点のダンピング係数です。

この入力項目は設けられていますが次の絶対速度によるダンピング係数 DSD と共に入手が困難なデータです。

DSR の説明はルールブック VIII の Class 4 S.M. Data cards にあります。

DSR と次の DSD は上述のごとく入手が一般に困難なため軸ねじれのシミュレーションでもこれらは無視されることがあります(ベンチマーク DC53 に示されているごとく)。

4.3) 絶対速度による自己ダンピング係数 DSD

DSD の入力値 = 0

この入力項目も軸ねじりシミュレーションの時だけ必要になる項目です。

このダンピング係数は軸系を構成する各質点の 0 スピードを基準とした角速度によるダンピング係数です。この係数の説明もルールブック VIII の Class 4 S.M. Data cards にあります。

尚、軸ねじり現象をシミュレーションする場合、上記の DSR, DSD 以外に DSM, HSP についても入力できるようになっています。DSM, HSP の意味については Rule book VIII の Class 4 S.M. data cards に記載があります。

5) FM と NECHUN の入力値

ATPDraw の発電機の入力窓の順番ではここに FM 値の入力窓と MECHUN の入力窓が来ていますが FM 値は Class 2 S.M. Data cards の PARAMETER FITTING の入力項目です。または MECHUN は Class 3 S.M. Data cards の入力項目のひとつです。

5.1) FM 値

この値は発電機の各種定数の最適化(PARAMETER FITTING)に属する値です。

FM の入力値 = 1.0 とします。

PARAMETER FITTING とは発電機モデルの入力に必要な発電機製造業者の電機子抵抗、各

種リアクタンス、各種時定数を Park の数式に合うように最適化するための Special request card です。

ATPDraw の場合人為的に入力しなくとも自動的に PARAMETER FITTING の Special request card を作成される .atp ファイルの所定の場所に挿入してくれます。

発電機メーカーからのデータである場合、FM 値に 1.0 を採用します。

通常はほとんどがこのケースに該当します。

このため ATPDraw の発電機アイコンの入力窓はデフォルト状態で FM 値=1.0 となっています。

多くの場合 FM 値=1.0 ですが、まれなケースでは他の FM 値を使う必要があります。

それらのケースについては本稿の 10.項をご参照ください。

尚、PARAMETER FITTING に関する Rule が Rb-080 と Rb-080-LEC で内容が異なっています。どちらを適用すべきかと迷われることがあると思います。

このため今回検討を行い、その結果を 10.項「PARAMETER FITTING の検討」に示しました。この検討の結果、現在の ATP は Rb-080-LEC の PARAMETER FITTING の内容に従っており、Rb-080 には従っていません。

5.2) MECHUN

MECHUN の入力値 = 0 と入力します。

この MECHUN には慣性モーメントを Million pound feet² の単位で入力する場合は 0 を入力し、Metric の Million Kg m² で入力する場合は 1 を入力します。

この項目に関する Rule book は次のとおりです。

Rb-080 ではこの機能について言及されておらず、入力データ中に MECHUN 用のカラムも設けられていません。

Rb-080-LEC になり、Section VIII-C-3 に記載されるようになりました。

4.2 発電機アイコンへの入力したデータのハードコピー

発電機アイコンに入力した内容のコピーを Fig. 4.2 - 1 に示します。

ATPDraw 上では 8 項目以降はスクロールして見るようになっていますが、下記は画面のハードコピーなので 4 分割して示します。

DATA	UNIT	VALUE
Volt	Volts	21228.9
Freq	Hz	60
Angle	Deg.	-48.5
Poles		2
SMDVTP		1
SMDVTQ		1
RMVA	MVA	892.4
RkV	kV	26

DATA	UNIT	VALUE
AGLINE	Amps	1800
RA	pu	0
XL	pu	0.13
Xd	pu	1.79
Xq	pu	1.71
Xd'	pu	0.169
Xq'	pu	0.228
Xd''	pu	0.135

DATA	UNIT	VALUE
Xq''	pu	0.2
Tdo'	s	4.3
Tqo'	s	0.85
Tdo''	s	0.032
Tqo''	s	0.05
Xo	pu	0.13
RN	pu	0
XN	pu	0

XCAN	pu	0.13
HICO		0.7752
DSR		0
DSD		0
FM		1
MECHUN	1=Metric	0

Fig. 4.2 - 1 発電機入アイコン力へのデータ

発電機に関する入力項目は以上です。ここでシミュレーション結果の出力要求の指定が無いのでは?(Class 5 の Data cards が無い)と思われるかも知れません。

この点に関してはユーザが指定しなくとも ATPDraw の方で全ての出力を出す内容の.atp ファイルを自動的に作成してくれるので心配要りません。

アップロードしてある tacsgen_model_with_inicon.acp を計算させ、生成されるこの.atp ファイルを見れば次に示すごとく同期機の全ての出力を出すように指定しているのがわかります。

以下は.atp ファイルの最後の方の部分コピーです。

```

59GENSA      21228.9      60.      -48. 5
  GENSB
  GENSC
PARAMETER FITTING      1.
  1 1 0 2      1.      1.      892. 4      26.      1800.

BLANK
      . 13      1. 79      1. 71      . 169      . 228      . 135      . 2
      4. 3      . 85      . 032      . 05      . 13      . 13
  1      1. 0      . 7752
BLANK
  11
  21
  31
  41
  51
BLANK
71EFD
  FINISH
/OUTPUT
  GENA  GENB  GENC  RECVA  RECVB  REVC  MIDA  MIDB  MIDC  INFA  INFB  INFC
BLANK TACS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

この部分が同期機の出力要求部です。二桁の数字の内、一桁目は出力のグループを示し、二桁目の 1 はそのグループの全ての出力候補を出力するという指定です。各グループは次のようになっています。1:電気量の出力、2:軸系の各質点の機械的角速度、3:各質点の速度および速度偏差、4:各質点へ加わる機械的トルク、5:Machine parameter と初期条件

Fig. 4.2-2 ATPDraw が自動で全ての出力候補を出力するよう .atp ファイルに指定します

次に発電機以外のデータ入力とデータ変換について説明します。

4.3 発電機以外の回路構成機器の入力データとデータ変換

4.3.1 変圧器データ

1) 与えられているデータ

次のデータが与えられています。これらのデータから変圧器入力データを作ります。

変圧器出力	明示されていません。しかし下記のごとく変圧比と 892.4 MVA ベースの漏れリアクタンスが与えられているので変圧器模擬は以下のごとく可能です。	
高圧側定格電圧	525	KV
低圧側定格電圧	26	KV
漏れリアクタンス X_ℓ (%)	変圧器全体の漏れリアクタンス値は $j 14$ % (at 892.4 MVA, 525 KV ベース) として与えられています。	
巻線抵抗	微小値なので本例では高、低圧巻線とも 0 と仮定します。負荷漂遊交流抵抗損も無視しています。	
励磁特性	本例では励磁特性は線形とし、飽和特性は無いものと仮定しています。励磁電流、鉄損も無視しています。	
結線	低圧側	三角結線
	高圧側	星型接続、中性点は直接接地
ベクトル群記号は明示的に与えられていませんが後述の 4.3.1 の 3) の検討結果より Yd1 になります。		

2) 変圧器漏れインダクタンス値の算出

低圧側巻線の定格電圧が 26KV, 高圧側巻線の定格が $525/\sqrt{3}=303.11$ KV の単相変圧器を Fig.4.3.1-1 のごとく 3 台使ってこの三相変圧器を模擬します。

変圧器入力データは高圧巻線と低圧巻線の漏れインダクタンス値が必要です。これらの値は与えられたデータから次のように求められます。

高圧巻線から見たこの変圧器の低圧側漏れリアクタンスを合わせた漏れリアクタンスのオーム値 X_ℓ (Ω) は与えられたデータより次のようになります。

$$X_\ell (\Omega) = 0.14 \times 525^2 / 892.4 (\Omega) \quad (4.3-1)$$

この漏れリアクタンスを高圧巻線と低圧巻線に二分割して入力することにします。すると高圧側漏れリアクタンス $X_{\ell H}$ (Ω) は

$$X_{\ell H} (\Omega) = \frac{1}{2} \times 0.14 \times 525^2 / 892.4 (\Omega) \quad (4.3-2)$$

本例では XOPT=0 としているため、漏れリアクタンス値は mH 単位のインダクタンスで入力します。(XOPT については Rule book Section II-B を参照ください)

したがって、高圧巻線の漏れインダクタンス L_H (mH 値) は次のようになります。

$$L_H (mH) = \frac{1}{2} \times 0.14 \times (525^2 / 892.4) \times 1000 / (2 \times \pi \times f) (mH) = 57.35 (mH) \quad (4.3-3)$$

低圧巻線の漏れリアクタンス $X_{\ell L}$ (Ω) は $\frac{1}{2} \times 0.14 \times 525^2 / 892.4 (\Omega)$ に巻線比の二乗を乗じた次の値になります。

$$X_{\ell L} (\Omega) = \frac{1}{2} \times 0.14 \times (525^2 / 892.4) \times (26 \times \sqrt{3} / 525)^2 (\Omega) \quad (4.3-4)$$

この低圧巻線漏れリアクタンスを高圧巻線と同様に mH 位のインダクタンスに換算して次の L_L (mH) になります。

$$L_L = \frac{1}{2} \times 0.14 \times (525^2 / 892.4) \times (26 \times \sqrt{3} / 525)^2 \times 1000 / (2 \times \pi \times f) \text{ (mH)} = 0.422 \text{ (mH)} \quad (4.3-5)$$

これらの L_H (mH 値)、 L_L (mH) を変圧器データとして入力します。データを入力した状態を 4.3.1 の 4) に示します。

3) 変圧器の角変位

この変圧器のベクトル群記号 (または角変位) は明示的に与えられていないので参考文献 1) の「EMTP 入力データ」から調査してみます。この変圧器の角変位が入力データとして必要なためです。この入力データからこの変圧器の結線を読み解くと Fig.4.3.1-1 になっています。

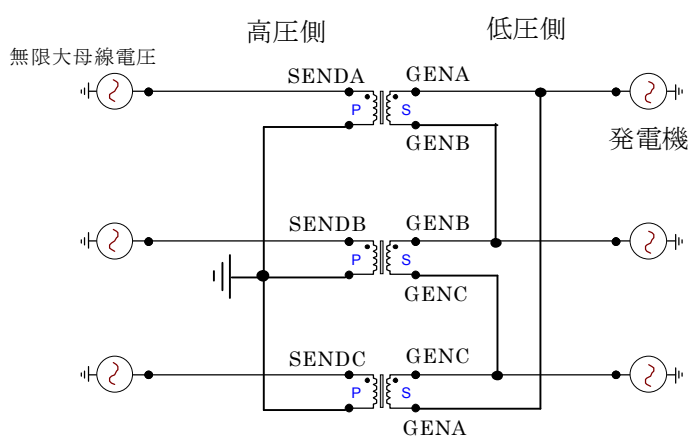


Fig.4.3.1-1

いま Fig. 4.3.1-1 で高圧側の各巻線には Fig.4.3.1-2 の赤のベクトル群で示す相電圧が発生しているとします。

この時、相対する低圧側の各巻線には減極性のため高圧側と同相の青で示す低圧巻線電圧が発生します。低圧巻線はデルタ接続にしているのでこれらの巻線電圧は線間電圧になります。

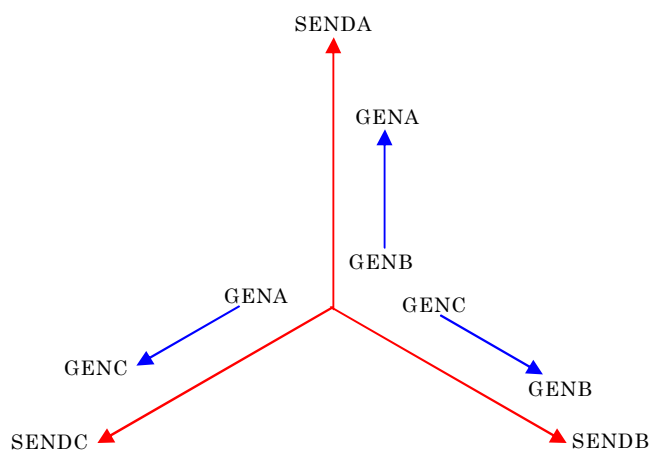


Fig.4.3.1-2 各巻線の誘起電圧

低圧側のベクトル図は次のように考えることができます。

結線図 Fig. 4.3.1-1 から各巻線の同名の端子同士は同電位なので青ベクトルの同電位同士を接続すれば Fig. 4.3.1-3 の青のデルタのベクトル群が得られます。

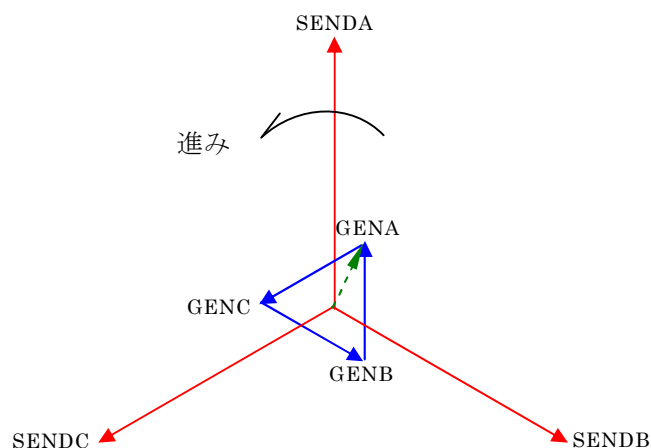


Fig. 4.3.1-3

変圧器の角変位は高、低圧巻線の相電圧の電圧位相差ですから、これは中性点と SENDA 間の
高圧巻線電圧と、デルタ接続の仮想中性点から GENA 間の低圧電圧(緑の点線電圧)の位相
差です。これは Fig. 4.3.1-3 より高圧側が低圧側より 30 度進みになるので、この変圧器のベ
クトル群記号は Yd1 であることがわかります。

検証

上記の内容を反映した変圧器の入力データは次の 4) 項に示すとおりです。

この変圧器低圧側に $\sqrt{2} \cdot 26000 / \sqrt{3} = 21228.9$ (V) の Peak 電圧を持つ正弦波相電圧を三相印加
し、高圧側は絶縁抵抗で三相とも短絡接地して ATP で高低圧の相電圧を計算した結果を
Fig. 4.3.1-4 に示します。

高圧巻線の相電圧(赤)が低圧の相電圧(緑)より 30 度進みになっていることは高、低圧の相電圧
がピーク電圧に達する時間差から計算できます。結果は高圧側相電圧が 30 度進みであるこ
が確認できます(計算刻み時間を $1E-5$ sec.としている関係でぴったり 30 度にはなりません
極めて近い値になります)。

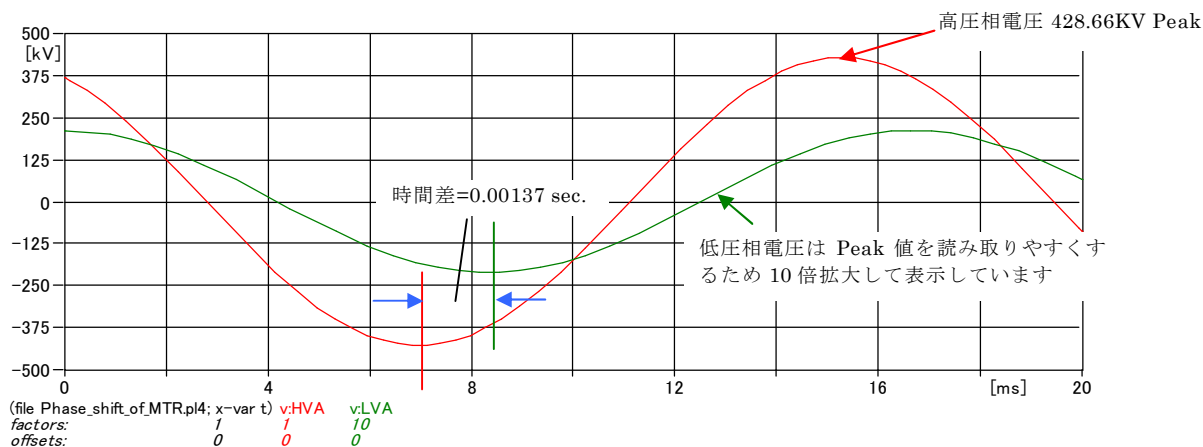


Fig.4.3.1-4 高、低圧側相電圧の角変位

殆どの場合変圧器のデータとしてベクトル群記号は与えられるので一般には上述のごとき角変

位調査は不要です。

4) 変圧器アイコンへの入力データ

1), 2), 3)項の検討結果を反映した変圧器の入力データは Fig. 4.3.1-5 になります。
高圧巻線の定格電圧 303.11 は $525KV/\sqrt{3}$ から出てきています。

Characteristics の Tag は飽和特性は線形としているので何も入力していません。

Component: SATTRAFO

Attributes Characteristic

	Prim.	Sec.
U [V]	303.11	26
R [ohm]	0	0
L [mH,ohm]	57.35	0.422

Coupling Y D
Phase shift 30

I(0)= 0 Rm= 0
F(0)= 0

☐ 3-leg core
☐ RMS
☐ 3-winding

NODE	PHASE	NAME
Primary	ABC	SEND
Secondary	ABC	GEN
Starpoint	ABC	X0001
Prim-N	1	

Order: 0 Label:

Comment:

Output
0 - No ☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

低圧相電圧が高圧相電圧より 30 度遅れを示しています。
遅れ進みの区別が設けられていないのでわかりにくいです。

Fig. 4.3.1-5 変圧器アイコンへのデータ入力

4.3.2 送電線路データ

送電線路の模擬方法はいろいろな方法がありますが、ノード SEND と MID 間の送電線路は Rule book IV - C の Optional use of Z0 and Z1 for 3 - phase coupled R - L branches で述べられている相互結合ブランチを使って模擬します。

1) 与えられている送電線データ

次のデータが与えられています。

送電線運転電圧

正相、逆相インピーダンス

零相インピーダンス

500 KV(4.3.7 の 1)より)

$0.02 + j0.5$ (P.U.)

(at 892.4 MVA, 500KV base)

$0.5 + j1.56$ (P.U.)

(at 892.4 MVA, 500KV base)

2) 送電線データのデータ変換

本例ではこれらのデータを通常広く行われている方法と同じく、抵抗は Ω 値、インダクタンスはmH値、キャパシタンスは μF の単位で入力することになっています。これらの単位で入力するため Miscellaneous data cards の COPT と XOPT は0としています。発電機を除くその他の構成機器のインダクタンス、キャパシタンスについても同じにします。

上記 P.U.値に 892.4 MVA, 500KV のベースインピーダンスを乗じてオーム値に直し、インダクタンスは Ω 値から更に mH 値に次のように直します。

$$892.4 \text{ MVA, } 500\text{KV のベースインピーダンス} = 500^2 / 892.4 = 280.143(\Omega)$$

$$\text{正相抵抗値} = 0.02(\text{P.U.}) \times 280.143(\Omega) = 5.603 (\Omega) \quad (4.3.2-1)$$

$$\text{正相インダクタンス} = 0.5(\text{P.U.}) \times 280.143(\Omega) \times 1000 / (2 \times \pi \times f) (\text{mH}) = 371.6 (\text{mH}) \quad (4.3.2-2)$$

同様に零相抵抗、零相インダクタンス値は次のようになります。

$$\text{零相抵抗値} = 0.5(\text{P.U.}) \times 280.143(\Omega) = 140.1 (\Omega) \quad (4.3.2-3)$$

$$\text{零相インダクタンス} = 1.56(\text{P.U.}) \times 280.143(\Omega) \times 1000 / (2 \times \pi \times f) (\text{mH}) = 1159.2 (\text{mH}) \quad (4.3.2-4)$$

3) 送電線アイコンへの入力データ

送電線アイコンを開くとデフォルトの入力窓は次のとおりになっています。

Component: LINESY_3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R0	Ohm/m	2
L0	mH/m	1.5
R+	Ohm/m	1
L+	mH/m	1

NODE	PHASE	NAME
IN1	3	
OUT1	3	

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Lines

Length 1 [m] ☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig. 4.3.2-1 相互結合送電線のデフォルトの入力内容

送電線データを入力しようとするするとすぐに入力値は単位 m あたりの数値にしなければならないことに気付きます。

送電線路長についてのデータは無いし・・・さて困ったということになります。

でも送電線路長のデータが無くとも大丈夫です。なぜなら Fig.4.3.2-1 に示すごとく、Length

(m)の入力窓があるからです。

この **Length** の窓に送電線路長を 1 と入力すれば、全長 1m の短い送電線になるので、上記 2)の零相、正相の全体の抵抗分、インダクタンス値を 1m あたりの値としてそのまま入力できるようになるからです。

今回用に入力したデータを Fig. 4.3.2-2 に示します。

DATA	UNIT	VALUE
Ro	Ohm/m	140.1
Lo	mH/m	1159.2
R+	Ohm/m	5.603
L+	mH/m	371.6

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	MID
OUT1	ABC	SEND

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Lines
Length 1 [m] ☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig. 4.3.2-2 送電線入力データ

4.3.3 線路補償用コンデンサ用データ

このコンデンサのキャパシタンス値は0.371(P.U.)(at 892.4 MVA, 500KV base)として与えられています。

本例ではキャパシタンスは μF の単位で入力するので次のように換算しておきます。

$$C(\mu F) = \frac{1 \times 10^6}{2 \times \pi \times f \times 0.371 \times 280.143} = 25.52 \quad (\mu F)$$

コンデンサアイコンへの入力データは次のとおりです。

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	0
L_1	mH	0
C_1	μ F	25.52
R_2	Ohms	0
L_2	mH	0
C_2	μ F	25.52
R_3	Ohms	0
L_3	mH	0

C_3 の入力値が欠けて見えませんが 25.52 を入力しています。

Fig. 4.3.3- 1 線路補償用コンデンサ用入力データ

4.3.4 故障点インピーダンス用入力データ

故障点インピーダンスは次のとおりです。

ノード RECV とノード FS 間のインダクタンス 29.72 mH

ノード FS と対地間の抵抗とキャパシタンス

抵抗 : 2000 Ω
 キャパシタンス : 0.05 μ F

入力データは下図のとおりです。

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	0
L_1	mH	29.72
C_1	μ F	0
R_2	Ohms	0
L_2	mH	29.72
C_2	μ F	0
R_3	Ohms	0
L_3	mH	29.72

C_3 の入力値は 0 です

Fig.4.3.4-1 ノード RECV と FS 間のインダクタンスの入力データ

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	2000
L_1	mH	0
C_1	μ F	0.05
R_2	Ohms	2000
L_2	mH	0
C_2	μ F	0.05
R_3	Ohms	2000
L_3	mH	0

C_3 の入力値は 0.05 です

Fig.4.3.4-2 ノード FAULT と大地間の R-C 直列回路の入力データ

4.3.5 短絡発生 / 除去用スイッチの入力データ

短絡発生と除去は時間で制御するスイッチを使用します。

時間制御スイッチの入力に関する Rule book は Rb-06a-LEC.pdf と Rb-06a.pdf です。

与えられた制御時間は次のとおりです。

スイッチを閉路する時間 計算開始後 0.11462 sec.

スイッチを開放する時間 計算開始後 0.18962 sec.

このことは短絡発生後 0.075 sec.後(60Hz で 4.5Hz 後)に短絡事故を除去していることになります。

スイッチアイコンへの入力データは次のとおりです。

DATA	UNIT	VALUE
T-cl_1	s	0.11462
T-op_1	s	0.18962
T-cl_2	s	0.11462
T-op_2	s	0.18962
T-cl_3	s	0.11462
T-op_3	s	0.18962
Imar	Amps	0

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	FAULT
OUT1	ABC	

各相の電流は 0(A)になったら切れるスイッチを示しています。
つまり電流遮断は無しとしているので各相電流は T-op 後の零
点で順次遮断して行きます。

Buttons: Copy, Paste, entire data grid, Reset, Order: 0, Label: , Comment: , Output: 1 - Current, Hide, Edit definitions, OK, Cancel, Help

Fig. 4.3.5-1 短絡発生 / 除去用スイッチへの入力

4.3.6 無限大母線側のリアクタンス用データ

正相、逆相リアクタンス値= $j 0.5$ (P.U.)(at 892.4 MVA, 500KV base) なので

正相、逆相インダクタンス $0.5 \times 280.143 \times 1000 / (2 \times \pi \times f)$ (mH) = 371.6 (mH)

とデータ変換して入力します。

データの inputs は 4.3.4 項と同様なので省略します。

4.3.7 無限大母線電圧と位相データ

1) 与えられているデータ

参照文献 1)の入力データを見るとこれらのデータは次のようになっています。

電圧値 408248. (V)

この電圧値は運転電圧が 500KV の時の相電圧の Peak 値です。

三相对称電源であり、A, B, C 相ともこの Peak 値です。

A 相の電圧位相 -60.0 (度)

2) 無限大母線電圧源の位相について

上記 1)の無限大母線電圧源の A 相相電圧位相は基準位相に対する位相角です(4.1 の 1.3) の Fig.4.1-1 をご参照ください)。この基準位相は 4.1 項の 1.3)で述べたごとく 0 度です。

B, C 相の相電圧位相は-60 度より 120 度、240 度遅れた -180 度、-300 度遅れ(=60 度進み)となります。

本例では無限大母線電圧の A 相電圧の位相を-60 度としていますが、この無限大母線電圧の位相を基準の 0 度としてシミュレーションすることも良く行われています。その場合は次のようにした上で潮流計算を行い A 相発電機端子電圧の位相を確定します。

1) 無限大母線電圧源は電圧値 408248. (V)、電源電圧の電圧位相 0 度と入力。

2) 潮流条件は 2.の 1)と同じ

3) 発電機端子電圧も 2.の 1)と同じ

この潮流計算結果の A 相の発電機端子電圧と端子電圧位相を発電機データに入力した上で計算させれば OK です。

3) 無限大母線用電圧源アイコンへの入力データ

1)のデータを Fig.4.3.7 のごとく入力します。

A 相分だけを入力すれば OK です。

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	408248
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	-60
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	ABC	INF

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: ☐ Current ☒ Voltage

Num phases: ☐ Single ☒ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

Amplitude: ☒ Peak L-G ☐ RMS L-G ☐ RMS L-L

Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig. 4.3.7 無限大母線電圧と位相の入力データ

5. 潮流計算

5.1 潮流計算をする理由

シミュレーション条件で A 相の発電機端子相電圧の位相値が不明としているので潮流計算を行って入力が必要なこの位相値を決定します。これが潮流計算する理由です。
発電機端子相電圧位相が判明すればその位相を発電機の入力データ **Angle** に入力して ATP を計算させれば .lis ファイルからシミュレーション条件 1) の b) の定常状態における発電機界磁電圧の大きさを知ることができます。この界磁電圧は 7.12 項の 1) の EFD_f として使われ、定常状態の TACS の界磁電圧(P.U.)を求めることができるようになります。

5.2 潮流計算のプログラムについて

ATP に内蔵されている潮流計算プログラムは従来から使われてきた **FIX SOURCE** の **Special request card** で始まる潮流計算プログラムの他に、1999 年 7 月の **Can/Am ATP News** でリリースされた **Type 58** 同期機モデル専用の **NEW LOAD FLOW** の **special request card** で始まる潮流計算プログラムがあります。

NEW LOAD FLOW は **FIX SOURCE** の不平衡回路で正しい結果が得られない点を改良した潮流計算プログラムです。

ベンチマーク **DCN20** の三つの **Sub case** の内の二番目のものが **NEW LOAD FLOW** 時の入力データ例です。

尚、同 **News** でこの **NEW LOAD FLOW** の名前は今後は **CAO LOAD FLOW** の名前でリリースされるとアナウンスされています。**NEW LOAD FLOW** のプログラムの開発者である東京電力の **Cao Xianglin** 氏のお名前から **CAO LOAD FLOW** と名づけられたものです。

潮流計算プログラムはこのように二種類ありますが、適用される **Rule book** は共通で **JAUG** のパスワード保護サーバ内の **Rule book**、**Rb_100.pdf** の **Section X** です。潮流計算に関する概要は本項で解説しますが詳細はこの **Rule book** を御参照願います。

5.3 潮流計算の作業

5.3.1 潮流計算の準備

電気主回路を **ATPDraw** で描き、全ての機器アイコンにデータを入力後、このファイルを実行し、ATP がエラー無く計算することを確認後、潮流計算作業に入ります。

本稿ではこの主回路だけの **ATPDraw** の File 名を **tacsgen_model_main_circuit_only.acp** としています。

潮流計算の入力データの作成はこのファイルを計算させて得られる

tacsgen_model_main_circuit_only.atp ファイルに以下に述べる 3 つの変更を加えれば潮流計算用の入力データになります。

3 つの変更を加えたファイルは

本例では **pflow_calc_by_atpdraw.atp** という別名で保存しています。この入力データ **pflow_calc_by_atpdraw.atp** を実行すれば潮流計算が実行されます。

本稿では一般の作業順序に従って主回路だけ完成した状態で **TACS** 系は未だ追加していない状態で潮流計算をしています、**TACS** 制御系を完成した状態でも潮流計算はできます。

尚、発電機端子電圧位相は潮流計算の結果得られますが今は値が不明のため適当な数値を入力して潮流計算をさせます。

1) 変更点その 1、潮流計算の宣言の挿入

Fig. 5.3.1-1 のごとく **BEGIN NEW DATA CASE** と **Miscellaneous data cards** の間に潮流計算宣言である、「**FIX SOURCE**」(**Type 59** 同期機及び **Type 14** 電源用) 又は「**CAO LOAD FLOW**」(**Type 58** の同期機専用)のステートメントを追加します。

2) 変更点その 2、潮流条件の追加

Fig. 5.3.1-1 のごとく BLANK SOURCE と BLANK OUTPUT の間に潮流計算する時の条件を入力します。今回は発電機ノード GENS の電力 PK と発電機端子電圧 VK を拘束(指定して)して潮流計算を行わせます。

ATP の潮流計算では PK, VK を拘束して行う潮流計算の種類名は 1 とされているので Fig.5.3.1-1 のごとく、1 を入力します。

(潮流計算の種類は 0, 1, 2 の 3 つの種類から望むものを入力します。

0 は有効電力 PK と無効電力 QK を拘束して潮流計算を行わせる指定です。

2 は QK(無効電力)と電圧位相 THETAK を拘束して潮流計算を行わせる指定です。電圧位相 THETAK は 0 度の基準電圧位相に対する位相差です。

この行に Fig.5.3.1-1 に示すごとく、1 の後に拘束するノード名、拘束する発電機電力値 PK、拘束する発電機電圧値 VK を入力します。

PK 値は三相回路の場合は三相の値で入力します(単相回路の 3 倍の値)、単位は W で入力します。

VK は Volt の単位の相電圧の Peak 値で入力します。

3) 変更点その 3) 潮流計算条件の追加

以下の計算条件 NITERA, NFLOT, NPRINT, RALCHK は ATPdraw のメニューバーから ATP→Setting→load flow からセットできますが本例では Fig.5.3.1-1 に示すごとく pflow_calc_by_atpdraw.atp 中に直接テキスト入力して指定しています。

これらの簡単な説明は次のとおりです。詳細については Rulebook Rb_100.pdf の Section X を御参照願います。

NITERA は潮流計算の繰り返し回数、

NFLOT は繰り返し計算結果のモニタリング用のバッファサイズ、

NPRINT は拘束ノードの潮流計算結果を表示する時は 1 を入力(潮流計算の結果を知りたいので 1 と入力します)、

RALCHK は潮流計算の収束裕度で、もし PK が PK 値×RALCHK の値以下になれば潮流計算は終了します。

以上の変更を加えて上書き保存した上で、pflow_calc_by_atpdraw.atp を ATPLauncher から呼び出し、RunATP を押せば潮流計算が実行されます。

1)～3)の変更を加えた pflow_calc_by_atpdraw.atp を Fig. 5.3.1-1 に、この計算結果である pflow_calc_by_atpdraw.lis を Fig.5.3.1-2 に示します。

