

2016/07/13
Rev. 0

誘導電動機シミュレーション

ATP(EMTP)の小さな研究室

高橋賢司 著

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

前書き

ATP の Universal Machine モジュールを用いて誘導電動機に関する各種のシミュレーションが可能であり、本稿ではそのシミュレーション方法を紹介しています。

始めて ATP で誘導電動機のシミュレーションを行おうとする方の参考になるように基礎的な内容に注力して解説しています。

ATP による誘導電動機シミュレーションでは機械系統を電気回路で模擬して行いますが、この模擬回路中に設ける電流源の意味がわかりにくいと思われるので本稿ではこの電流源についても注力して解説しています。

ATP で誘導電動機シミュレーションを行う時、Universal Machine の各種コイルパラメータの入力は $d-q-0$ 座標に変換したパラメータ値で入力する必要があります。
 $d-q-0$ 座標のコイルパラメータを直ちに入手できない場合、便法として ATP のユーティリティプログラムである Indsynw を使い、入手が容易な誘導電動機の実測値から $d-q-0$ 座標のコイルパラメータを算出し、それらを使ってシミュレーションをすることができます。

本稿では最初に Indsynw を使い、 $d-q-0$ 座標コイルパラメータを算出する方法を紹介しています。その後これらコイルパラメータを入力した誘導電動機を用いて例題 1 から 10 までの各種のシミュレーションを行っています(例題 10 はその他の誘導電動機を追加しています)。

尚、この Indsynw で算出したコイルパラメータを使ったシミュレーション精度について Indsynw の製作者である Gabor Furst 氏は「First shot 用である」と言う表現をされておられます。これは Indsynw を使ったシミュレーション結果は当たりを付けるための概略シミュレーションになることを示しています。
この点を踏まえてシミュレーション結果を利用することが必要です。

ATP, ATPDraw がインストールされていればシミュレーションをすぐ実施できるように本稿中に紹介している例題 1～例題 10 の Project File も本解説書と共にアップロードしています。

本稿では ATPDraw は Version 5.6p6 を、プロットプログラムは ATP をダウンロードした時にできる ATP¥PlotXY¥Oct-2012 ホルダー中の PlotxWin 使っています。

尚、十分気をつけて作成したつもりですが、力不足で至らぬ点はまだ多々あるかも知れません。それらについてはご容赦のほどおねがい致します。

本解説書は御自由にご利用ください。但しこの解説書に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、御利用くださるようお願いいたします。

前書き	2
1. Indsynw を使った入力パラメータの作成	6
1.1 Indsynw の Install	6
1.2 data 入力の事前準備	6
1.2.1 電動機定格事項及びロータ形状	6
1.2.2 軸系 GD^2	6
1.2.3 定格出力時の定格皮相電力 S	6
1.2.4 Inertia constant H	7
1.2.5 馬力表示のモータ出力	7
2. Indsynw へのデータ入力	7
2.1 第 1 画面	7
2.2 第 2 画面	8
2.3 第 3 画面	10
2.4 第 4 画面	11
2.5 零相インピーダンスが求められない点に関して	12
3. ATPDraw の誘導電動機アイコンへの入力	13
3.1 General Tag への入力内容と説明	13
3.2 Magnet tag への入力内容と説明	14
3.3 Stator tag への入力内容と説明	15
3.4 Rotor tag への入力内容と説明	15
3.5 Init tag への入力内容と説明	16
4. Simulation の Setting	17
4.1 Simulation tag への入力内容	17
4.2 Output tag への入力内容	17
4.3 Format tag	18
4.4 Switch/UM tag への入力内容	18
4.5 Load flow と Variables の Tag への入力内容	18
5. 例題 1 - 負荷の大きさが突変する場合のシミュレーション	19
5.1 誘導電動機アイコンと外部回路の接続	20
5.1.1 中性点端子の接続	20
5.1.2 自動初期化用 BUSM 端子の接続	20
5.1.3 BUSMG1 端子の接続	20
5.2 電流源 1 と 2 の説明	21
5.2.1 機械系統中の電流源 1 の説明	21
5.2.1.1 電流源 1 の役割その 1	21
5.2.1.2 電流源 1 の役割その 2	22
5.2.1.3 電流源 1 の周波数	22
5.2.1.4 Mechanical torque の極性	22
5.2.1.5 電流源 1 の大きさについて	23
5.2.2 Type-14 電流源 2 の説明	24
5.3 ノード DAMP の抵抗	25
5.3.1 粘性ダンピングトルクの取り扱い	26
5.3.2 粘性自己ダンピング抵抗の接続位置	26
5.3.3 粘性相互ダンピング抵抗の接続位置	26
5.4 負荷駆動トルクはどこに表れるのか	27
5.5 ノード INERT のキャパシタンス	27
5.6 Measuring switch	27
6. 例題 1 のシミュレーション結果と機械系統の説明	28
6.1 各種トルクの数式表現	28