```

BEGIN NEW DATA CASE
FIX SOURCE ← 追加します。変更点その 1
C -----
C Generated by ATPDRAW 1月, 月曜日 9, 2012
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Haldalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2009
C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt > 潮流計算は Time step loop の前に行われるので計算時間はこのように短くても OK です
.0001 .2
1 5 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >> ref1 >> ref2 >> R >> L >> C >
C < n1 >> n2 >> ref1 >> ref2 >> R >> A >> B >> Leng >> <> 0
TRANSFORMER X0001A 0
9999
-----
この間のデータは省略しています。必要により
tacsgen_model_main_circuit_only.atp をご参照ください
-----
/SOURCE
C < n1 >> Ampl. >> Freq. >> Phase/T0 >> A1 >> T1 >> TSTART >> TSTOP >
14INFA 408248. 60. -60. -1. 100.
14INFB 408248. 60. -180. -1. 100.
14INFC 408248. 60. -300. -1. 100.
59GENSA 21228.9 60. -10.
GENSB
GENSC
PARAMETER FITTING 1.
1 1 0 2 1. 1. 892.4 26. 1800.
BLANK
.13 1.79 1.71 .169 .228 .13504 .20029
4.3 .85 .032 .05 .13 1030. .13
1 1.0 .7752
BLANK
11
21
31
41
51
BLANK
FINISH
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
C LOAD FLOW REQUEST CARD
C *----|*----|*----|* PK OR THETAK |* QK OR VK |
1GENSA GENSB GENSC 801.55E6 21228.9
C LOAD FLOW MISCELLANEOUS DATA CARD
C -----|NITERA| NFLOW | NPRINT | RALCHK|
500 20 1 1.E-6
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

1 は PK,VK を拘束する要求です

ここに潮流条件を挿入します

潮流拘束を行う
ノード名

PK 値の指定

VK 値の指定

追加します。変更点その 2

追加します。変更点その 3

潮流計算時の条件

この発電機端子電圧位相は潮流計算を行えば正しい位相が判明しますが、今は不明です。入力データを完成させて潮流計算を計算させるために適当な位相値を入力しておけば OK です。潮流計算後の正しい値に後で上書きして本計算します

Fig.5.3.1-1 潮流計算用 pflow_calc_by_atpdraw.atp ファイル

5.3.2 潮流計算結果

pflow_calc_by_atpdraw.atp を計算させた結果は pflow_calc_by_atpdraw..lis ファイルのノード接続を示す部分と定常解の間に示されます。

結果の抜粋を以下に示します。

発電機と無限大母線間には変圧器が存在し、角変移が存在しますがこれは自動的に加味されて潮流計算結果の発電機端子電圧位相が出力されます。潮流計算結果は与えられた拘束条件で収束し発電機位相は Fig. 5.3.2-1 のごとく基準位相 0 度に対する A 相の発電機端子電圧位相は-48.52469 度となります。この位相を発電機アイコンの ANGLE に入力し直して発電機データを完成させます。

計算結果の有効電力と無効電力値は Fig. 5.3.2-1 のごとく単相の値で示されます。この三倍の三相分の有効電力が拘束条件として指定した 801.55MW です

```

Comment card.  KOMPAR > 0.          |C LOAD FLOW REQUEST CARD
Comment card.  KOMPAR > 0.          |C *----|*----|*----|* PK OR THETAK |*   QK OR VK   |
FIX.   8.016E+08 2.123E+04 0.000E+00 1.000E+19 | 1GENSA GENSB GENSC 801.55E6      21228.9
Comment card.  KOMPAR > 0.          |C LOAD FLOW MISCELLANEOUS DATA CARD
Comment card.  KOMPAR > 0.          |C -----|NITERA| NFLOT | NPRINT| RALCHK|
Load flow iter. 0   500  20   1   1.00E-06 |           500    20    1   1.E-6
Max del-V: 428.9 363.1 361.7 360.3 358.7 358.7 360.3 361.7 363.1 364.3 365.4 366.4 367.3 367.2 357.8 348.1 338.2 328.2 318.1 308.
Max del-V: 297.9 287.8 277.8 267.9 258.1 248.5 239. 229.8 220.7 211.9 203.2 194.9 186.7 178.9 171.2 163.9 156.7 149.9 143.2 136.8
Max del-V: 130.7 124.8 119.1 113.7 108.4 103.4 98.64 94.04 89.64 85.43 81.4 77.55 73.87 70.36 67. 63.79 60.8 57.97 55.26 52.66
Max del-V: 50.19 47.82 45.55 43.39 41.32 39.35 37.47 35.67 33.96 32.32 30.76 29.28 27.86 26.51 25.22 24. 22.83 21.72 20.66 19.65
Max del-V: 18.69 17.77 16.9 16.07 15.28 14.53 13.82 13.14 12.49 11.88 11.29 10.73 10.2 9.699 9.22 8.764 8.331 7.918 7.526 7.154
Max del-V: 6.799 6.462 6.142 5.837 5.548 5.272 5.011 4.762 4.525 4.301 4.087 3.884 3.691 3.507 3.333 3.167 3.01 2.86 2.718 2.582
Max del-V: 2.454 2.332 2.216 2.105 2.001 1.901 1.806 1.716 1.631 1.55 1.472 1.399 1.329 1.263 1.2 1.14 1.084 1.03 .9782 .9295
Max del-V: .8831 .8391 .7973 .7575 .7198 .6839 .6498 .6174 .5866 .5573 .5295 .5031 .478 .4542 .4316 .41 .3896 .3702 .3517 .3342
Max del-V: .3175 .3017 .2866 .2723 .2587 .2458 .2336 .2219 .2108 .2003 .1903 .1808 .1718 .1632 .1551 .1474 .14 .133 .1264 .1201
Max del-V: .1141 .1084 .103 .0979 .093 .0883 .0839 .0797 .0758 .072 .0684 .065 .0617 .0587 .0557 .053 .0503 .0478 .0454 .0432
Max del-V: .041 .039 .037 .0352 .0334 .0317 .0302 .0287 .0272 .0259 .0246 .0233 .0222 .0211 .02 .019 .0181 .0172 .0163 .0155
Max del-V: .0147 .014 .0133 .0126 .012 .0114 .0108 .0103 .0098 .0093 .0088 .0084 .008 .0076 .0072 .0068 .0065 .0062 .0059 .0056
Max del-V: .0053 .005 .0048 .0045 .0043 .0041 .0039 .0037 .0035 .0033 .0032 .003 .0029 .0027 .0026 .0025 .0023 .0022 .0021 .002
Max del-V: .0019 .0018 .0017 .0016 .0015 .0015 .0014 .0013 .0013 .0012 .0011 .0011 .001 .1E-2 .9E-3 .9E-3
Exit the load flow iteration loop with counter NEKITE = 276. If no warning on the preceding line, convergence was attained.
Row  Node  Name      Voltage magnit  Degrees      Real power P  Reactive power
   4    20  GENSA      2.12289000E+04  -48.52469    2.67183593E+08  1.12114227E+08
   5    21  GENSB      2.12289000E+04  -168.52469   2.67183593E+08  1.12114227E+08
   6    22  GENSC      2.12289000E+04   71.47531    2.67183593E+08  1.12114227E+08

```

潮流計算条件で NFLOT=20 として潮流計算(繰り返し計算)のバッファサイズを指定しているので繰り返し結果が各行20個ずつ表示されています。(潮流計算のモニター)

NPRINT=1 として潮流計算結果を出力要求しているのでこのように潮流計算結果が表示されます。

望む潮流にするための発電機端子電圧位相が計算されたのでこの A 相の端子電圧位相を発電機アイコンの Angle の値として入力します。

Fig. 5.3.2-1 pflow_calc_by_atpdraw..lis の中に表示される潮流計算結果

尚、ATPDraw の Menu→Settings→Load flow で潮流計算用の Miscellaneous data card の Setting 一覧が表示されますが、本稿では上述のごとくテキストベースで別途入力しているのでこの部分は全てデフォルト状態の 0 にしています。

5.4 潮流計算結果の反映

以上の潮流計算で得られた-48.52 度の A 相端子電圧の位相を tacsgen_model_with_inicon の発電機アイコンの ANGLE に入力し直します。(これまで ANGLE の入力値は適当な値としているため)。B 相、C 相の位相値は入力する必要はありません。ATP が自動的に-48.52 度からそれぞれ 120 度、240 度遅れの位相値を B 相、C 相位相と解釈します。

潮流計算結果から発電機の出力は $3 \times 2.67183593\text{E}+08 \rightleftharpoons 801.55 \text{ MW}$ であり PK で指定したとおりの値になっています。これは $892.4\text{MVA} \times 0.9 \text{ pf} (= 803.16 \text{ MW})$ の 0.998 P. U. の大きさの有効電力出力です。

この 0.998P.U.の値は TACS 系の PG0 の値として使います。
PG0 の説明は 7.10 の 3)と Fig.7.10-3 で行っています。

次項から励磁系の説明になります。

6. 与えられた励磁系制御ブロック図

与えられた励磁制御系ブロック図を Fig. 6-1 に示します。

点線で囲んだ部分は P.S.S.部分です。

PSS の働きの概要は次のとおりです。

発電機有効電力が突然変化した時その電力変化を検出し、系統が安定するように発電機電圧を制御するため AVR に PSS の出力信号 VS を渡しています。たとえば三相短絡事故が発生すれば発電機出力はその間低下し、速度制御系は短時間には追従できないため発電機ロータは加速され脱調方向に行きます。ここで PSS により有効電力の低下を検出し、発電機電圧を上げるように AVR に信号を与え、発電機電圧を上げることで出力を増やし電氣的に制動をかけ系統の安定化に寄与させています。

点線以外の部分は AVR 部分と発電機モデルの界磁回路へ接続される TACS 出力信号を表しています。各伝達関数ブロック間の信号名は同時にノード名にもなっています。ATPDraw により励磁系を記述する時これらのノード名を使用します。

詳細は後述していますが主な信号の概要説明は次のようになります。

PG は発電機から検出された発電機有効電力値(P.U.値)、PG0 は定常状態の基準有効電力(P.U.値)です。

ET は発電機から検出された発電機電圧(P.U.値)、ET0 は定常状態の基準電圧(P.U.値)です

EF0 は定常状態の発電機界磁電圧の P.U.値です。

EFD が発電機界磁回路電圧として発電機モデルに渡される TACS の最終出力信号(正規化された界磁電圧)になります。

下図で留意すべきは朱記部分です。この部分は入手した励磁制御ブロック図には無いもので TACS で記述された励磁系信号を正規化して発電機モデルへ渡すために ATP ユーザが設けなければならないものです。K の詳細は 7.14 項で解説しています。

Fig.6-1 を基に ATPDraw で電気系統図に励磁制御系を追加して行きます。完成した電気系統図と励磁制御系は Fig. 7.2-1 に示します。

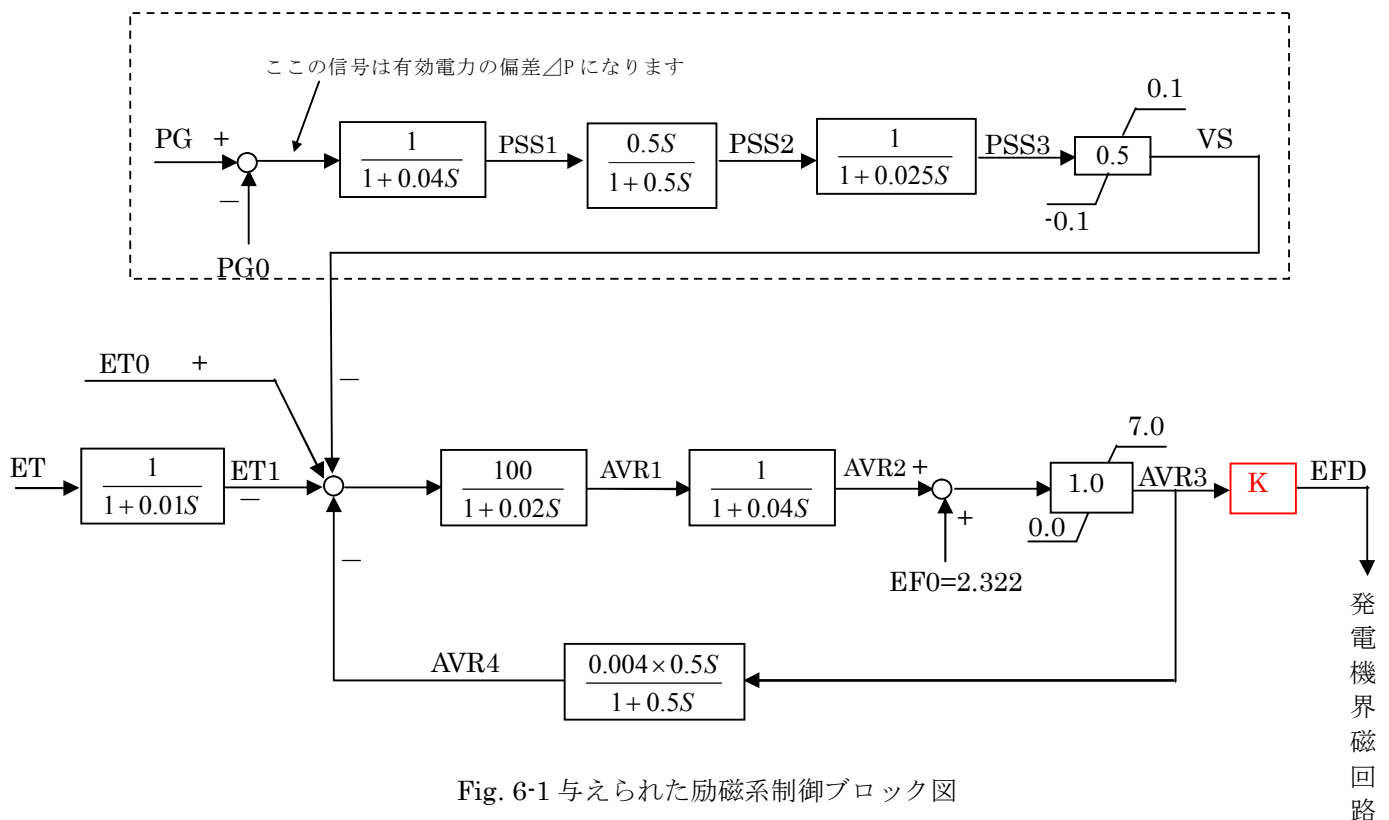


Fig. 6-1 与えられた励磁系制御ブロック図

7. TACS による発電機界磁電圧制御

7.1 概要

実際の発電機の界磁は励磁制御装置で制御されています。これと同じ機能を ATP の発電機モデルに付加することができます。

この制御機能を付加するには ATP に内蔵されている TACS を使用します。

TACS による励磁制御系の模擬となるとなによりやら難い感じがしますが実際には与えられた励磁制御ブロックに則りほぼ機械的に作業ができるので難しくはありません。

しかしながら TACS で励磁制御系を模擬する上で知っておかねばならない点も少なからず存在しているので、本稿ではそれらの点について注力して解説して行きます。

尚、TACS に関するルールブックは JAUG パスワード保護サーバの RB—03A です。必要によりご参照願います。

TACS の励磁系の最終出力は 7.14 項で述べるごとく正規化した上で発電機モデルに渡す必要があります。この決まりごとは ATP の Rule book で決められており、遵守しなければ正しいシミュレーションが行えません。

この正規化作業が励磁制御系模擬の最も意外な点であろうと思います。

正規化した励磁系出力を ATP の発電機モデルの界磁に接続してやれば実際と同じように発電機モデル→TACS による励磁系→発電機モデル の Feed back 制御系を構築されます。

主回路で擾乱(この例では短絡)が生じた時、AVR, PSS 効果を反映して主回路の電気諸量のダイナミックシミュレーションを行ってそれらの Plot 波形を得ることができます。得られるのは電気関係のみならず同期機の機械系諸量(速度、回転子角度など)のプロット波形も見ることができます。

これはもう筆算の世界を超えた世界です。

ATP を使えばこのようなすばらしいシミュレーションを行わせることができます。

しかもこの Simulation をするために難解な数式を取り扱う必要は無く、また TACS による励磁制御系の記述も容易です。

原動機の速度制御系も TACS で模擬できますが、本稿では三相短絡事故発生直後の短時間の現象を取り扱っているため、励磁系に比し応答が遅い速度制御系は無視し、制御系に組み込んでいません。

TACS による励磁制御系を構築するための主な作業は次のとおりです。

- 発電機回路の電圧、電流を TACS 機能を使って TACS 系に取り込みます。
- 入手している励磁制御ブロック図を TACS で記述し、取り込んだ発電機回路の電圧、電流信号を TACS で記述した AVR, P.S.S に接続します。
- 定常状態では P.S.S と AVR の偏差信号は 0 になります。定常状態の界磁電圧値(P.U.)を確保するため直流電圧信号 EF0 を界磁回路に加えます。
- 励磁系最終段で出信号の正規化作業を行い、正規化した界磁電圧信号(P.U.値)を電気系の発電機モデルに界磁電圧として渡します。

本稿ではこれらの作業を ATPDraw を使って行なって行きます。

完成した ATPDraw による電気系統と TACS の励磁制御ブロック図を結合したノードマップを Fig. 7.2-1 に示します。Fig. 7.2-1 はこの解説書と同時にアップロードしている tacsgen_model_with_inicon.acp のハードコピーです。

本図の励磁系の各部の詳細説明は以下の説明の中で順次行なって行きます。

tacsgen_model_with_inicon.acp の励磁制御系の各アイコンの入力内容は ATPDraw を Install してあれば右クリックして入力内容を見ることができます。

ご参考: Type59 又は Type 58 同期発電機モデルの界磁電圧の大きさは TACS で制御されない限り、定常時の計算も過渡時の計算も、定常状態の界磁電圧値に保たれて計算されるようになっています。

留意しておきたい点です。

7.2 ATPDraw による完成した電気回路と励磁制御ブロック図

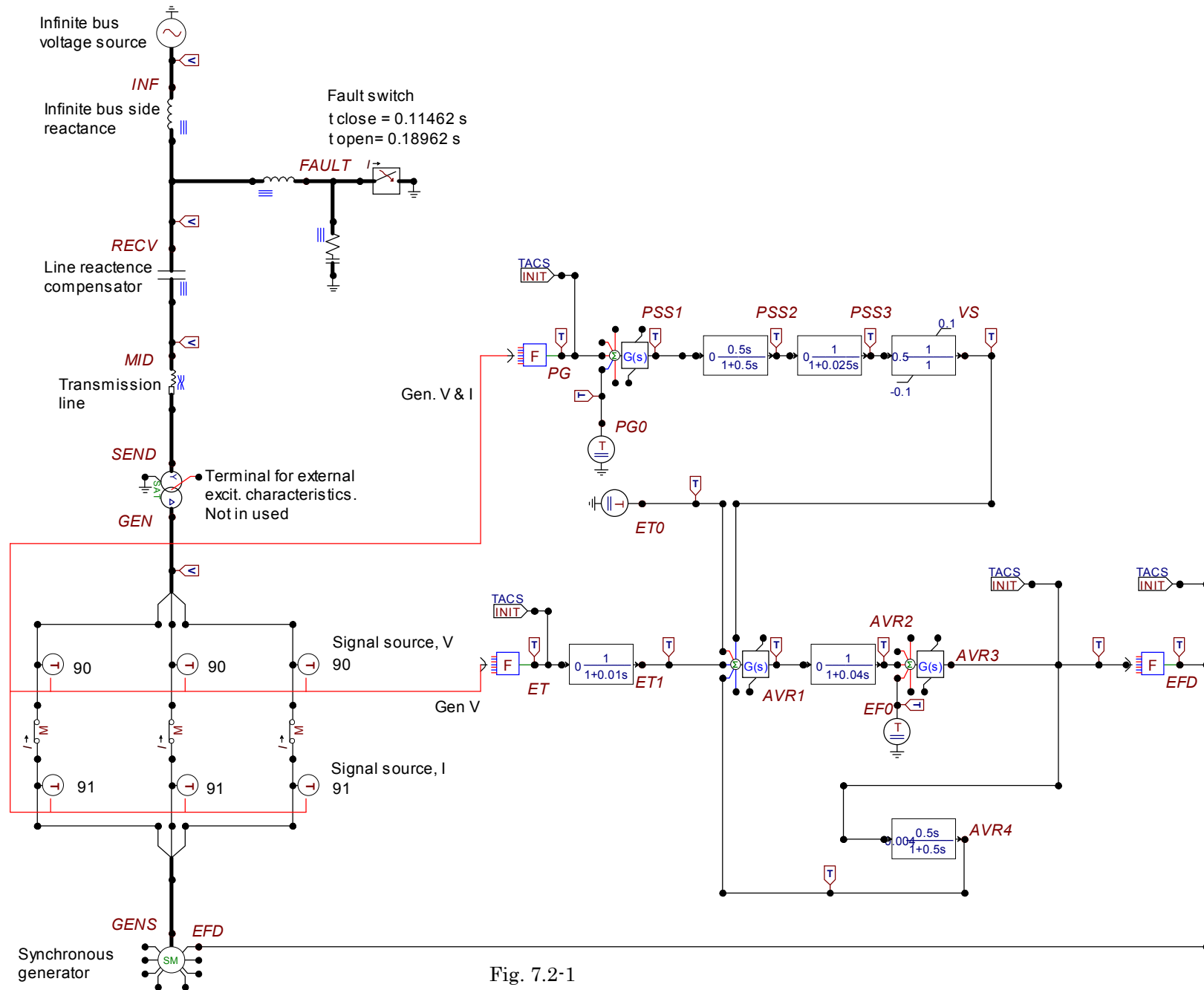


Fig. 7.2-1

Fig. 7.2-1 の赤の線(PDF 化する時赤の点線から実線に誤変換されています。ATPDraw 上は赤の点線です。)は Fortran statement  で使われる入力信号がどこから来るか参考までに示しています。(フローティングメニュー→TACS→Draw relation を選択した上でマウスで drag すればこの点線を引くことができます。)

Fortran statement の中には後述のごとく 電圧信号 GENA, GENB, GENC が記入されています。この赤の点線は無くとも GENA, GENB, GENC が Fortranstatement 中に入力されていればこれらは Fortranstatement 中に取り込まれます。したがって ATPDraw 上のこの赤の点線は Fig.7.2-1 を読む時直感的にどこから持ってきているかわかるようにするために用いています。

7.3 ATPDraw による励磁制御ノードマップの作成と説明

ATPDraw による励磁制御ノードマップの作成は電気主回路の作成と同じく、必要なアイコンをフローティングメニューから呼び出し、端子にマウスポインターを置き、マウス左ボタンを押したままドラッグし相手側の端子でマウスの左ボタンをクリックすれば接続線が引かれて接続されます。

基本的には与えられた励磁制御ブロック図と同じブロック図を ATPDraw で作成しますが一部与えられた制御ブロック図には無い内容も付け加えます。
付け加える内容は発電機電圧を P.U.値で検出する部分、有効電力を P.U.値で検出する部分、界磁電圧信号の正規化(初期化)する部分となります。

ATPDraw の励磁制御ノードマップの説明を Fig. 7.3-1 でします。

Fig. 7.3-1 は Fig.7.2-1 の PSS 部のノード PG と PSS1 間を抜粋したものです。

各アイコンの入出力端子に茶色で示されている名前がノード名であると同時にそのノードの信号名になっています。

例

1) Fortran statement のノード PG における出力信号名は PG の名前になります。

2) 伝達ブロック G(s)のノード PSS1 における出力信号名は PSS1 の名前になります。

全てこのようにノード名が信号名になります。

計算実行後にこれらの入出力信号の波形プロットを見るには、見たい信号部分に TACS Probe  を計算する前に取り付けておけば計算終了後この信号の Plot 波形を見ることができます。

TACS Probe はフローティングメニューから

“Probe & 3-phase” → “Probe TACS”を選択して呼び出します。

伝達関数 G(s)の入力信号名は PG と PG0 で、出力信号名は PSS1 です。

アイコン  は取り付けられているノードの信号の初期値を指定するもので、フローティングメニューから TACS→Initial cond.で呼び出します。

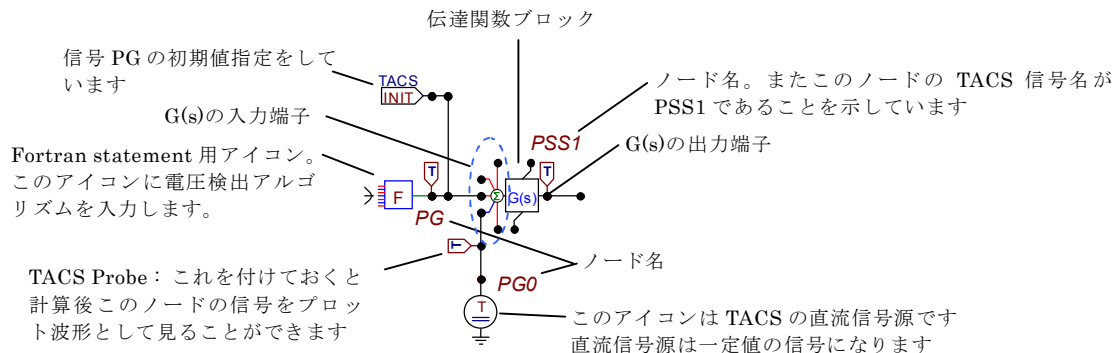


Fig.7.3-1

伝達関数 $G(s)$ のブロックの左側にある 5 本の入力端子はすべて右クリックして＋またはマイナスの符号を選択できます。たとえば入力信号 PG が接続される端子で－符号を選択すれば－PG の信号が $G(s)$ に入力されます。
この機能は入力信号間の和や差を取るのに使われます。

伝達関数ブロックの入力信号はブロックの左側の端子から入り、出力信号はそのブロックの右側の端子から出ます。この点は守らなければなりません。
たとえば Fig. 7.2-1 のノード AVR3 と AVR4 間の伝達関数に注目願います。
入力信号はブロックの左側から入る AVR3 で、出力信号は AVR4 になっています。

これらの信号を Fig.7.3-2 のごとく接続するのは間違いです。
Fig. 7.3-2 のごとく接続してしまうと入力信号はこの伝達関数ブロックの左側端子に接続されている AVR4、また出力信号は伝達関数ブロックの右側に接続されている AVR3 と解釈されてしまいます。正しくは入力信号は AVR3、出力信号は AVR4 でなければならぬので、Fig.7.3-2 では正しく計算されません。
留意しておきたい点です。

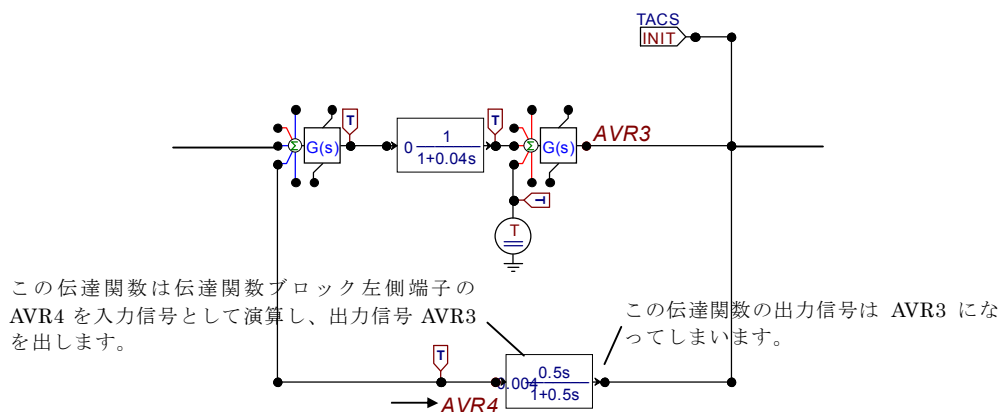


Fig. 7.3-2 誤った伝達関数の接続

ATPDraw で伝達関数ブロック間の接続、伝達関数と発電機モデル間の接続、その他の TACS 要素間の接続方法は電気主回路と同じ方法で、端子にマウスポインターを置き、マウス左ボタンを押したままドラッグし相手側の端子でマウスの左ボタンをクリックすれば接続線が引かれて接続されます。

この TACS 系の接続線を消去すれば TACS 信号はそこから先には行きません。
たとえば PSS を除外するとどのようになるかシミュレーションしたい場合、ノード VS の接続線を消去すれば PSS は除外されます。接続線を消去するにはマウスで当該接続線を選択し(線色が黒から緑に変わります)、Delete ボタンを押せば消去されます。
9.項の 3)に示す Fig.9-6 はこのようにして VS 信号をブロックした上でシミュレーションしています。

それでは次項から順を追って制御系の説明をして行きます。
以下の説明では Fig.7.2-1 から説明箇所の部分コピーしたものを使って説明して行きます。

7.4 発電機電圧を TACS 系に取り込む

TACS で記述した AVR に供給するため発電機の各相相電圧を TACS 系に取り込みます。
この取り込みのために発電機主回路に Fig.7.4-1 のごとく変圧器と発電機間に Splitter と Measuring Switch を挿入し、各相に TACS の 90 番の信号源を取り付けます。
Splitter と Measuring Switch を挿入するのは後述するように電圧信号名と電流信号名を区別する必要があるためです。

90 番の信号源を呼び出すには次のようにします。

フローティングメニューより TACS→Coupling to circuit を選択すれば信号源のアイコン  が呼び出されます。このアイコンを右クリックして入力窓を開き Fig.7.4-2 のごとく入力します。

信号源の Type の箇所には電圧検出であれば 90 を、電流検出であれば 91 を入力します。

Tsta は start time の略であり、-1 は電圧のサンプリングが $t \leq 0$ から開始されることを意味しています。

T_sto は stop time の略であり、1000sec.後に電圧サンプリングが停止することを意味しています。

90 番の信号源で取り込まれる各相電圧の信号名は 90 番の信号源が取り付けられている電気回路のノード名に相名 A, B, C をつけた名前になります。この例では電気回路のノード名が GEN のところに 90 番の信号源が取り付けられているので、向かって右端の相の 90 番信号に GENA の名前が付けられ、中相の 90 番信号には GENB の名前が付けられ、左端の相の 90 番信号には GENC の名前が付けられます。

この結果 GENA, GENB, GENC の TACS 信号が各々 A 相、B 相、C 相の発電機相電圧の瞬時値を表す TACS 信号名になります。

Fig.7.4-1 の電流検出回路の説明は 7.10 項の 1) でしています。

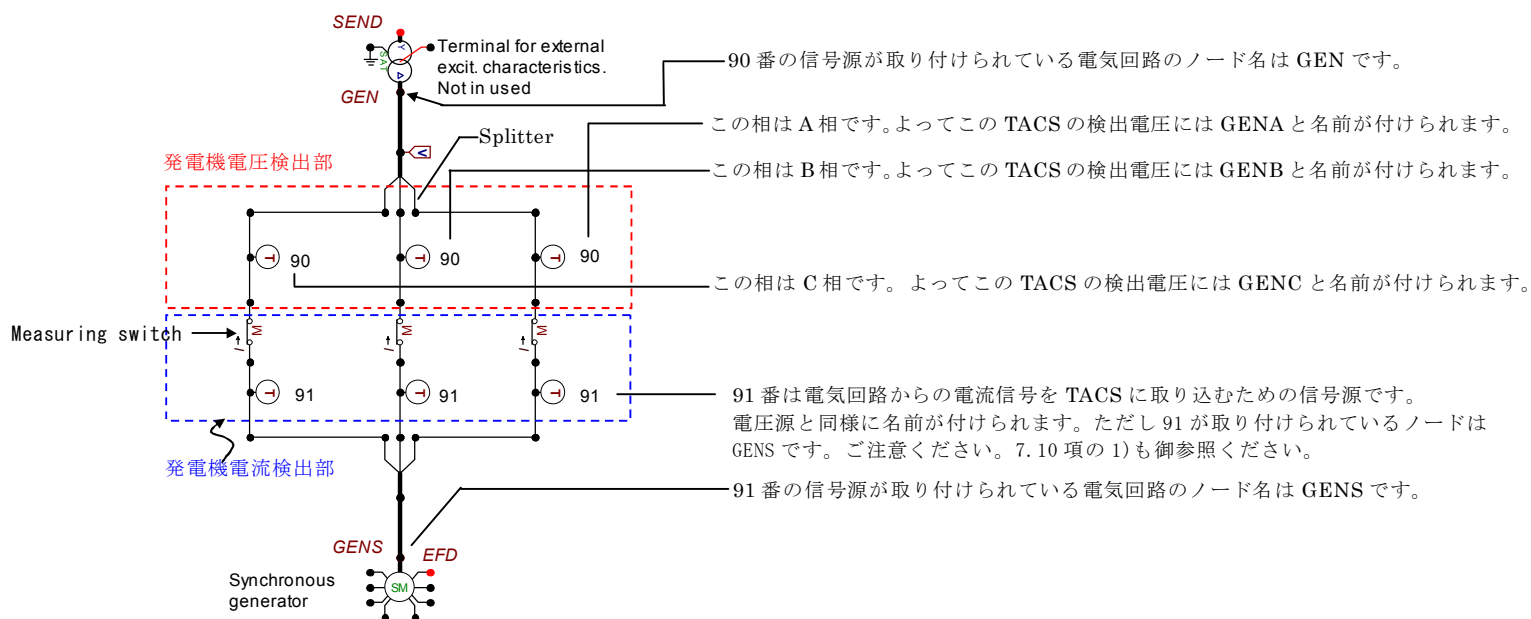


Fig.7.4-1 発電機主回路から TACS 系に電圧を取り込む方法

DATA	UNIT	VALUE
Type		90
T_sta		-1
T_sto		1000

NODE	PHASE	NAME
Probe	A	GEN

Order: 0 Label:

Comment:

☐ Hide

Fig.7.4-2 90 番の信号源への入力内容

7.5 発電機主回路電圧 ET (P.U.) の演算

1) 採用している電圧検出アルゴリズム

発電機主回路の電圧検出のアルゴリズムには各種ありますが、本例のアルゴリズムは(7.5-1)式のとおりです。

90 番の信号源で検出された各相電圧瞬時値を (7.5-1) 式のごとく二乗し、それらの和の平方根をとることによって線間電圧を作り出し、それを定格線間電圧 V_ℓ で除し、発電機主回路電圧の P.U. 値を得ています。

v_a, v_b, v_c は各相相電圧の瞬時値、 E_m は相電圧の最大値です。

発電機主回路電圧(P.U.)=

$$\frac{\sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2}}{V_\ell} = \frac{\sqrt{E_m^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) + E_m^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t - 2 \cdot \pi/3) + E_m^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t - 4 \cdot \pi/3)}}{V_\ell} \quad (7.5-1)$$

(7.5-1)式の分子の $\sqrt{\quad}$ 部は各相相電圧の瞬時電圧から線間電圧を計算しています。それを分母の定格線間電圧 V_ℓ で除して発電機回路電圧の P.U. 値を算出しています。分子の $\sqrt{\quad}$ 部が線間電圧になる説明は次のとおりです。

電圧が変動した時の線間電圧を V_ℓ' とすれば、相電圧 Peak 値 E_m は

$$E_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot V_\ell' \quad (7.5-2) \quad \text{です。}(7.5-2)\text{式を}(7.5-1)\text{式に入れると分子は次の}$$

ようになります。

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot V_{\ell'} \cdot \sqrt{\sin^2(\omega \cdot t) + \sin^2(\omega \cdot t - 2 \cdot \pi/3) + \sin^2(\omega \cdot t - 4 \cdot \pi/3)} \quad (7.5-3)$$

(7.5-3)式の平方根内の計算結果は $\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$ となるので、分子部分は

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot V_{\ell'} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = V_{\ell'} \quad (7.5-4) \quad \text{となって線間電圧になります。}$$

2) 電圧検出アルゴリズムの入力方法

この演算アルゴリズムは AVR 部分の Fig.7.5-1 の Fortran statement に入力します。

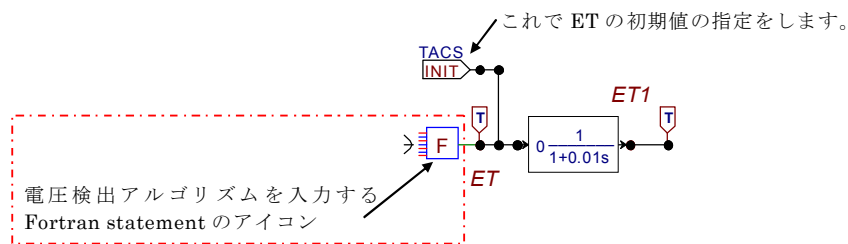


Fig. 7.5-1 電圧検出アルゴリズムを入力する Fortran statement

この Fortran statements のアイコンを呼び出すには Fig.7.5-2 のごとくフローティングメニューより TACS → Fortran statements → General を選択して呼び出します。