6.2	空隙電磁トルクが表れる機械系のノード	29
6.3	%% Note. メッセージ	31
6.4	機械系各部のトルクの大きさ	31
6.5	Fig. 5-1 の Fortran 演算回路の説明	31
6.6	慣性モーメントからのトルク tINERT 信号	32
6.7	回転角速度	36
6.8	粘性ダンピングトルクを表す tDAMP の信号	36
6.9	tBUSMG と tBUSMS トルクの大小関係	37
6.10	負荷駆動トルク tBUSMS について	38
6.11	機械系統ブランチの合計電流 tTTRQ	39
6.12	この例題の負荷のトルク特性	40
6.13	この例題の電源スイッチについて	40
7.	例題 2—無負荷起動シミュレーション	41
7.1	検討対象回路	41
7.2	検討対象回路の説明	41
7.3	シミュレーション結果	42
7.3.1	電機子電流	42
7.3.2	角速度	43
7.3.3	空隙電磁トルク	43
7.3.4	すべり	44
7.3.5	負荷駆動トルク tBUSMS	45
7.3.6	T-S カーブを描かせる方法	46
7.3.7	電源 SW を最初から閉じた状態にした時のシミュレーション	52
7.3.7.1	A 相電機子電流の比較	52
7.3.7.2	角速度の比較	53
7.3.7.3	TQGEN の比較	53
8.	例題 3—負荷の角速度—トルク特性を考慮した起動シミュレーション	55
8.1	検討対象回路	55
8.2	検討対象回路の説明	55
8.3	シミュレーション結果	57
8.3.1	A 相電機子電流	57
8.3.2	角速度	57
8.3.3	空隙電磁トルク	58
8.3.4	すべり	58
8.3.5	T-s カーブ	59
8.3.6	電流源 1 の大きさについての考察	61
9.	例題 4—多質点系のシミュレーション	63
9.1	シミュレーション条件	63
9.1.1	軸系構成	63
9.1.2	慣性モーメントの値	63
9.1.3	軸系の軸ねじりバネ定数	63
9.1.4	軸ねじりバネ定数 K に対応するインダクタンス値	63
9.1.5	粘性自己ダンピング抵抗	64
9.1.6	粘性相互ダンピング抵抗	64
9.2	検討対象回路	65
9.3	シミュレーション結果	66
9.3.1	各質点の角速度	66
9.3.2	tDPINER は負荷駆動トルク (ノード BUSMS - VL 間電流) に等しくなる	67
10.	例題 5—残留電圧、電源再投入のシミュレーション	68
10.1	検討対象回路	68