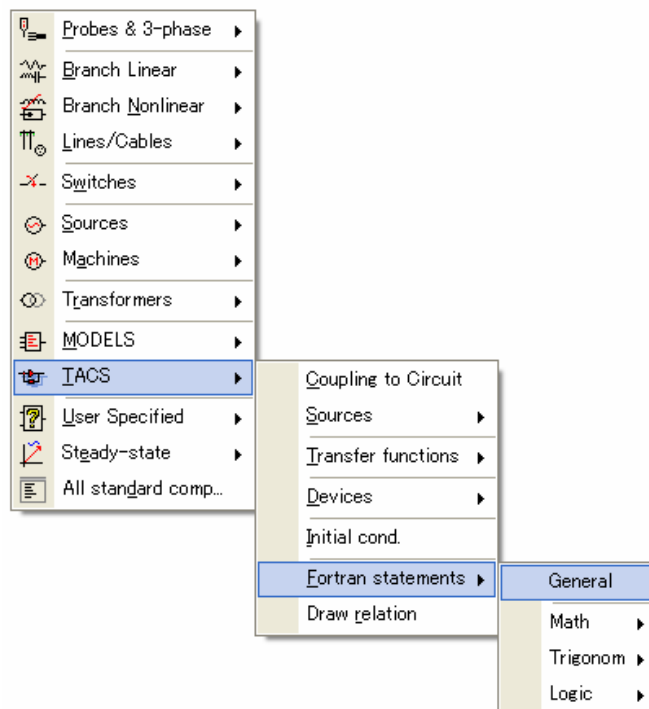


Fig. 7.5-2 Fortran statement アイコンの呼び出し方法

するとこの Fortran statement のアイコンが呼び出されます

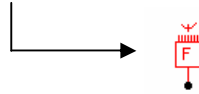


Fig. 7.5-3 Fortran statement のアイコン

このアイコンを右クリックすると Fig.7.5-4 の入力窓が開くので、FORTRAN の窓に電圧検出のアルゴリズムを OUT= の箇所に入力します。

発電機各相の端子電圧(相電圧)の瞬時値と TACS probe で検出される電圧信号の対応は、 $v_a \leftrightarrow \text{GENA}$, $v_b \leftrightarrow \text{GENB}$, $v_c \leftrightarrow \text{GENC}$ となるので線間電圧の値は(7.5-5)式となります。

$$\sqrt{\text{GENA} * \text{GENA} + \text{GENB} * \text{GENB} + \text{GENC} * \text{GENC}} \quad (7.5-5)$$

(7.5-5)式を定格線間電圧で除して発電機電圧 ET の P.U.値は

$$\sqrt{\text{GENA} * \text{GENA} + \text{GENB} * \text{GENB} + \text{GENC} * \text{GENC}} / 26000 \quad (7.5-6)$$

として求められます。

この(7.5-6)式を Fortran statement 中の OUT = の箇所に Fig. 7.5-4 のごとく入力します。

Fortran ステートメントの出力側のノード名です。同時にこの Fortran ステートメントの計算結果を ET という名前で出力する指定にもなっています。この部分の表示は入力時は表示されません。計算実行後表示されます。

ここに電圧検出アルゴリズムの数式をこのように入力します。

Fig.7.5-4 入力した電圧検出アルゴリズム

TACS による ET の計算結果を見たい時はこの Fortran statement のノード ET に TACS Probe を Fig.7.5-5 のごとく取り付けます。すると計算終了後に発電機電圧 ET(P.U.値)の Plot 波形を見ることができます。

ほかの TACS 信号の計算結果の波形を見たい時も同様にこの TACS の probe を取り付けおきます。

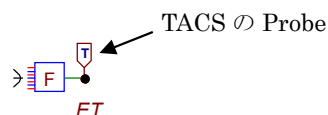


Fig. 7.5-5 TACS 信号 ET を検出するための TACS の probe

3) 発電機電圧 ET の初期値

ノード ET の  は発電機端子電圧 P.U.値”ET”の初期値を決めています。この初期値への入力データは Fig.7.5-6 のとおりです。

電圧検出アルゴリズムから明らかなように突発短絡が発生する前の定常状態では ET は 1.0 P.U.なので Fig.7.5-6 のごとく 1 を入力します。

DATA	UNIT	VALUE
Init		1

NODE	PHASE	NAME
I_Node	1	ET

初期値は 1.0 P.U.なので 1 を入力します。

Buttons: Copy, Paste, entire data grid, Reset, Order: 0, Label: , Comment: , Hide (checkbox), Edit definitions, OK, Cancel, Help

Fig. 7.5-6 発電機端子電圧 ET の初期条件の入力データ

次にこの初期条件を入れないとどうなるか示します。

tacsgen_model_with_inicon.acp からこの初期条件だけをを削除し、別名、例えば no_initial_condition.acp で保存した上で計算させます。

tacsgen_model_with_inicon.acp の ET と no_initial_condition.acp の ET をプロットすると Fig. 7.5-7 になります。

本図から明らかなように初期条件を設ければ計算開始より ET を 1.0 P.U.にすることができるので、初期条件の重要性がわかります。

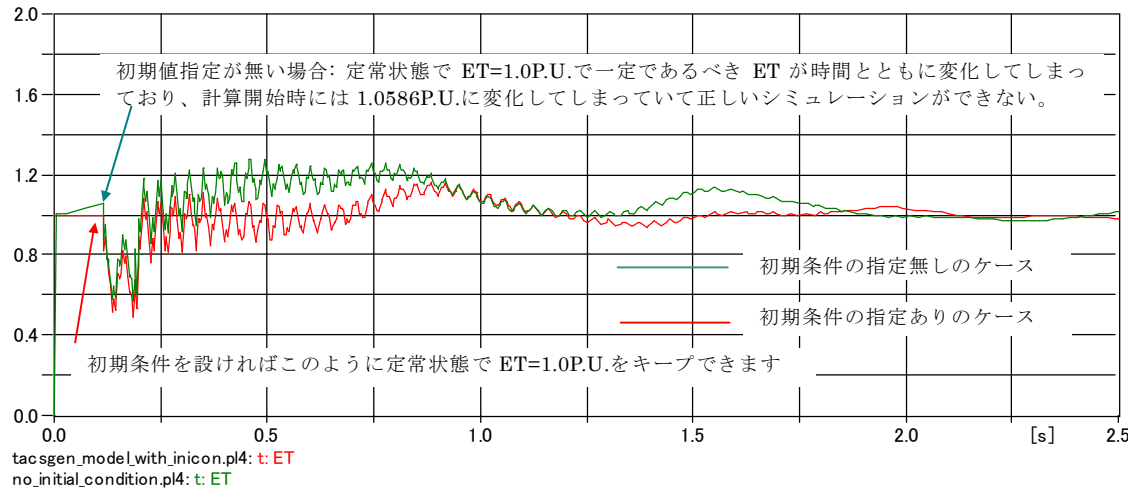


Fig. 7.5-7 初期条件の有無による差異

4) 検出される発電機電圧 ET(P.U.)の値

定常状態の(7.5-1)式の分子部分の数式と(7.5-1)式の全体の数式の二つを計算した結果を Fig.7.5-8 に示します。(この計算は ATP で無く別の数式計算プログラムで行っています)

(7.5-1)式の計算結果は Fig.7.5-8 に示すとおり、1.0 (P.U.) となります。

Fig.7.5-8 は $t = 0$ (s) から 0.0001 sec.刻みで $t = 0.02$ (s)まで計算しています。

また $E_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot V_l = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot 26 \text{ KV}$ としています。

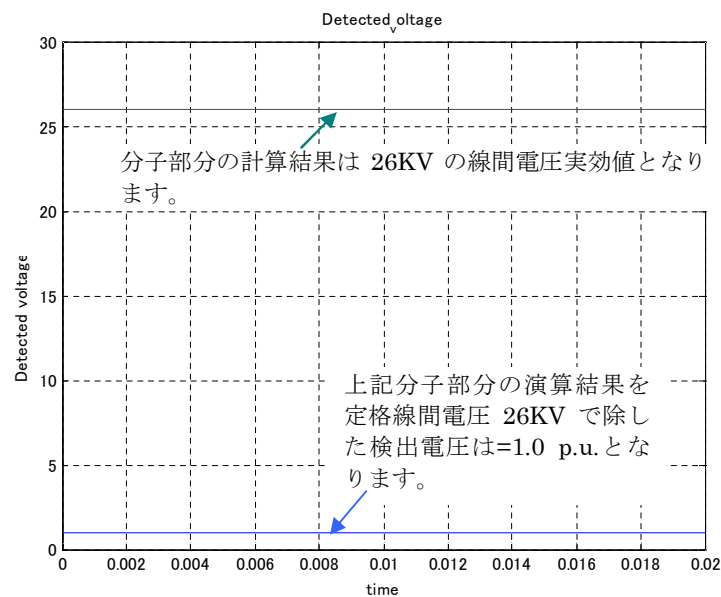


Fig. 7.5-8 (7.5-1)式の分子部と(7.5-1)式全体の計算結果

このように発電機が定格電圧の定常状態で運転している時、発電機電圧 ET は 1.0(P.U.)として検出されます。

Fig. 7.5-9 は故障点で三相短絡が発生した時の ATP による TACS 信号 ET のシミュレーション結果を示しています。

短絡発生まで検出電圧は 1.0 P.U.で推移し、短絡で ET は急激に低下し、三相短絡事故除去で回路電圧が回復する様子が観察されます。

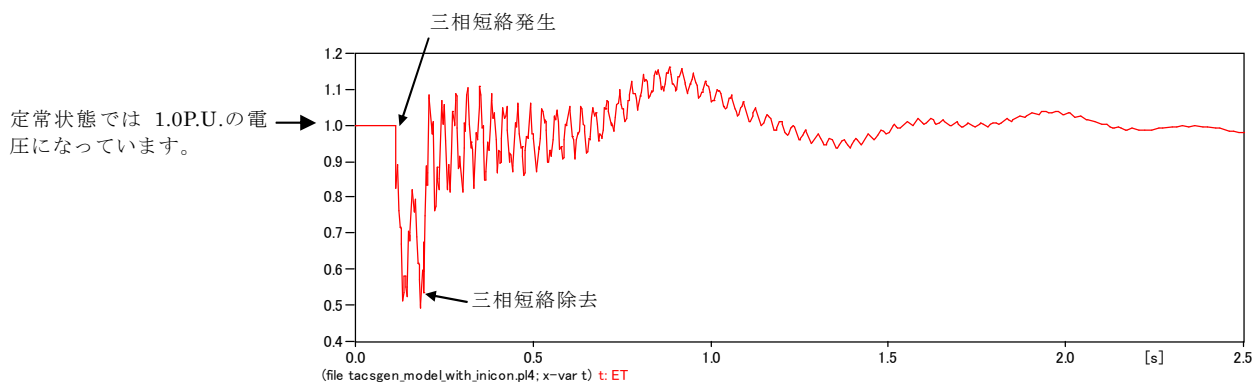


Fig. 7.5-9 ATP による ET の計算結果

この演算結果の信号“ET”は次項の $\frac{1}{1+0.01s}$ の一次遅れ伝達関数ブロックに渡されます。

7.6 ノード ET と ET1 間の一次遅れ伝達関数ブロック

1) 一次遅れ伝達関数に使えるアイコン

ATPDraw の伝達関数には Fig.7.6-4 に示す各種の伝達関数が登録されています。

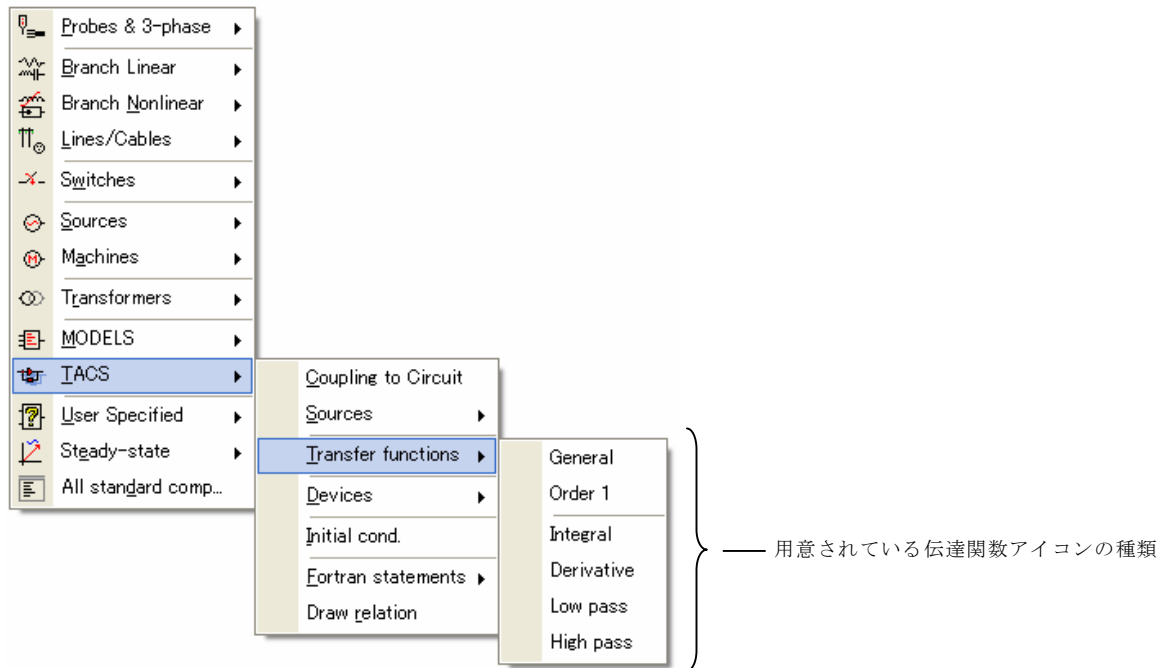


Fig. 7.6-1 ATPDraw に用意されている伝達関数アイコン

この中で一次遅れ伝達関数ブロックに使えるものは Genral、Order 1、Low pass の 3 種類です。

2) Low pass filter を使う場合

呼び出されたデフォルトのアイコンは次のとおりです。



Fig. 7.6-2 Low pass filter のアイコン

このアイコンを右クリックして入力窓を開くと次のようになっています。

DATA	UNIT	VALUE
K		1
tau	s	1

NODE	PHASE	NAME
IN	1	
OUT	1	

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig. 7.6-3 Low pass filter のデフォルトの入力窓

ここで

K: 分子の値

Tau: 時定数
です。

与えられた励磁制御ブロック図のこの部分の伝達関数は $\frac{1}{1+0.01s}$ ですから、K=1, Tau=0.01 と入力すれば OK です。

3) Order 1 の伝達関数を使う場合

本シミュレーションではこの部分に Low pass filter で無く Order 1 の伝達関数を使っています。理由は Order 1 の方は Low pass filter に比して汎用性が高く、練習しておきたいからです。

呼びだされた Order 1 の伝達関数のデフォルト状態のアイコンは次のとおりになっています。

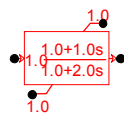


Fig. 7.6-4 呼び出されたデフォルト状態の一次伝達関数ブロック

このアイコンを右クリックすると Fig.7.6-5 の伝達関数の入力窓を開きます。

TACS: TRANSF1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Gain		1
N0		1
N1	s	1
D0		1
D1	s	1
Fixed_Hi	0=off	0
Fixed_Lo	0=off	0
NamedHiOn	0/1, 0=off	0

NODE	PHASE	NAME
IN	1	
OUT	1	
Named_Hi	1	
Named_Lo	1	

この部分の内容は右のとおりです

NamedLoOn	0/1, 0=off	0
Dynamic icon	0/1, 0=off	1

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig.7.6-5 Order 1 のデフォルト状態の入力窓

入力項目の説明は次のとおりです。

Gain は増幅率です。増幅作用が無い場合は $\text{Gain} = 0$ とし且つ $\text{N0}=1$ と入力します。

N0 と N1 の N は Numerator (分子)を表し、伝達関数の分子の部分に記述するのに使われ、 N0 は 0 次の数値を入力するのに使い、 N1 は 1 次の s の係数を入力するのに使います。本例では一次遅れ伝達関数の分子部分は 1 でこれは $1+0s$ ですから N0 に 1 を入力し、 N1 に 0 を入力します。

すると分子は $1+0s \rightarrow 1$ と入力したことに解釈されます。

D0 と D1 の D は Denominator (分母)を表し、伝達関数の分母の部分に記述するのに使われます。 D0 は 0 次の数値を入力するのに使い、 D1 は一次の s の係数 (時定数) を入力するのに使います。

本例では一次遅れ伝達関数の分母部分は $1+0.01s$ ですから D0 に 1 を入力し、 D1 に 0.01 を入力します。

すると分母に $1+0.01s$ と入力したことになります。

このように伝達関数の入力には与えられた伝達関数ブロック図を参照しながら機械的に行うことが出来ます。このことは一次遅れ伝達関数のアイコンに限らず、次に述べる一般の伝達関数ブロックアイコン $G(s)$ でも同じです。

このように伝達関数ブロックを ATCS で記述するのは機械的に作業できるので難しくないことがお分かりになると思います。

Fixed_Hi は出力値に対し固定の高値リミットを設ける時に使い、Value 欄にそのリミット値 (P.U.値)を入力します。

Fixed_Lo は固定の低値リミットを設ける時に使い、Value 欄にそのリミット値 (P.U.値)を入力します。

これらの固定リミットを使わない場合は 0 を入力しておきます。

NamedHiOn は高値リミットをこの伝達関数以外の外部の TACS 系信号でかける場合に 1 を入力します。すると外部の高値リミット信号を接続するためのノードがアイコンに表示されるようになります。

NamedLoOn は低値リミット用で上記と同様の意味です。

Dynamic icon は入力した伝達関数の値をアイコン上に表示しておきたい場合は 1 を、表示したくない場合は 0 を入力します。0 を入力するとアイコン表示は次図のように一般化した内容で表示されます。

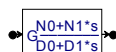


Fig.7.6-6 Dynamic icon=0 とした場合のアイコン表示

以上の説明からこの伝達関数への入力データは次のようにしています。

DATA	UNIT	VALUE
Gain		0
N0		1
N1	s	0
D0		1
D1	s	0.01
Fixed_Hi	0=off	0
Fixed_Lo	0=off	0
NamedHiOn	0/1, 0=off	0
NamedLoOn	0/1, 0=off	0
Dynamic icon	0/1, 0=off	1

ET1

Fig. 7.6-7 Order 1 を使った一次伝達関数ブロックの入力データ

データ入力にはデフォルトの値を変更する必要がある項目に対し上書き入力し OK ボタンをおせば完了です。OK ボタンを押すと Dynamic icon は 1 としているので Fig. 7.6 -7 の右に示しているように入力内容になるようにアイコンの表示が変更されます。

4) 伝達関数 General を使う場合

TACS→Transferfunctions→General で呼びだされたアイコンは次のとおりになっています。



Fig. 7.6-8 呼び出されたデフォルト状態の General の伝達関数ブロック

このアイコンを右クリックすると次の入力窓が開きます。

DATA	UNIT	VALUE
Gain		1
N0		1
N1		1
N2		0
N3		0
N4		0
N5		0
N6		0

NODE	PHASE	NAME
OUT	1	
IN1	1	
IN2	1	
IN3	1	
IN4	1	
IN5	1	
Name_L	1	
Name_H	1	

Transfer function: $G(s) = \frac{1+s}{1+s}$

DATA	UNIT	VALUE
N7		0
D0		1
D1		1
D2		0
D3		0
D4		0
D5		0
D6		0
D7		0
Fix_Lo		0
Fix_Hi		0

この図は左の入力窓の N7 以下をスクロールして表示したものです

Fig. 7.6-9 伝達関数ブロック General の入力窓

N0～N7 は伝達関数ブロック図の分子部分の 0 次～7 次までの数値入力用です。

D0～D7 は伝達関数ブロック図の分母部分の 0 次～7 次までの数値入力用です。

これらの入力項目に対し、与えられた伝達関数に該当する次数が存在しなければ入力値は 0 のままにしておきます。

Fix_Lo, Fix_Hi はそれぞれ固定の下限值と上限値を設ける必要がある場合それらの制限値を入力します。制限値を設ける必要の無い時は 0 のままにしておきます。

次の(A)または(B)ごとく入力すれば 7.6 の 2) の Order 1 の場合と同じ効果が得られます。

(A)			(B)		
DATA	UNIT	VALUE	DATA	UNIT	VALUE
Gain		1	Gain		0
N0		1	N0		1
N1		0	N1		0
N2		0	N2		0
N3		0	N3		0
N4		0	N4		0
N5		0	N5		0
N6		0	N6		0
N7		0	N7		0
D0		1	D0		1
D1		0.01	D1		0.01
D2		0	D2		0
D3		0	D3		0
D4		0	D4		0
D5		0	D5		0
D6		0	D6		0
D7		0	D7		0
Fix_Lo		0	Fix_Lo		0
Fix_Hi		0	Fix_Hi		0

Fig. 7.6-10 伝達関数 General を一次遅れ伝達関数として
使う場合のデータ入力

5) 伝達関数効果の確認

3) 項で述べた Order 1 のアイコンに入力した伝達関数と General アイコンに入力した A または B の伝達関数が等しくなることは次のようにすれば確認できます。

添付の tacsgen_model_with_inicon.acp を別名の適当な名前で作成して使いましょう。
別名で作成したファイル、たとえば Transfer_function.acp に対し Fig.7.6-11 の赤の点線部の

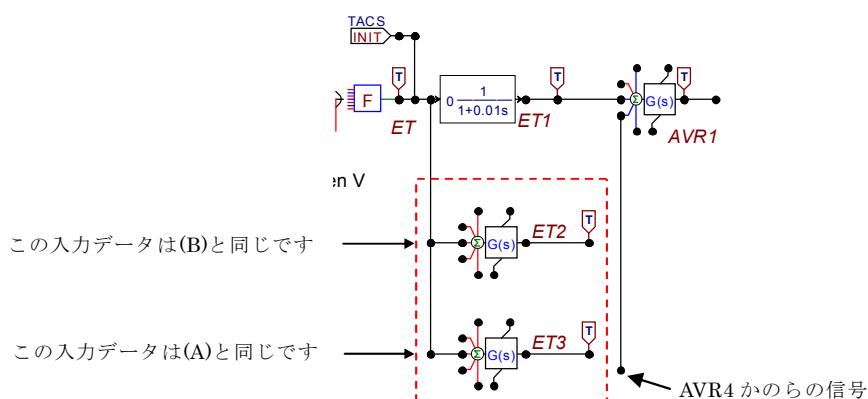


Fig.7.6-11 伝達関数効果の確認

ごとく、Fig.7.6-10 の(A)と(B)の内容を持つ伝達関数 G(s)を追加し、その他の部分は手を加えずに計算させれば、Fig.7.6-12 のごとく ET1, ET2, ET3 が求まり同一効果が得られることが