10.2 シミュレーション結果	70
10.2.1 残留電圧	70
10.2.2 残留電圧と電源電圧の差電圧	70
10.2.3 過渡突入電流	71
10.2.4 誘導電動機の角速度	71
10.2.5 すべり	72
10.2.6 軸系の過渡トルク	72
10.2.7 電源再投入時の軸系過渡トルクの大きさ	73
10.2.8 角速度の二乗に比例するトルク信号 t_{TL} と負荷トルク信号 t_{BUSMS} の比較	74
10.2.9 例題－6 電源 SW の再投入時間を更に遅らせた場合	75
11. 例題－7 粘性ダンピングトルク回路を省略したときの過渡トルクへの影響	77
12. 例題－8 早い段階で定常運転状態を出現させる方法	79
12.1 最初に定常運転になった時のすべり値を求めます	79
12.2 電機子電流	80
12.3 すべり値のシミュレーション結果	81
12.4 角速度の二乗に比例する負荷トルク t_{TL}	82
12.5 空隙電磁トルク T_{QGEN}	83
13. 例題－9 正しく無いシミュレーション例	84
13.1 シミュレーション結果	85
13.1.1 すべり	85
13.1.2 角速度 $\Omega_{GAM}(=t_{BUSMG})$	86
13.1.3 空隙電磁トルク T_{QGEN}	86
14. 例題 10－多機系統シミュレーション	87
14.1 検討対象回路	87
14.2 シミュレーション結果	89
14.2.1 救援時の突入電流	89
14.2.2 B 母線残留電圧と救援時の電圧低下	89
14.3. ABSOLUTE U.M. DIMENSIONS について	90

1. Indsynw を使った入力パラメータの作成

最初に Indsynw を使い、Universal Machine (以下 U. M. と称します) への入力パラメータを作成する方法を説明します。

その後これらパラメータを使った誘導電動機のシミュレーション例を紹介します。

1.1 Indsynw の Install

Indsynw のプログラムのダウンロード方法、使用方法、Indsynw のプログラム説明は JAUG パスワード保護サーバの下記のところにあります。

Indsynw の解説書：

最初にこの解説書を読まれることをお奨めします。

¥common¥doc¥introduction for INDSYNW.pdf

この解説書は日本語で書かれています。Indsynw の Install 方法と Indsynw の内容紹介が網羅されています。

次に Indsynw の Program をダウンロード/インストールを行います。

Indsynw の Program：

JAUG パスワード保護サーバの次のところにあります。

¥COMMON¥INDMOT¥INDSYN. ZIP

1.2 data 入力の事前準備

Indsynw を Install し、上記解説書を読み終わったら、Indsynw にデータを入力することになります。この入力の事前準備としてシミュレーション対象の誘導電動機について下記 1.2.1～1.2.5 項の内容を準備します。

1.2.1 電動機定格事項及びロータ形状

誘導電動機の定格及び特性値を準備します。

ここでは次のとおりとします。

12P-1200 KW-600rpm-4000 V-60Hz-0.88 P. F. -定格出力時効率 0.93 - 起動電流 6.5p. u. - 起動トルク 0.67 p. u. Full load slip 2%、
Full load slip 時の負荷トルクの大きさは 1.0 p. u.
ロータ形状は Single cage。

1.2.2 軸系 GD^2

軸系は最も多く使われる 1 質点系で模擬します。

モータと負荷の GD^2 を用意し、それらの和が 1 質点系の GD^2 になります。多質点系のシミュレーションは第 9 項で解説しています。本例では

$$GD^2 = Motor GD^2 (Kg \cdot m^2) + Pump GD^2 (Kg \cdot m^2) = 606.828 + 1314.8 = 1921.628 (Kg \cdot m^2) \quad (1.2.2. -1)$$

とします。

1.2.3 定格出力時の定格皮相電力 S

この皮相電力 S は 1.2.4 項の Inertia constant H を算出するために必要です。

次のように算出します。

$$S = 1200 / (\eta \cdot power factor) = 1200 / (0.93 \cdot 0.88) = 1466.276 KVA \quad (1.2.3-1)$$