わかります。

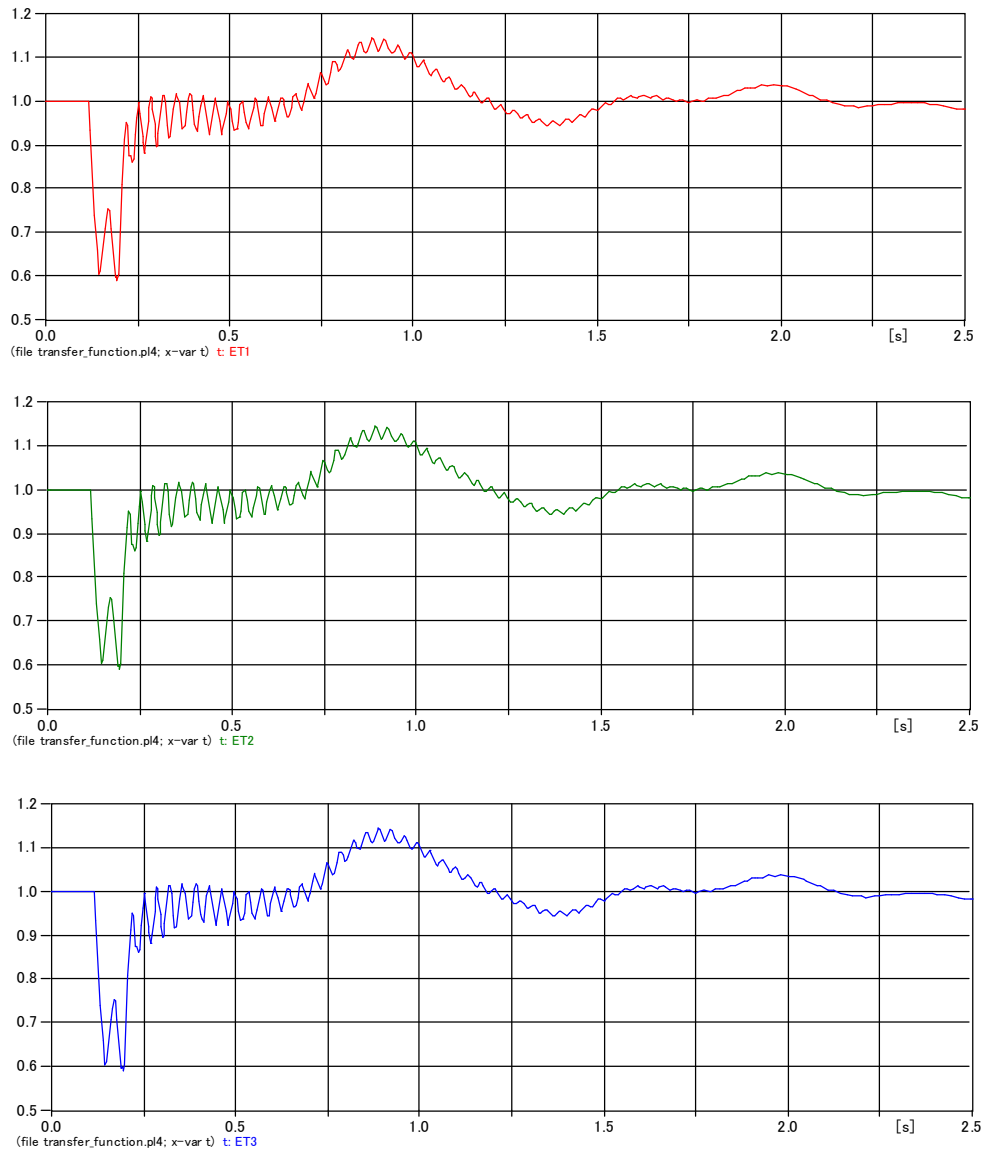


Fig. 7.6-12 ET1, ET2, ET3 の計算結果は同一

7.7 発電機電圧の偏差電圧信号の検出

一次遅れ伝達関数の出力 ET1 は Fig.7.7-1 のごとく、伝達関数 $G(s)$ のブロック図に入力されます。また発電機の基準電圧 $ET0$ もこの伝達関数ブロック図に入力されています。基準電圧 $ET0$ の大きさは定常状態の発電機電圧と同じ大きさにして定常時の偏差電圧信号を 0 にしています。

ET1 は Fig. 7.5-8 と 7.5-9 に示すごとく定常時 1.0 P.U.なので基準電圧 $ET0$ も 1.0 P.U.の大きさにします。

ここで留意したい点は ET1 も $ET0$ の信号も Fig.6-1 の「与えられた励磁制御系ブロック図」に示されている符号にした上で伝達関数 $G(s)$ のブロック図に入力されている点です。

すなわち ET1 信号は $G(s)$ の伝達関数ブロック図にマイナス符号で入力され、 $ET0$ 信号はプラス符号で $G(s)$ に入力されるように指定しています。

この指定は下図に示すごとく、伝達関数 $G(s)$ のこれらの信号が接続される端子を右クリックして Positive または Negative の符号を選択することで行います。

このように指定することで発電機電圧 $ET1$ (P.U.値)が 1.0 P.U.よりずれると基準の発電機電圧 $ET0$ (P.U.値)との偏差電圧信号が得られ、この偏差電圧信号が伝達関数ブロック図 $G(s)$ に入るようになります。

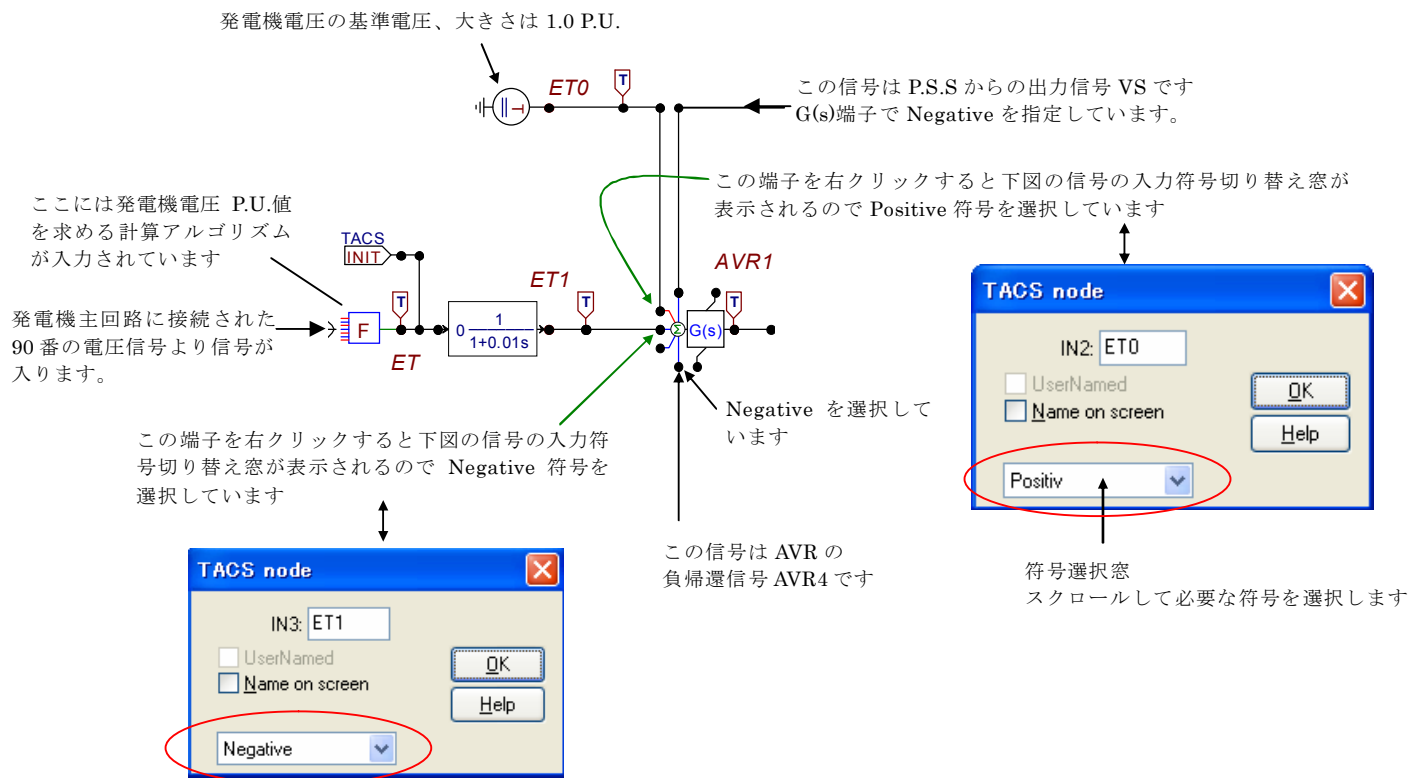


Fig. 7.7-1 偏差電圧信号の検出方法

Fig.7.7-1 に示すとおり、伝達関数 $G(s)$ にはこの偏差電圧信号の他に、PSS の出力信号 VS と負帰還信号 AVR4 も入力されます。このこれらは Fig.6-1 与えられた励磁制御系ブロック図のとおりの内容です。

次に Fig.7.7-1 に示されている発電機基準電圧 $ET0$ に使われているアイコンについて説明します。

7.8 ノード ET0 の発電機基準電圧用アイコン

1) 呼び出し方法

フローディングメニューより次のように選択して呼び出します。

DC-11 の名前から推測できるようにこれは時間と共に大きさが変化しない TACS の直流の信号源です。

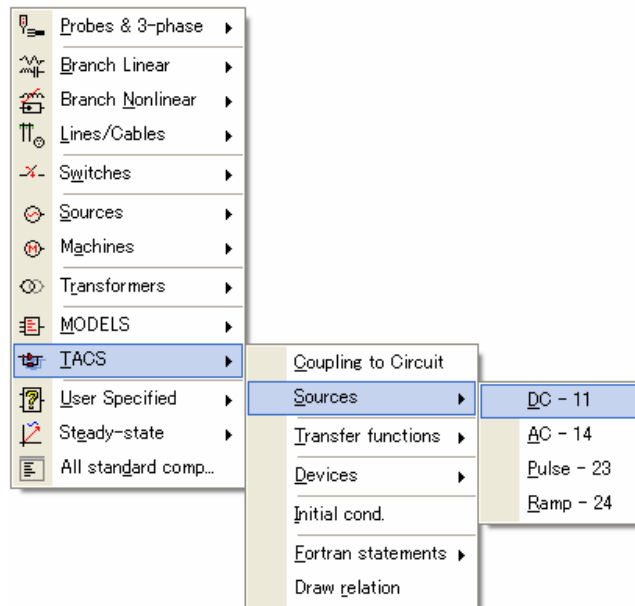


Fig. 7.8-1 発電機基準電圧アイコンの呼び出し方法

2) 発電機基準電圧アイコンへの入力データ

DC-11 のアイコンを右クリックして入力窓を開き、Ampl(振幅値) は定常時の発電機電圧と同じ大きさの値を入力します。

このようにするのは定常状態で偏差信号を 0 にするためです。

この例では発電機電圧は定常時 1.0(P.U.)ですから発電機基準電圧も 1.0(P.U.)と入力します (単位: P.U.)

DATA	UNIT	VALUE
Ampl.		1
T_start	s	-1
T_stop	s	1000

Fig. 7.8-2 発電機基準電圧アイコンへの入力データ

7.9 ノード AVR1 の伝達関数 G(s)

この G(s)は Fig.6-1 で $\frac{100}{1+0.02s}$ と表示されている伝達関数です。

この伝達関数 G(s)には発電機偏差電圧信号(=ET0-ET1)の他に PSS 出力信号 VS(負符号) と AVR 負帰還信号 AVR4 (負符号)も付き合わされ、それらの信号の代数演算結果がこの G(s)に 入力され、出力 AVR1 を出しています。

これらの各入力信号の符号は各々の信号が接続される G(s)の端子を右クリックして、Positive または Negative の符号を選択します。

Fig.7.9-1 は代表して ET1 の信号が接続される G(s)の端子をクリックした状態を示します。 この符号の選択により ET1 は負符号で G(s)に取り込まれる指定になります。

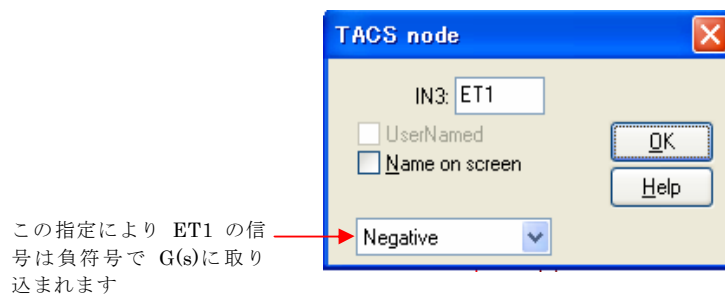


Fig.7.9-1 入力信号の符号の決定方法

ET1, ET0, VS, AVR4 の入力信号の符号は Fig.6-1 の与えられた励磁制御系ブロック図どおりになるように選択します。

1) 伝達関数 G(s)の呼び出し方法

7.6 の 1)と 4)で述べたとおりです。

2) 伝達関数 G(s)への入力データ

Fig.6-1 の与えられた励磁制御系ブロック図の伝達関数 $\frac{100}{1+0.02s}$ になるように G(s)のアイコンを右クリックして Fig.7.9-2 のように入力します。

TACS: TRANSF

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Gain		0
N0		100
N1		0
N2		0
N3		0
N4		0
N5		0
N6		0

NODE	PHASE	NAME
OUT	1	AVR1
IN1	1	VS
IN2	1	ET0
IN3	1	ET1
IN4	1	AVR4
IN5	1	XX0027
Name_L	1	XX0028
Name_H	1	XX0029

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Transfer function

$G(s) = \frac{100}{1+0.02s}$

Hide

Edit definitions OK Cancel Help

ここには $G(s)$ の各端子がどの信号(ノード)に接続されているか表示されます(atp を計算させた後で表示されます。データ入力段階では表示されません)

下図は入力窓を左図の位置からスクロールした状態を示します

N7		0
D0		1
D1		0.02
D2		0
D3		0
D4		0
D5		0
D6		0
D7		0
Fix_Lo		0
Fix_Hi		0

データ入力後この窓を閉じ、再び開くとここに入力した内容が伝達関数の形で表示されます。

Fig. 7.9-2 ノード AVR1 の $G(s)$ への入力データ

さて、出力 AVR1 は Fig. 7.2-1 のごとく更に伝達関数群を通して演算されて行きますが、この $G(s)$ に PSS からの信号 VS が入ってきているので一度ここで終わりにし、次に PSS 系について説明します。

その後再びノード AVR1 に戻り残りの説明を続けます。

7.10 PSS 系の説明

Fig. 6-1 の「与えられた励磁制御系ブロック図」では PSS 部分は PG と PG0 の信号の突合せて有効電力の偏差信号の検出するところから始まっています。

PG は発電機の有効電力の P.U. 値、PG0 は基準電力の P.U. 値です。PG0 の大きさは定常状態の発電機の有効電力と同じ大きさにして定常時の偏差信号を 0 にするように決めます。

PSS に関する最初の作業は PG(P.U.) と PG0(P.U.) を求めることから始まります。

これらの P.U. 値は直接電気回路から得られないので TACS を用いて算出します。

1) 発電機有効電力 “PG(P.U.) 値” の演算

発電機有効電力の瞬時値(三相電力) p は各相相電圧の瞬時値を v_a, v_b, v_c (V)、各相電流の瞬時値を i_a, i_b, i_c (A) とすれば、

$$p = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \quad (\text{W})$$

として求められます。

これらの電圧、電流信号は既に 90 番と 91 番の信号源で TACS に取り込むようにしているのでこれらの電圧、電流を使って p を計算できます。

p を計算するには 7.4 項の電圧の取り込みと同じく各相電流も TACS 系へ取り込む必要があります。この電流の取り込みは Fig.7.4-1 の 91 番の電流信号源で取り込んでいます。

これにより取り込まれる各相電流の名前は Splitter が分岐する点のノード名が GENS なので向かって右端の相から左端の相にかけて GENSA, GENSB, GENSC の名前になります。(電圧の取り込みでは 90 番の信号源を付けたノード名は GEN でした。今度の電流取り込み用の信号源 91 が取り付けられているノード名は GENS です)

この 91 番の信号源の呼び出し方法は 7.4 項の 90 番の電圧信号源と同じで、Type の箇所を 91 に書きすれば電流信号源になります。

この信号源の入力データは Fig.7.10-1 の内容にしています。

DATA	UNIT	VALUE
Type		91
T_sta		-1
T_sto		1000

NODE	PHASE	NAME
Probe	A	GENS

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig.7.10-1 電流信号源へのデータ入力

PG (P.U.)は発電機が定常状態で運転中の出力(W)を定格出力、定格力率で運転している時の三相有効電力出力 $892.4\text{MVA} \times 0.9 \text{ pf} = 803.16 \text{ MW}$ で除して P.U.化した値です。

したがって PG (P.U.)は次式で計算できます。

$$\text{PG (P.U.)} = p / (803.16 \times 10^6) = (v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c) / (803.16 \times 10^6) \quad (7.10-1)$$

ここで各相の電圧、電流の瞬時値と検出された TACS 信号との対応は $v_a \leftrightarrow \text{GENA}$, $v_b \leftrightarrow \text{GENB}$, $v_c \leftrightarrow \text{GENC}$, $i_a \leftrightarrow \text{GENSA}$, $i_b \leftrightarrow \text{GENSB}$, $i_c \leftrightarrow \text{GENSC}$ ですから (7.10-1)式は次の Fortran statement になります。

$$\text{PG(P.U.)} = (\text{GENA} \cdot \text{GENSA} + \text{GENB} \cdot \text{GENSB} + \text{GENC} \cdot \text{GENSC}) / (803.16 \times 10^6) \quad (7.10-2)$$

7.5 の 2)の発電機電圧 “ET” の場合と同じく、TACS の Fortran statement のアイコンを呼び出し、(7.10-2)の数式を Fig.7.10-2 のように入力すれば TACS で PG (P.U.) を計算できます。

TACS: FORTRAN1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Type	Use 98	98

NODE	PHASE	NAME
OUT	1	PG

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

FORTRAN

OUT= (GENA*GENSA+GENB*GENSB+GENC*GENSC)/803.16E6

Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig.7.10-2 発電機出力の P.U.値計算アルゴリズム

この演算結果の P.U.値は信号 PG となって Fortran statement から、Fig.7.10-3 のように次のブロック G(s)に入力されます。

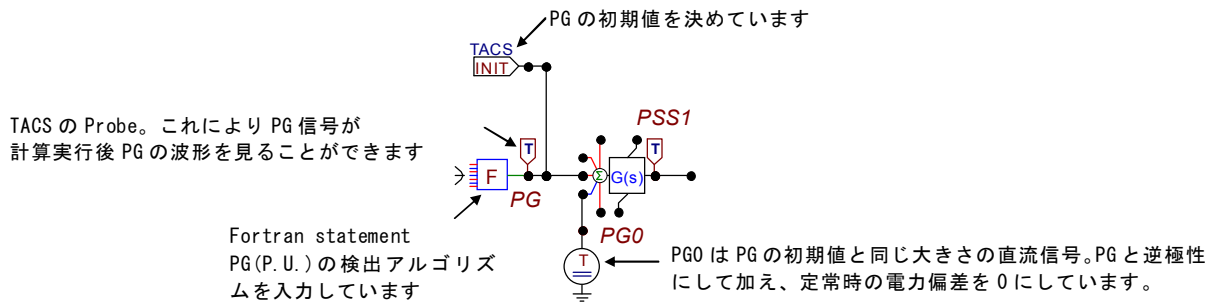


Fig.7.10-3 ノード PG, PG0 部分の説明

ノード PG に接続されている初期値アイコン の説明は次のとおりです。

2) PG(P.U.)の初期値

7.5 項 3)と同じ理由で初期値指定をします。

PG(P.U.値)は突発短絡発生前の発電機有効電力の定格有効電力に対する P.U.値です。突発短絡発生前の発電機有効電力は第 5.3.2 項の潮流計算結果より、801.55MW であり、一方発電機の定格運転時の有効電力は $892.4\text{MVA} \times 0.9 = 803.16\text{MW}$ ですから PG(P.U.値)は、

$$\text{PG (P.U.)} = 801.55 / 803.16 = 0.998 \text{ (P.U.)} \quad (7.10-3)$$

となります。この初期値を初期値アイコンに Fig.7.10-4 のごとく入力します。

PG の初期値 の入力内容は次の通りです。

0.998

DATA	UNIT	VALUE
Init		0.998

NODE	PHASE	NAME
I_Node	1	

Fig.7.10-4 PG 初期値の入力データ

この初期値指定をする場合と、しない場合の差異を Fig.7.10-5 に示します。
 初期値指定をしない場合 PG(P.U.)は徐々に変化してしまい、三相短絡発生直前には 0.961 P.U. になっていて 0.998P.U.になっていません。したがって正計算結果はしくありません。
 初期値指定をした場合は 0.998 P.U.で意図した状態になっています。
 初期値指定の重要性がわかります。

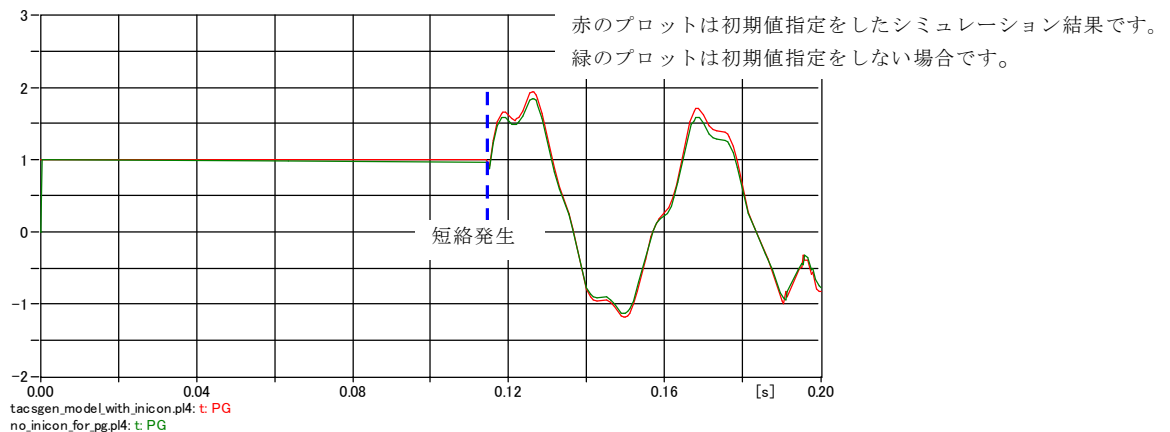


Fig. 7.10-5 初期値指定をする場合としない場合の差異

3) ノード PG0 の発電機基準電力用アイコンについて

これは 7.8 項の発電機基準電圧用アイコンで使ったものと同じです。
 この基準電力用の直流信号源の振幅値(Ampl)は定常状態で発電機有効電力とつぎ合わせた時、偏差信号が 0 になるように発電機の定常状態出力値の 0.988(P.U.)を入力します。

TACS: DC_01

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Ampl.		0.998
T_start	\$	-1
T_stop	\$	1000

NODE	PHASE	NAME
SOURCE	1	PG0

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig. 7.10-6 PG0 への入力データ

4) 発電機有効電力の偏差信号

PG0、PG の信号は伝達関数 $G(s)$ へ導かれ、Fig. 7.10-7 に示すごとく、与えられた励磁制御ブロック図に従い、 $G(s)$ の端子で PG の符号は+、PG0 信号の符号は-を指定しています。このため伝達関数 $G(s)$ へは PG と PG0 の偏差信号が入力されます。

定常状態では $PG = 0.998 \text{ P.U.}$ 、 $PG0 = 0.998 \text{ P.U.}$ ですから発電機電力の偏差信号は 0 であり、この 0 信号が後続の PSS の伝達関数群に伝えられるため定常状態では PSS の出力信号 VS の値は 0 になります。

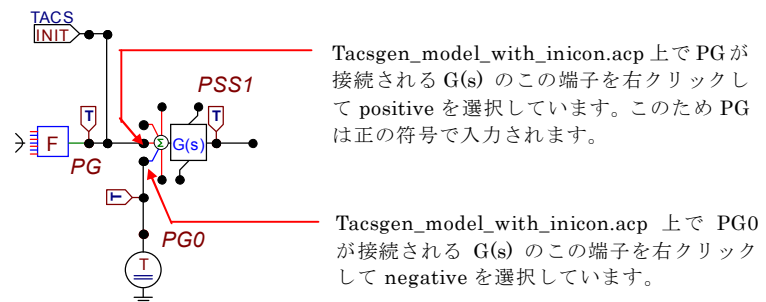


Fig. 7.10-7 発電機電力の偏差信号の作成

5) ノード PSS1 の伝達関数 $G(s)$

この伝達関数 $G(s)$ は 7.6 の 4) で説明したアイコンと同じものです。

入力データは 6 項 与えられた励磁系制御ブロック図のこの部分の伝達関数 $\frac{1}{1+0.04s}$ と等しくなるように次図のとおり入力しています。

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Gain		0
N0		1
N1		0
N2		0
N3		0
N4		0
N5		0
N6		0

NODE	PHASE	NAME
OUT	1	PSS1
IN1	1	××0014
IN2	1	××0015
IN3	1	PG
IN4	1	PG0
IN5	1	××0016
Name_L	1	××0017
Name_H	1	××0018

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Transfer function

$G(s) = \frac{1}{1+0.04s}$

データ入力後 OK ボタンを押し入力窓を一度閉じ、再び開くと入力した伝達関数が表示されます

Edit definitions OK Cancel Help

下図は N7 以降の入力内容です。

N7	0
D0	1
D1	0.04
D2	0
D3	0
D4	0
D5	0
D6	0
D7	0
Fix_Lo	0
Fix_Hi	0

Fig. 7.10-8 ノード PSS1 の $G(s)$ への入力データ

6) ノード PSS1 から VS までの伝達関数群

Fig. 7.2-1 に示すこれらの伝達関数群は 6.項の与えられた励磁系制御ブロック図どおりの内容にしています。

これらの伝達関数は ATPDraw のフローティングメニューから

TACS→Transfer functions→Order 1 で呼び出して使用しています。

Order 1 の伝達関数のデータ入力方法は 7.6 項の 2) Order 1 へのデータ入力方法で説明したとおりです。

以下にこれらの伝達関数群の入力データを示します。

6-1) ノード PSS1 と PSS2 間の伝達関数の入力データ

下図のごとく入力し、入力窓の最後の項目 **Dynamic icon** を 1 にして OK ボタンを押せば

Order1 のアイコンは Fig.7.2-1 に示すごとく $\bullet \begin{matrix} 0 & 0.5s \\ & 1+0.5s \end{matrix} \bullet$ のアイコンになります。

以降の出力信号 VS までの Order1 の PSS 伝達関数群についても同じなので説明は省略し入力データのみを次に示します。

DATA	UNIT	VALUE
Gain		0
N0		0
N1	s	0.5
D0		1
D1	s	0.5
Fixed_Hi	0=off	0
Fixed_Lo	0=off	0
NamedHiOn	0/1, 0=off	0
NamedLoOn	0/1, 0=off	0

NODE	PHASE	NAME
IN	1	PSS1
OUT	1	PSS2

Buttons: Copy, Paste, entire data grid, Reset, Order: 0, Label: , Comment: , Hide (checkbox), Edit definitions, OK, Cancel, Help

左図の NamedHiOn の下の部分は次のようになっています

NamedLoOn	0/1, 0=off	0
Dynamic icon	0/1, 0=off	1

Fig.6.11-9 ノード PSS1 と PSS2 間の伝達関数の入力データ

6-2) ノード PSS2 と PSS3 間の伝達関数の入力データ

TACS: TRANSF1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Gain		0
N0		1
N1	s	0
D0		1
D1	s	0.025
Fixed_Hi	0=off	0
Fixed_Lo	0=off	0
NamedHiOn	0/1, 0=off	0

NODE	PHASE	NAME
IN	1	PSS2
OUT	1	PSS3

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

左図の NamedHiOn の下の部分は次のようになっています

NamedLoOn	0/1, 0=off	0
Dynamic icon	0/1, 0=off	1

Fig.6.11-10 ノード PSS2 と PSS3 間の伝達関数の入力データ

6-3) ノード PSS3 と VS 間の伝達関数の入力データ

TACS: TRANSF1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Gain		0.5
N0		1
N1	s	0
D0		1
D1	s	0
Fixed_Hi	0=off	0.1
Fixed_Lo	0=off	-0.1
NamedHiOn	0/1, 0=off	0

NODE	PHASE	NAME
IN	1	PSS3
OUT	1	VS

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

左図の NamedHiOn の下の部分は次のようになっています

NamedLoOn	0/1, 0=off	0
Dynamic icon	0/1, 0=off	1

Fig.6.11-11 ノード PSS3 と VS 間の伝達関数の入力データ

この伝達関数の出力信号 VS は Fig. 7.2-1 に示すごとく ノード ET1 と AVR1 間の伝達関数 G(s) へ接続します。

これで PSS 関係の入力が完了したので 6.10 項で説明を中断した AVR 系に戻り、以下に説明を続けます。

7.11 ノード AVR1 と AVR2 間の伝達関数

この伝達関数は入力信号を AVR1 とし、出力信号 AVR2 を出す伝達関数です。Fig. 7.11-2 をご参照ください。

この伝達関数の入力データは Fig.7.11-2 の与えられた伝達関数 $\frac{1}{1+0.04s}$ になるように次のごとく入力しています。

DATA	UNIT	VALUE
Gain		0
N0		1
N1	s	0
D0		1
D1	s	0.04
Fixed_Hi	0=off	0
Fixed_Lo	0=off	0
NamedHiOn	0/1, 0=off	0

NODE	PHASE	NAME
IN	1	AVR1
OUT	1	AVR2

Buttons: Copy, Paste, entire data grid, Reset, Order: 0, Label: , Comment: , Hide checkbox.

左図の NamedHiOn 以下の入力内容です。

↓

NamedLoOn	0/1, 0=off	0
Dynamic icon	0/1, 0=off	1

Fig.7.11-1 ノード AVR1 と AVR2 間の伝達関数の入力データ

この伝達関数の出力信号 AVR2 は Fig.7.11-2 に示すごとく、ノード AVR2 の伝達関数 G(s) に接続されます。信号 AVR2 が接続される G(s)の接続端子の符号は Fig. 6-1 の与えられた励磁制御ブロック図どおり Positive を選択します。

a. 発電機電圧の定常状態の偏差信号は 7.7 項より 0 P.U.です

b. PSS 偏差信号 VS は 定常状態では 7.10 の 4) より 0 P.U.です

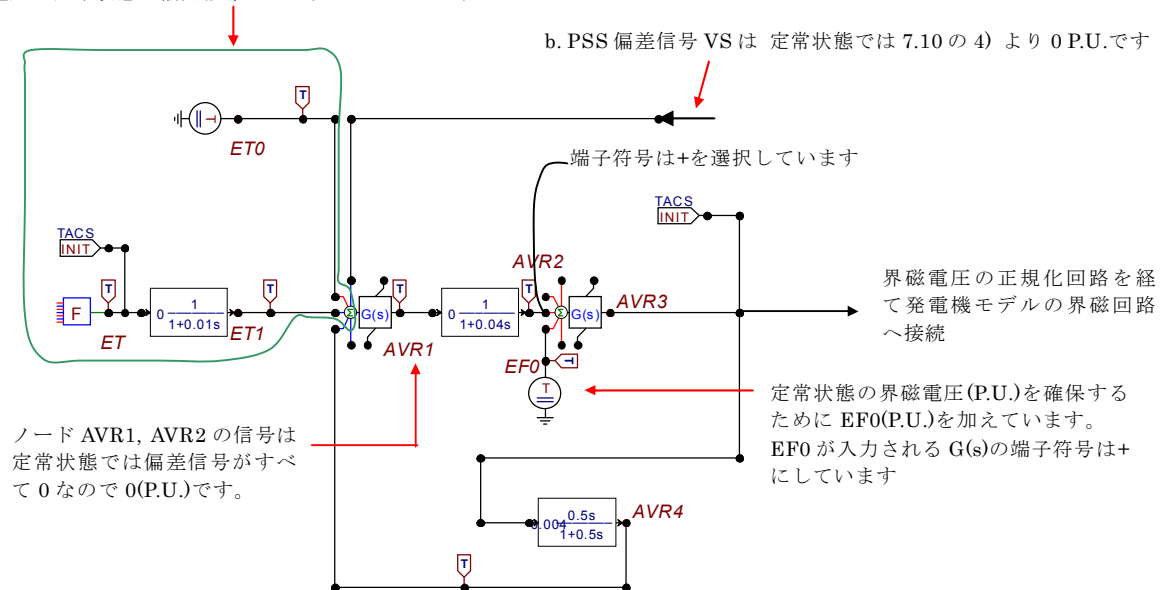


Fig.7.11-2 各種偏差信号、信号 AVR2、EF0 の接続に関する説明

7.12 直流信号源 EF0(P.U.)を定常状態の界磁電圧として追加する

上図の a, b より定常状態で AVR1, AVR2 の信号は 0 になります。 AVR3 の信号の信号は発電機の界磁電圧になる信号ですから 0 のままではまずいので、定常状態の界磁電圧を確保するため上図のごとく定常状態の界磁電圧(P.U.)に等しい信号 EF0 (P.U.)を追加します。この信号は与えられた励磁制御ブロック図にしたがい G(s)へ+信号で接続しています。この EF0 の信号をルールブックが言っているようにスケーリングして使用することになります(Ref. ルールブック Rb-080-LEC の VIII-A General description)。

1) EF0(P.U.)を求める式

EF0 は次の(7.12-1)式から求めます。

EF0(P.U.)の分母の界磁電圧値には発電機が無負荷で定格電圧時の界磁電圧 EFD_0 (V)を取ります。分子は 2.項 シミュレーション条件の潮流時の界磁電圧 EFD_ℓ (V)です。

$$EF0(P.U.) = \frac{EFD_\ell}{EFD_0} \quad (7.12-1)$$

このように EF0(P.U.)を決定するには EFD_0 (V)と EFD_ℓ (V)が必要なので次にこれらを求める方法を説明します。

2) 発電機の無負荷界磁電圧 EFD_0 を求める方法

EFD_0 (V)は発電機を無負荷、定格電圧にして ATP で計算させ、計算後生成される .lis ファイル中に表示される MACH 1 の EFD の値(磁電圧の値)が EFD_0 になります。

発電機を無負荷状態で ATP を計算させるには Fig. 7.12-1 の回路を作って計算させます。

Fig. 7.12-1 の回路終端の抵抗は次の理由で設けています。

理由：回路が大地から浮いていると ATP はエラーになるので、無負荷状態になるように極めて大きな絶縁抵抗を入れて接地します。Fig. 7.12-1 では $1 \cdot 10^{20} (\Omega)$ の抵抗にしています。

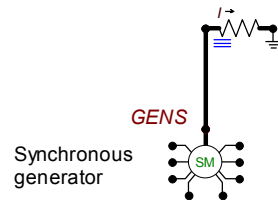


Fig. 7.12-1 無負荷界磁電圧 E_{FD0} を調査するための回路

Fig. 7.12-1 の回路図を作成する際、発電機アイコンは Tacsgen_model_with_inicon.acp のデータを入力済みの発電機アイコンをコピーして無負荷状態の回路に貼り付けるとデータ入力の手間が省けます。

この時貼り付けた発電機アイコンの EFD が接続されていた TACS 用の端子は右クリックし Field voltage. In から No control に変更しておきます。この作業をしないとエラーになります。これは TACS 入力として発電機界磁電圧が入るとしながら界磁電圧信号を接続していないためです。

発電機の TACS 信号用端子を Field voltage. In から No control に変更する方法は Fig.7.12-2 を参照ください。

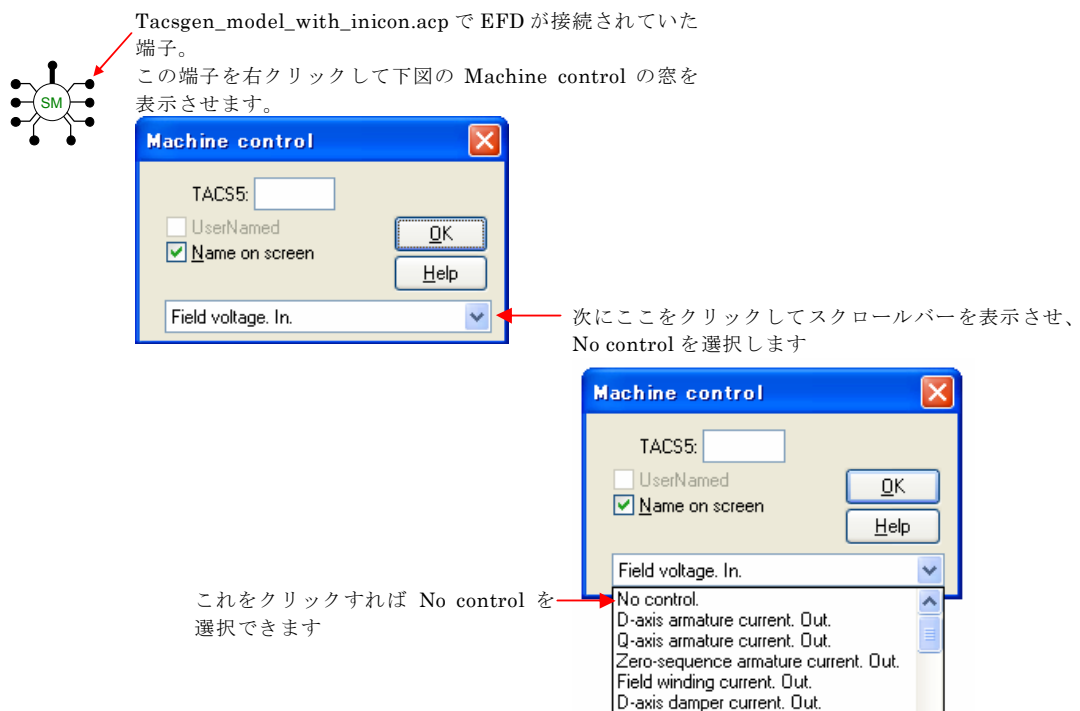


Fig.7.12-2 発電機アイコンの TACS 端子を No control にする方法

以上の準備をした上で、Fig.7.12-1 の回路図に適当なファイル名を付けます。たとえば `tacsgen_model_no_load.acp` と名付けます。

この ATP ファイルを計算させれば界磁電圧は `tacsgen_model_no_load.lis` の中に MACH 1 EFD として表示されます。(MACH 1 の 1 は発電機が複数台存在するときは当該発電機の番号になります。)

この MACH 1 EFD の値は Time step roop の計算結果の所に表示されます。

`tacsgen_model_no_load.lis` の Time step roop 部のコピーを Fig. 7.12-3 に示します。

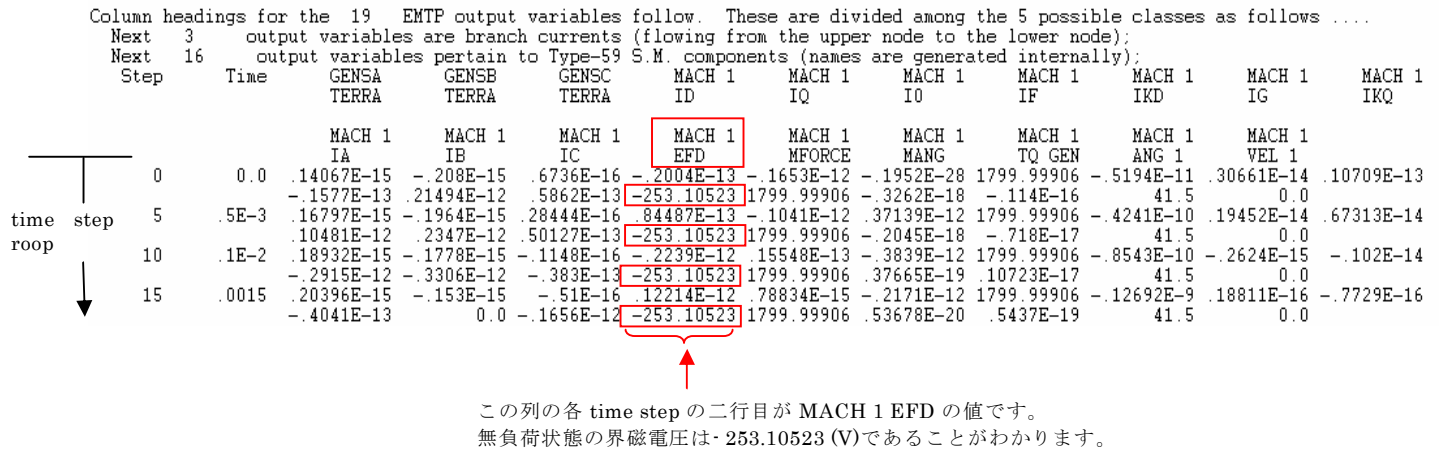


Fig. 7.12-3 無負荷時の界磁電圧 EFD

このように発電機界磁電圧は負符号が付けられて出力されますが、符号は基準の取り方だけの話で気にする必要はありません。

3) EFD_e を求める方法

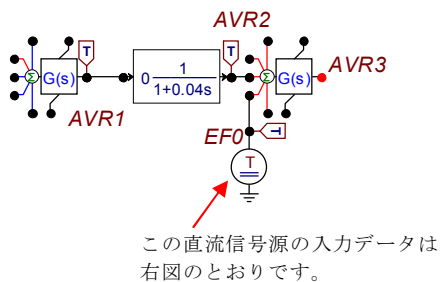
次に本シミュレーションの定常負荷状態での界磁電圧 EFD_e を求めます。このために

`Tacsgen_model_with_inicon.acp` を計算させ、EFD₀ と同じく `Tacsgen_model_with_inicon.lis` の time step roop のところから定常状態の MACH 1 EFD の値を読み取ります。

`Tacsgen_model_with_inicon.acp` については完成させる前に未だ解説すべき内容がありますがそれらは引き続き説明することとし、完成版を計算させた結果の

`Tacsgen_model_with_inicon.lis` ファイルの Time step roop 部の冒頭部分のコピーを Fig.7.12-4 に示します。

5) EF0 用直流信号源アイコンへの入力データ



TACS: DC_01

Attributes 2.322

DATA	UNIT	VALUE
Ampl.		2.322
T_start	s	-1
T_stop	s	1000

NODE	PHASE	NAME
SOURCE	1	EF0

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fig. 7.12-5 EF0 用直流信号源の入力データ

この EF0 を挿入したことにより定常運転状態で電圧と電力の偏差信号が 0 であっても定常状態時の 2.322P.U.の界磁電圧が確保されることになります(ノード AVR2 と AVR3 間の伝達関数 $G(S)$ のゲインは 1.0 です)。

界磁電圧に関する作業は実はこれで終わりではなく、更に後述の 7.14 項の作業をする必要があります。

7.14 項の作業は ATP の Rule book で要求されている作業で(Ref. Rb-080-LEC, VIII-A General description)、励磁系の正規化作業又は初期化作業と呼ばれるものです。この作業をしないと正しいシミュレーションができません。もう一息で終わりになるのでがんばりましょう。

7.13 ノード AVR3 の伝達関数 G(s)

与えられた励磁制御ブロック図 Fig. 6-1 からこの伝達関数は $\frac{1}{s}$ で高値リミットは 7.0、低値リミットは 0.0 です。この伝達関数になるように次のごとく入力します。

DATA	UNIT	VALUE
Gain		0
N0		1
N1		0
N2		0
N3		0
N4		0
N5		0
N6		0
N7		0
D0		1
D1		0
D2		0
D3		0
D4		0
D5		0
D6		0

D7		0
Fix_Lo		0
Fix_Hi		7

Fig. 7.13-1 ノード AVR3 の伝達関数 G(s) の入力データ

7.14 励磁系の正規化作業

TACS で記述した励磁制御系の界磁電圧信号 EF0(P.U.)を Type59 又は Type 58 同期発電機モデルに与える際、以下に述べる極めて重要な留意点があります。この点を考慮しないと、与えられた励磁系伝達関数ブロック図どおりに TACS で記述しても正しいシミュレーションができません。

ATP の Rule book で発電機の界磁電圧を TACS で制御をする場合、TACS から発電機モデルに渡す界磁電圧信号は定常運転状態の界磁電圧をスケーリングして使うため、正規化した値 (normalized multiplicative variable)にしなければならないと定められています。

(JAUG のパスワード保護サーバ内の Rule book-80-LEC.PDF の Section VIII-A で要求されています。1 ページ目の最終段落部の記述がその記述です。TACS でガバナ系を模擬する場合も同じく正規化した値で同期発電機モデルに渡さなければならないことも記載されています。2 ページ目上から四つ目の段落部分)。

この理由により本例の TACS の界磁電圧信号 EF0(無負荷界磁電圧に対する定常負荷状態の界磁電圧の P.U.値 = 2.322 P.U.)は正規化して発電機モデルに渡す必要があります。

正規化とは次の意味です。

定常状態の界磁電圧に対する偏差を表すために 2.322 P.U.を 2.322P.U.で除した相対値を用いることを 2.322P.U.で正規化すると言います。したがって正規化した TACS の界磁電圧信号は 1.0 で発電機モデルに渡ります。

TACS の界磁電圧信号 EF0 = 2.322 P.U.を正規化して(=1.0P.U.にして)して発電機モデルに渡す必要があるのでノード AVR3 と EFD 間の Fortran statement で正規化するための演算 “AVR3/2.322” をしています。この工夫により定常状態の TACS の界磁電圧信号は正規化され、1.0 P.U.で発電機モデルに渡っています。