1.2.4 Inertia constant H

Inertia constant H を求めます。 H は(1. 2. 4-1)式で求められます。

GD^2 に(1. 2. 2-1)式の値を、 n にモータの同期回転数の 600 を、 S に(1. 2. 3-1)式の値を入力します

$$H = \frac{GD^2}{4} \cdot \left(\frac{n}{60} \cdot 2 \cdot \pi \right)^2 \times 10^{-3} / (2 \cdot S) = 0.6467 \quad (KW \cdot s / KVA) \quad (1. 2. 4-1)$$

1.2.5 馬力表示のモータ出力

定格出力 1200 KW を馬力表示にするため換算係数 $0.736 \text{ kw} = 1 \text{ hp}$ を使い、馬力表示のモータ出力を用意します。(Indsynw を起動し、Do you wish to read the introductory note or proceed to data entry, の場面で y を入力し、解説を読むと中に換算係数 $0.736 \text{ kw} = 1 \text{ hp}$ の換算係数が使われています。)

よって、

$$\text{Rated horse power} = 1200 / 0.736 = 1630.4 \text{ hp} \quad (1. 2. 5-1)$$

以上で事前準備は終わり、Indsynw へのデータ入力作業に移ります。

2. Indsynw へのデータ入力

Indsynw を起動しデータ入力を選択すると Fig. 2. 1-1 の画面になります。

作業ステップに応じて Indsynw の画面が切り替わって行きます。 最初の入力画面を第 1 画面とし以下順次第 2 画面～第 5 画面と称して説明して行きます。

2.1 第 1 画面

この画面でシミュレーションしようとするモータの特性値を入力します。

Indsynw はそれらの入力した特性値から、入力に必要な d-q 領域のパラメータを算出してくれます。

Output data file	6 ch. name + ext	MOT.LIS
Rotor type	enter w/s/d/b	single cage
System frequency	Hz	60
Rated vootage L-L rms	kV	4
Rated horsepower	hp	1630.4
Synchronous speed rpm	rpm	600
Power factor	p.u.	.88
Full load slip	%	2
Full load eff'y < 1-slip /0.75	p.u.	.93
Starting current	p.u.	6.5
Starting torque	p.u.	.67
Maximum torque	no entry required p.u.	
Inertia constant	H OR W	H kWs/kVA
Inertia constant	kWs/kVA or ft-lb^2	.6467
Load torque at rated slip	p.u.	1.0
Saturation starts at current	p.u.	2.0

w = wound
s = single cage
d = double cage
b = deep bar

H = H const. kWs/kVA
W = WR^2 lb-ft^2

1 - use Up/Down keys to select, type new entry if desired
2 - use Up/Down or ENTER to accept new or old entry
3 - use Del to erase entry
4 - after completeing table press F10 to continue
5 - press Ctl-Brk at any time to quit

Fig. 2. 1-1 第 1 画面－電動機 の特性値入力画面

事前準備したデータを第1画面に入力して行きます。

Fig. 2.1-1 は入力完了後の画面を示しています。

Output data file 名は Default の MOT.LIS のままでかまいません。

Inertia constant H or W のところで H を入力すると、Fig. 2.1-1 の如く $H \text{ kw}\cdot\text{s}/\text{KVA}$ と表示されます。

$H = \text{kw}\cdot\text{s}/\text{KVA}$ のため、このままで構いません。

入力が終わったら F10 キーを押します。

すると入力した特性値をもとに等価回路パラメータが Indsynw により算出され、この等価回路パラメータに基づく確認用のモータ特性値が第2画面に表示されます。

第1画面の最初の Output data file 名は Default で Fig. 2.1-1 の如く MOT.LIS になっていて、このファイル中に Indsynw へ入力した値と計算結果が出力されます。

検討対象 U.M. が複数台存在する時、File 名を例えば MOT1.LIS、MOT2.LIS、MOT3.LIS・・・としておけばこれらのモータ毎の出力 Files が作られるので入出力の再確認が容易になります。