この正規化をしているノード AVR3 と EFD 間の Fortran statement は 6.項の「与えられた励

磁制御ブロック図」の K の部分になります。

この正規化するための演算部分は入手した励磁系制御ブロックに書かれていないもので、励磁系を模擬する際、ATP ユーザが設けなければならない部分です。

この点は TACS による励磁制御系で一番意外な点であろうかと思います。

7.15 フィードバック回路

ノード AVR3 と AVR4 の間のフィードバック回路の与えられた伝達関数は $\frac{0.004 \times 0.5s}{1 + 0.5s}$

です。この伝達関数を得るため ATPDraw の Order1 の伝達関数を使い次のごとく入力します。

DATA	UNIT	VALUE
Gain		0.004
N0		0
N1	s	0.5
D0		1
D1	s	0.5
Fixed_Hi	0=off	0
Fixed_Lo	0=off	0
NamedHiOn	0/1, 0=off	0
NamedLoOn	0/1, 0=off	0
Dynamic icon	0/1, 0=off	1

Fig.7.15-1 ノード AVR3 と AVR4 間の伝達関数の入力データ

尚、この伝達関数の接続については 7.3 項で記述したように入力信号 AVR3 はブロックの左側端子に、出力信号 EFD はブロックの右側に接続します。Fig. 7.3-2 の接続にならないようにご注意ください。

7.16 EFD を発電機モデルに渡す

正規化した TACS の界磁電圧 EFD は Fig. 7.2-1 のごとく発電機モデルに接続します。

発電機モデルから出ている八本の内の任意の TACS 端子に接続できます。

EFD に接続した発電機モデルの TACS 端子は右クリックして Fig.7.16-1 の窓を開き、図のごとく Field voltage In を選択します。

この選択で正規化された EFD が発電機モデルの界磁巻線に接続されたことになります。

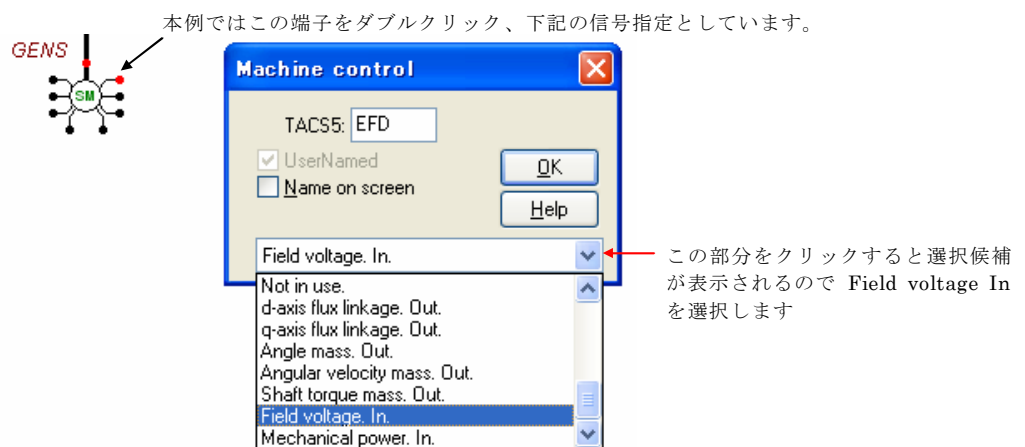


Fig. 7.16-1 TACS の界磁電圧信号を発電機モデルに取り込むには
発電機モデルの任意の TACS 端子を右クリックして Field
voltage In を選択する

以上で TACS 系の説明は終わりです。

次は ATP を計算させるための計算条件のセッティングについて説明します。

8. 計算条件の設定

ATPDraw のメニューバーで ATP→Settings のタグのところでセットしている内容について説明します。

8.1 Simulation タグへの入力データ

Fig. 8.1-1 に示すとおりにしています。

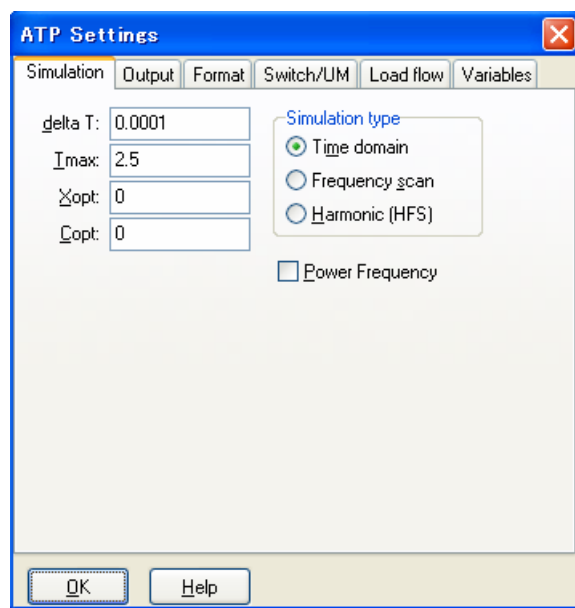


Fig.8.1-1 Simulation タグへの入力データ

XOPT=0 又は XOPT 欄をブランクとした時はインダクタンス値を mH の値で入力します。
XOPT>0 の時、インダクタンスの値は XOPT に入力した周波数におけるオーム値で入力します。

COPT=0 又は COPT 欄をブランクとした時はキャパシタンスは μF の単位で入力します
COPT>0 の時、キャパシタンスの値は COPT に入力した周波数における μS (マイクロジーメンス)の値で入力します。

$1 (S, \text{ジーメンス}) = 1 (\text{mho}, \text{モー}) = 1/R$ (抵抗 R の逆数)

S(ジーメンス)の単位は SI 単位、mho の単位はかつて使われた単位ですが SI 単位ではありません。

このタグ中にある Power frequency の使い方についてふれておきます。

これは 50Hz 系のシミュレーションにおいてインダクタンス、キャパシタンスをそれぞれオーム値、マイクロジーメンスの単位で入力する時に使います。

50Hz 系のシミュレーションなので各電源の周波数を 50Hz にすると共に、XOPT,COPT に 50 を入力しますがこのままでは .lis ファイルに Warning message が出ます。

この Warning message が出る箇所は下記に示すごとく .lis ファイルの Miscellaneous data card 部に出ます。

POWER FREQUENCY, 50.0, の使用例

下記の入力データでは XOPT, COPT に 0 でなく 50Hz を入力する場合です。この場合は warning message を出さないようにするため、special request card の POWER FREQUENCY 50.0, を入力しなければなりません。

下記例ではこの specialrequest card がコメントカード化されているため warning message が出ています。

Marker card preceding new EMTP data case. | BEGIN NEW DATA CASE
 Comment card. KOMPAR > 0. | C POWER FREQUENCY, 50.0, { Avoid warning message about suspicious XOPT, COP
 Misc. data. 2.000E-04 5.000E-01 5.000E+01 | .000200 .500 50. 50.
 Misc. data. 1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 | 1 1 0 { test } 1 -1

special request card がコメントカード化されています

/// Warning. Nonzero XOPT or COPT differs from the power frequency of 6.00000000E+01 Hz. Did the user really want this?

Printout : 5 5 20 20 100 100 | 5 5 20 20 100 100
 Series R-L-C. 1.000E-01 0.000E+00 0.000E+00 | A1 A2 0.1 1
 Series R-L-C. 1.000E-01 0.000E+00 0.000E+00 | B1 B2 0.1 1
 Series R-L-C. 1.000E-01 0.000E+00 0.000E+00 | C1 C2 0.1 1

C POWER FREQUENCY, 50.0, の C を取ればこのメッセージは出なくなります。

これを防ぐために **Power frequency** にチェックを入れます。するとこのタグ中に **Freq: 50** の項目が追加されます。この状態で ATP を計算すれば、ATP ファイルに **POWER FREQUENCY 50** の項目が追加され、上記の **warning message** は表示されなくなります。
 参照ベンチマーク: DC26 の最初のサブケース

8.2 Output タグへの入力データ

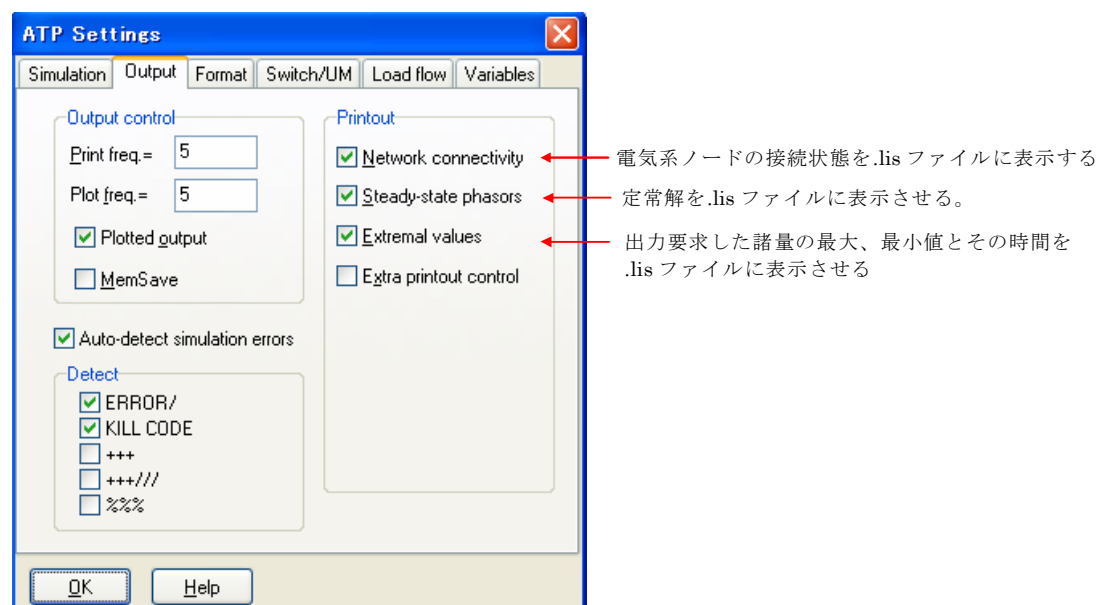


Fig.8.2-1 Output タグへの入力データ

8.3 Format タグへの入力データ

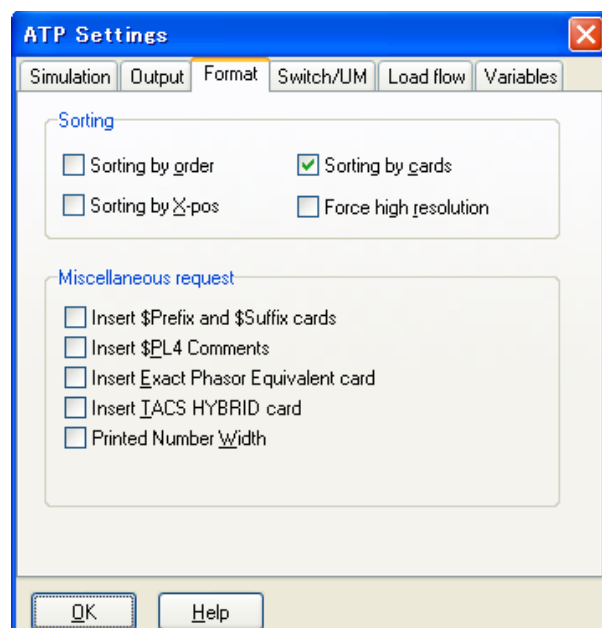


Fig. 8.3-1 Format タグへの入力データ

8.4 その他のタグ

Switch/UM,load flow,Variables のタグがありますがこれらはすべてデフォルトの状態にしています。

9. シミュレーション

1) シミュレーションの実行

ATPDraw で完成させた tacsgen_model_with_inicon.acp を開き、メニューバーから ATP→上から二段目の run ATP をクリックすれば ATP が計算を開始します。

2) 計算結果の Plot 波形表示

ATP の計算結果の Plot 波形表示は次のようにします。(PlotXY を使う場合で説明します)

tacsgen_model_with_inicon.acp を開いた状態で、メニューバーの ATP→下から 7 段目の PlotXY をクリックします。

Plot 候補が表示されるので選択して plot 表示させます。

3) シミュレーションの Plot 波形例

Plot 候補から次の諸量を代表して以下に示します。

発電機 A 相端子電圧

発電機 A 相短絡電流

TACS 信号の発電機有効電力 PG(P.U.)

TACS 信号の発電機に渡される界磁電圧 EFD(P.U.)

発電機 ANG1(度)

Fault switch を流れる短絡電流(KA)の拡大図

その他の諸量は ATPDraw で作成した今回のプロジェクトファイル tacsgen_model_with_inicon.acp を計算させれば見るすることができます。

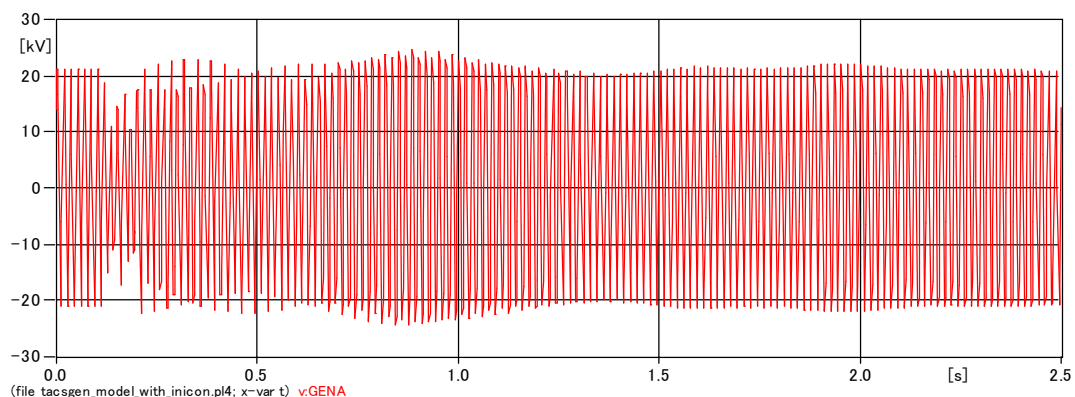


Fig. 9-1 発電機 A 相端子電圧

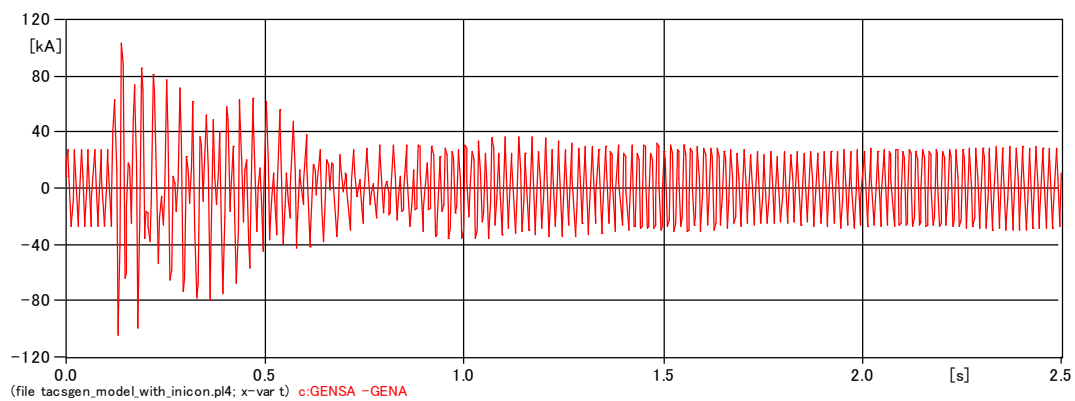


Fig. 9-2 発電機 A 相短絡電流

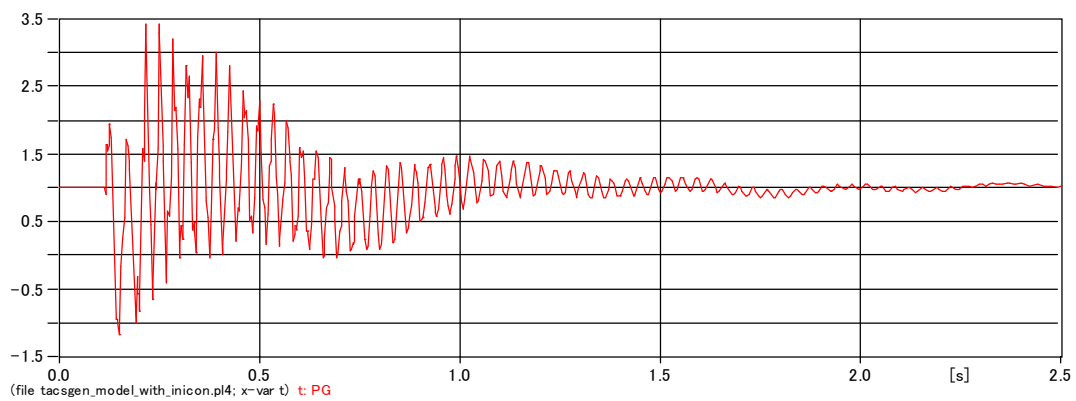


Fig. 9-3 TACS の PG(P.U.)信号

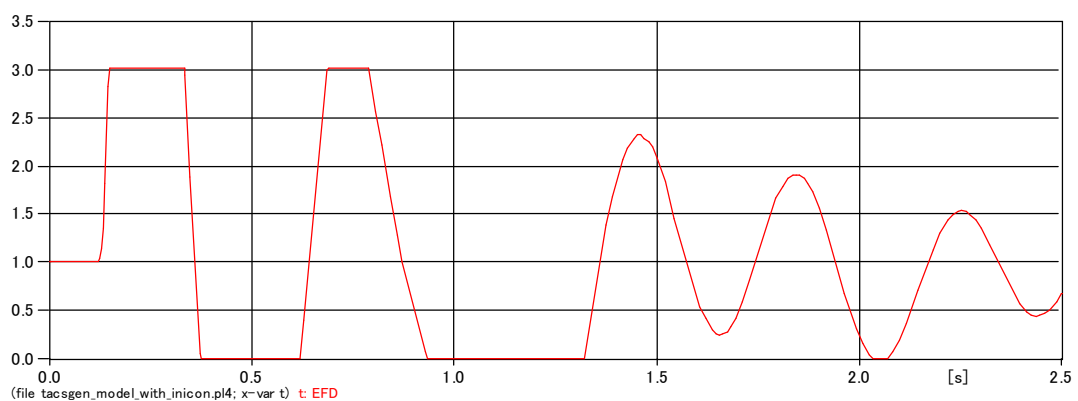


Fig.9-4 TACS 系から最終的に発電機に渡される界磁電圧信号 EFD(P.U.)

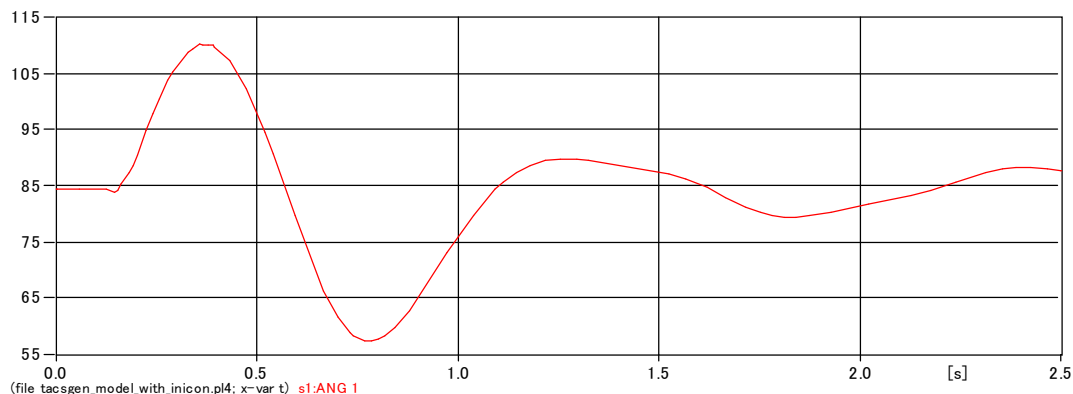


Fig. 9-5 発電機の ANG1 (度)

この ANG1 はロータ磁極の角度を表しており安定度判定に使われます。
もう少し詳しい説明は次項で説明します。

P.S.S だけを除外し、その他の条件は不変として `tacsgen_model_with_inicon.atp` を計算させると ANG1 は Fig. 9-6 のごとく発散するので脱調します。この結果から P.S.S の有効性がわかります。

PSS を除外するには VS 信号の接続を削除します。電気回路ノードマップと異なり TACS では線路を開放状態にしてもエラーになりません。

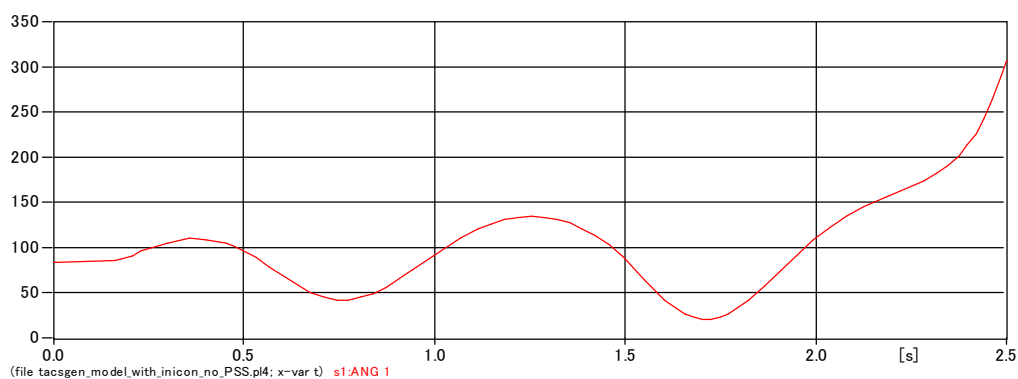


Fig. 9-6 PSS を除外しその他の条件は不変とした時の ANG1

最後は Fault switch を通って流れる短絡電流の拡大図です。短絡事故除去は電流遮断は無しとしているので下図のごとく各相電流の 0 点で遮断されて行きます。

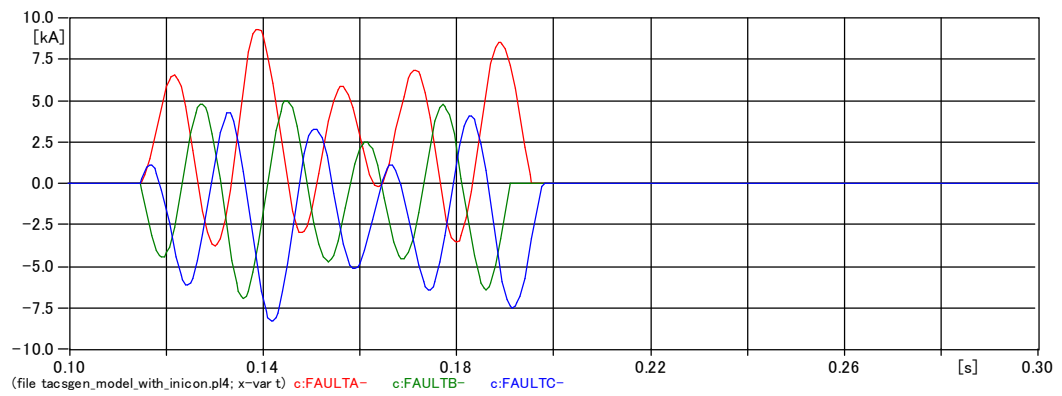


Fig. 9-6A 故障発生 / 除去用スイッチを通過する短絡電流

4) ANG1 の説明

ANGi (i は軸系の質点番号 1, 2, 3・・・)の角度について理解を深めるため次ページ以下に考察してみました。

1 質点系の軸系で 2 極機の発電機の例で考察します。

2 極機では電気角=機械角です。この説明はたとえば ATP(EMTP)の小さな研究室の「回転運動に関するまとめ」の 5 項に記しています。

4-1) 発電機 A 相端子電圧位相 -48.5 度、無負荷状態の ANG1

a. 無負荷状態の ATPDraw の回路図 tacsgen_model_no_load.acp を使い、ANG1 を計算してみます。発電機 A 相端子電圧位相の入力データは -48.5 度としています。この tacsgen_model_no_load.acp を計算させると $ANG1 = +41.5$ 度が得られます。このことは ANG1 の定義から N 極が +41.5 度の位置にあることになります。

この ANG1 の位置と A 相端子電圧位相ベクトル図を描くと Fig. 9-7 になります。

b. 次に無負荷時の A 相端子電圧位相と磁極 N の位置関係から ANG1 を考察してみます。磁極 N の方が A 相端子電圧より 90 度進んだ位置にある関係を利用して 0 度を基準にした時の磁極 N の角度を求めてみると $-48.5 + 90 = 41.5$ 度となり、ATP で計算した ANG1 と一致します。

a. も b も ANG1 は 0 度と N 極間の角度で +41.5 度であることを示しています。

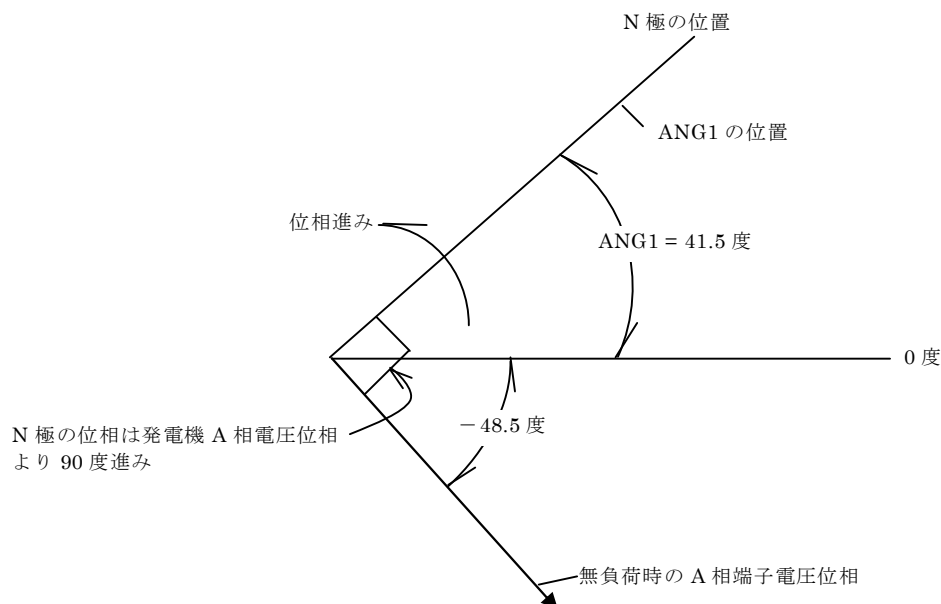


Fig. 9-7 無負荷時の ANG1 と発電機 A 相端子電圧のベクトル

4-2) 発電機 A 相端子電圧位相 0 度、無負荷状態の ANG1

次に無負荷状態で発電機 A 相端子電圧位相を -48.5 度から 0 度に変えた時の ANG1 を調べてみます。

この結果は上記より次のように推測できます。

無負荷の発電機 A 相端子電圧位相は 0 度であるとしたので、N 極位置は 0 度の位置より 90 度進んだ位置になります。

ANG1 は 0 度から N 極までの角度なので ANG1 は 90 度になるはずです。

ATP で発電機位相を 0 度として計算した結果は予想どおり Fig. 9-8 のごとく ANG1 = 90 度となります。

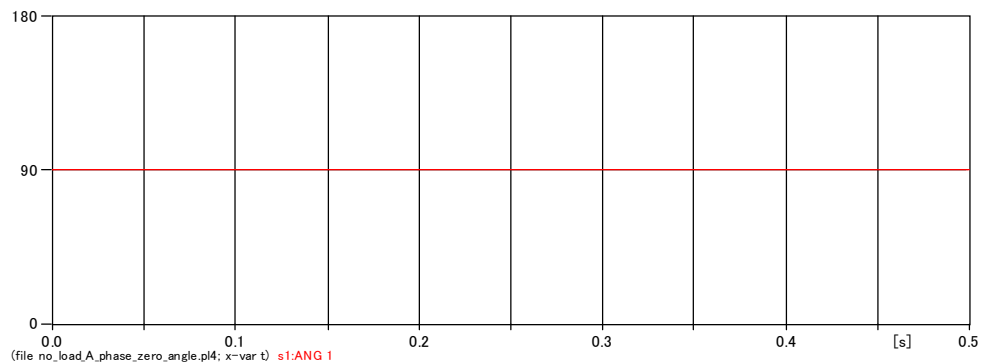


Fig. 9-8 無負荷、A 相端子電圧位相 0 度の時の ANG1

この時の ANG1 と A 相端子電圧ベクトル図は Fig. 9-9 になります。

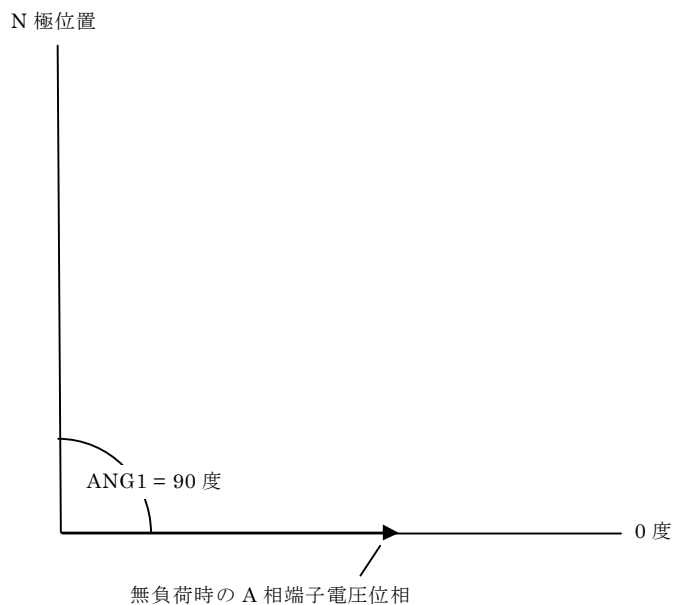


Fig. 9-9 無負荷、A 相端子電圧位相 0 度の時の ANG1

4-3) 潮流状態のベクトル図

さらに一般化して本シミュレーション例で事故発生前の潮流における ANG1 を考えて見ます。

tacsgen_model_with_inicon.atp を計算させて ANG1=84.55 度が得られます。

発電機 A 相端子電圧位相は -48.5 度を入力しています。

A 相端子電圧と ANG1 を図に描くと下図になります。

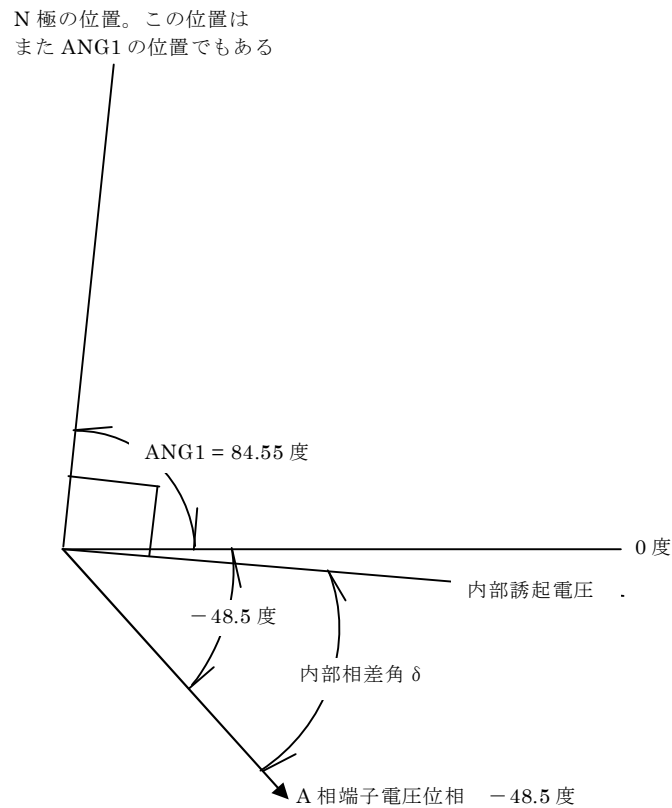


Fig. 9-9 潮流状態の ANG1

4-4) ANG1 についての知見

以上の検討から ANG1 について得られる知見は次のとおりであると考えます。

- ANG1 は 0 度から磁軸 N 極までの角度を表している。
- 定常状態の ANG1 の角度の大きさは 4-1) から 4-3) のごとく発電機電圧位相の取り方、潮流により変わる。
- ANG1 を使って安定度を判定するには ANG1 が磁軸の角度(位置)を示すから ANG1 の動揺が収束すれば安定、発散すれば脱調と安定度を判断できる。

ATPDraw による同期発電機のシミュレーションは以上で終わりです。

10 項以下は参考資料と参考文献になります。

10. PARAMETER FITTING の検討

Parameter fitting に関する Rule book の内容が Rb-080 と Rb-080-LEC で異なっています。いずれの Rule book によるべきか検討してみました。

下記の結果から結論は Rb-080-LEC の内容によるべきです。

- a. Rb-080 の PARAMETER FITTING に関する参考文献は Rule book の巻末にある参考文献 14 の 1976 年 10 月の文献および 1977 年 4 月になっています。
一方 Rb-080-LEC では参考文献 48(これは Rb-080-LEC の PARAMETER FITTING の項目中に紹介されていて、1983 年の IEE に提出した Canay 氏の文献)と Theory book(1987 年から配布開始)となっていて、Rb-80-LEC の参考文献の方が新しい。
- b. 今回のシミュレーション例の.atp ファイルを Rb-080 の PARAMETER FITTING の Case 0 に則り、PARAMETER FITTING を無効にするために FM 値=2.0 を入力して計算させても .lis ファイルを見ると PARAMETER FITTING の FM 値 2.0 は Optimize するように解釈されています。つまり Rb-080 の内容に則っていません。
一方、Rb-08-LEC の PARAMETER FITTING の Rule によれば FM 値 = 2.0 は開路時定数を持つ発電機データを最適化することになります。ATP プログラムが今回の FM 値=2.0 を Optimize するように解釈したのは Rb-08-LEC の内容に一致しています。
- c. Rb-080 の PARAMETER FITTING の Case 2 ($Xq'=Xq$ で且つ $Tqo' \neq Tqo$ の場合。後者の Tqo は定義されておらず、 $Tqo' \neq Tqo$ の誤りと考えられるので $Tqo' \neq Tqo$ と解釈した)の a) のケースを今回のシミュレーションの.atp ファイルで FM 値を Rb-080 の Rule book どおり $0.95 < FM < 1$ を満足するように、たとえば 0.97 として計算すると error で停止する。
Rb-080 の内容が正しくないことがわかります。
エラーメッセージは次のとおり。
KILL = 176. The Type-59 S.M. electrical data that has just been inputted is in error in one or more of the following ways.
Either: [1] XL is not the smallest reactance, or [2] XDPP is not smaller than XDP, or [3] XDP is not smaller than XD, or [4] XQPP is not smaller than XQP, or [5] XQP is not smaller than XQ, or [6] one or more reactances or RA is negative.

以下の d~l 項の計算は今回のシミュレーション例題の.atp ファイルを条件に合わせて変更し計算しています。

- d. Rb-080 の PARAMETER FITTING の Case 2 の b) は上記 c.と同じ条件なので c.と同じく解釈し、Case 2 の b)に従い FM 値 = 1.0 にして計算すると error で停止し計算できない。
エラーメッセージは上記 c 項と同じです。
- e. Rb-080 PARAMETER FITTING の Case 3 は Rule book 通りの計算結果になり、q 軸 2 回路の内、渦電流のダンパー回路 (g 回路) は省略され、ダンパー巻線 (Kq 巻線) のみの q 軸 1 巻線モデルとなります。(計算結果でこれら巻線電流を Check すればわかります) 但しこの場合収束エラーが出るので計算刻み時間は、0.0001sec.より 1.E-5 sec.に変更して計算しています。

この Case 3 の内容は Rb-80-LEC の VIII-C-3 の Note on simulation of reduced models の 3 のケースと同じです。ATP プログラムは Rb-80-LEC にしたがって動作したものと考えられます。

- f. Rb-080 PARAMETER FITTING の Case 4 は error で停止し計算できない。
エラーメッセージは上記 c 項と同じです。
- g. Rb-080 PARAMETER FITTING の Case5 error で停止し計算できない。
エラーメッセージは上記 c 項と同じです。
- h. Rb-080 PARAMETER FITTING の Case6 は Rulebook の条件だけでは Error になります。Case6 の条件に加えて $Tqo'=Tqo''=0$ とすれば、この条件は Rb-080-LEC の Section VIII-C-3 の Note on simulation of reduced models の 5.と同じになり、g 回路(渦電流回路)も kq 回路(ダンパー回路)も省略された結果になります。

次に Rb-080-LEC の VIII-C-3 の Note on simulation of reduced models に示されているケース 2.から 4 を検討すると次のようになります。

- i. 2.のケースは d 軸ダンパー回路が無い場合ですが、Rb-080-LEC の内容どおりでダンパー回路(Kd 回路)は省略されます。このことは IKD 電流をプロットさせれば 0 になることよりわかります。
- j. 3.のケースは Xq' と Tqo' が不明である場合を想定しています。 Rule book に従い、
 $Xq'=Xq$ 、 $Tqo'=0.0$ として計算させると q 軸 2 回路の内、g 回路(渦電流回路)が省略され kq 回路(ダンパー回路)の一つだけになります。このことは計算結果をプロットさせれば IKQ 電流(q 軸ダンパー回路電流)は流れていますが IG 電流(渦電流回路電流)は 0 であることよりわかります。収束エラーがあるので計算刻み時間は.0001sec.より 1.E-5 sec.に変更して計算しています。
- k. 4.のケースは q 軸のダンパー巻線を省略するケースです。この Case の条件である TDOPP=0 は TQOPP=0 が正です。Rule book に従い、 $Xq''=Xq$ 、 $Tqo''=0.0$ として計算させると q 軸 2 回路の内、Kq 回路(q 軸ダンパー回路)が省略され、g 回路(渦電流回路)だけになります。このことは計算結果をプロットさせれば IG 電流(渦電流回路電流)は流れていますが IKQ 電流(q 軸ダンパー回路電流)は 0 であることよりわかります。
- l. 5.のケースは q 軸の 2 つのダンパー巻線を省略するケースです。
Rule book に従い、 $Xq'=Xq''=Xq$ 、 $Tqo'=Tqo''=0.0$ として計算させると q 軸 2 回路の回路は省略されます。このことは計算結果をプロットさせれば IG 電流(渦電流回路電流)も IKQ 電流(q 軸ダンパー回路電流)も 0 になることからわかります。

PARAMETER FITTING の Rule book Rb-080 と Rb-080-LEC の検討結果は以上です。

11. 参考文献

- 1) 電力システムのパソコンシミュレーション 第7章 TACS 応用一発電機・AVR
- 2) JAUG password 保護サーバにある Rule book 「Rb-080-LEC」及び「Rb-080」
- 3) JAUG password 保護サーバにある Theory book 「ATP Theory_Book」
- 4) Can/Am EMTP News Vol. 97-4 ; Oct 1997 Machinery Saturation Question
- 5) Can/Am EMTP News Vol. 99-3 ; July 1999 TEPCO improves S.M. Model
- 6) 電気学会発表論文 T.IEE Japan Vol. 117-B, No.4, '97
- 7) 電気学会発表論文 T.IEE Japan Vol. 122-B, No.2, 2002

12. 同期機モデルに関する Can /Am EMTP News の抜粋

Can /Am EMTP News は一般に公開されており、オリジナル版は下記の Site から見るができます。

<http://gundam.eei.eng.osaka-u.ac.jp/ATPNEWS/>

又は

<http://www.eeug.org/>

今回本稿を作成にあたり一通り Can /Am EMTP News の中から 2011 年 1 月 31 日までにアナウンスされた Type 58 同期機 Model と Type 59 同期機 Model に関する Can/Am EMTP News の内容を時系列的に整理しました。

ご参考までここに掲載しておきます。

和訳が不十分な部分があるかも知れません。オリジナル版を御参照されることをお勧めします。

1) 1996 年 10 月 Can/Am EMTP News

New S.M. Model from Tokyo Electric の見出しで東京電力殿の貢献によって、従来の Type 59 モデルが予測法を採用しているために発生している数値不安定を解決するために、相領域で計算する新たな Type 59 モデルが開発されたという最初のアナウンスがなされました。

2) 1997 年 4 月 Can/Am EMTP News

New S.M. Model from Tokyo Electric の見出しで、この新しい Type 58 モデルが今や使用できるようになったとの 1997 年 4 月 2 日付けの東京電力岡本博士からのアナウンスが紹介されました。この新しいモデルは東京電力(株)殿と東京電力(株)ソフトウェア(株)殿の貢献によって開発され、東電ソフトウェア(株)の Xiang-lin Cao 氏が Type 58 モデルの著者であることが紹介されました。

この Type 58 モデルには次の特徴があると紹介されています。

- 1) 相領域で計算しているので Type 59 モデルよりも予測する量の種類が減り、数値安定性に優れている。この点は DCN20.dat で確認できます。
- 2) Type 59 と入力データは Fully compatible であり、カラム 1~2 の同期機モデルを表す 59 を 58 と書き換えるだけで Type 58 モデルでシミュレーションできます。また同一のサブケース内で Type 58 と Type 59 の両のモデルを混在させて使えます。

3) 1997 年 10 月 Can/Am EMTP News

Machinery saturation Questioned の見出しで、萩森博士から Type 59 Model による短絡時の計算結果が Universal Machine を使った計算結果と大きく異なり、また安定限界電力値は UM でシミュレーションした場合よりも 20% 小くなるという指摘がなされました。

この時点では Can / Am 側から U.M. と Type 59 の飽和の模擬方法が大きく異なっているとだけコメントされています。

4) 1998 年 7 月 Can/Am EMTP News

Machinery Saturation Questioned, II の見出しの中で萩森博士の提起された問題について東京電力(株)の岡本博士より次の回答が寄せられました。 “Type 59 モデルが飽和時の挙動がおかしいのは、変圧器電圧の修正方法に起因していると考えられます。現在の Version の Type 58 モデルは Type59 と同じなので、飽和が問題になる場合は Type 59 でも Type 58 でも無く、Universal machine を使うことを推奨します。Cao 氏が現在 Type 58 のこのバグを修正し、テスト中です。このテストが完了次第新しい Type 58 をお送りします”

5) 1999 年 4 月 Can/Am EMTP News

TEPCO Improves S.M. Model の見出しで、東京電力の岡本博士から Type 58 と type 59 モデルの重要な変更が Portland の開発者に送付されました。

ベンチマークの DC-25, DC-26, DC-47, DCNEW-11, DCNEW20 のコメントカードの内容がこの東京電力殿の変更により、次のように変更になりました。 “*Answers change 10 February 1999 following the massive changes from TEPCO (Tokyo Electric Power Company) in Japan. See April newsletter.*”

また注目すべきは DC53 の 2 つの subcases に対しこのコメント内容は付けられていませんが、これは Type 59 であっても、飽和と不飽和の模擬方法に変わりはないことを示しています。一般に計算結果の差異は軽微ですが例外は DCNEW-20 の結果です。これは Type 59 の数値不安定をデモしていることを思い出せば驚くにはあたりません。

典型的な計算結果の差異は DC25 の最初の subcase のトルク TQGEN でしょうとして計算結果の値の比較が次のようになされています。

	Final step	Minimum	Maximum
Old:	4.269726268	-1.02756122	6.372899605
New:	4.2697321	-1.02756092	6.372882218

DC-26 の 3 番目の Subcase の単相潮流計算には大幅な影響が出ています。

この subcase は Stevenson のテキスト中にある有名な 5-bus 問題です。

変更前は NEKITE = 164 回で十分でしたが、変更後は同じ収束を得るために 394 回の繰り返し計算が必要となっています。

‘99 年 3 月 18 日現在、東京電力(株)の岡本博士が New Type 58 への変更点を取りまとめ中であるとのニュースになっています。

6) 1999 年 7 月 Can/Am EMTP News

TEPCO Improves S.M. Model の見出しで ‘99 年 3 月 15 日より改善した Type 58 が使えるようになったとのアナウンスがなされました。

改善点は次のとおりです。

(1) 飽和の模擬方法の修正

萩森博士から問題提起のあった飽和時の Type 59 と Type58 の計算結果が Universal machine を使った計算結果と異なる点は Type 59, Type58 の飽和模擬が適切でなかったためであり、Cao 氏により Type 58 のこの不都合点は修正されました。

(2) 従来の潮流計算のサブルーチンプログラム FIX SOURCE は不平衡回路では正しい結果を与えないため、NEW LOAD FLOW の宣言で動く Type58 と共に使う新しい潮流計算プログラム NEW LOAD FLOW の新設。なおこの NEW LOAD FLOW は今後 CAO LOAD FLOW の名前でリリースされるとのアナウンスになっています。

(3) 50Hz と 60Hz 機が混在するシステムでのバグ修正

50Hz と 60Hz の同期機が混在する系統では間違った定常解となる点について ‘98 年 10 月東京電力殿の栗田氏と中島氏によって取り除かれました。

7) 2002 年 1 月 Can/Am EMTF News

東京電力殿により SOLVSM と KILLCODE が 2001 年 9 月 7 日更新されました。

SOLVSM は Type58 と Type59 のタイムステップループでの solution module です。変更点は Type 58 モデルが擾乱が無い時に正しくない結果を示すという指摘に対する small modification がなされました。

Type 58 同期機モデルの Theory についてはおそらく今年中に英語版を発行するでしょう。

NIOMIN=8 が採用されました。(NIOMIN は Minimum number of iteration の意味です)

Can/Am News の同期機に関する抜粋は以上です。

2012 / 10 / 22 現在、同期機モデルに関するその他の新しい News は発表されていません。

以上