これらの出力 File が作られる場所は Indsynw のプログラムをインストールしたホルダー中に生成されます。

2.2 第2画面

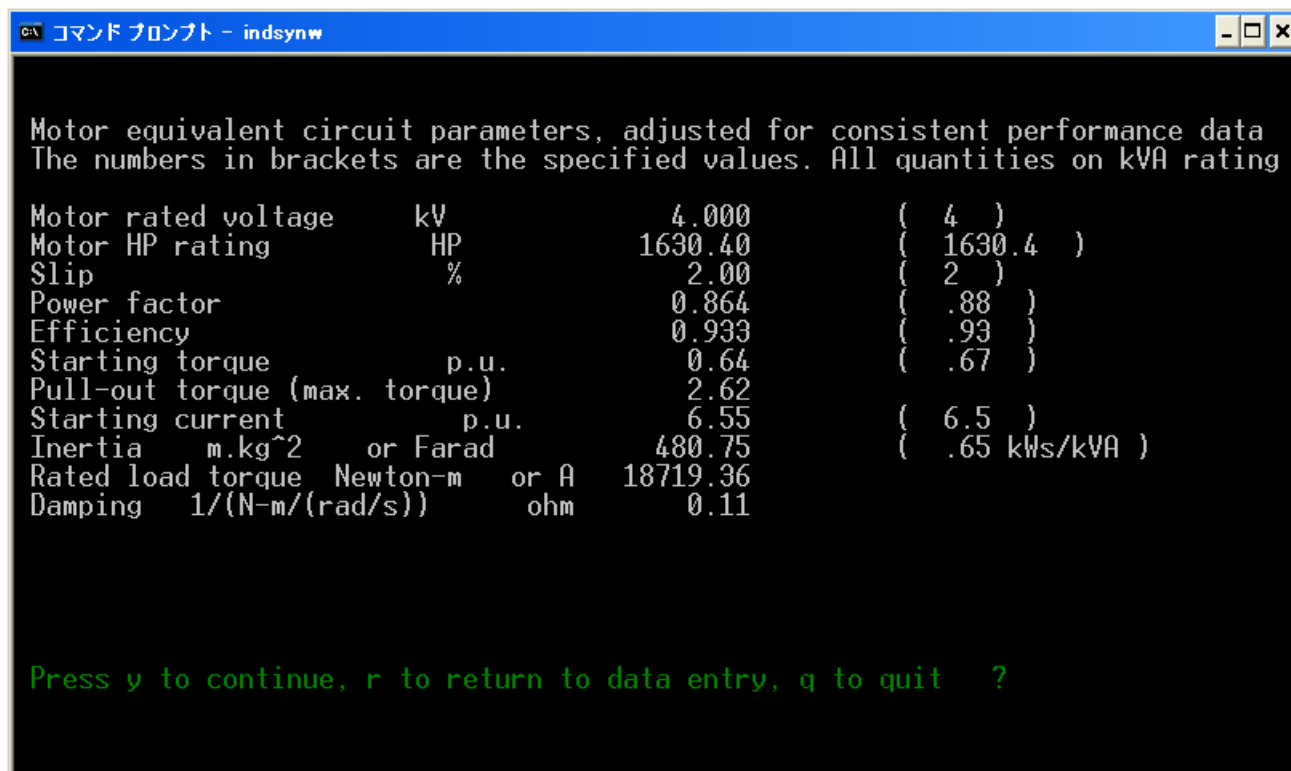
確認用のモータ特性値が表示されます。()内の特性値はユーザが入力した特性値です。

計算された特性値と入力特性値間に大きな乖離が無いとユーザが判断できれば y キーを押せば計算された特性値の元になったコイルパラメータが第3画面(p.u. 値)と第4画面(物理単位)に表示されます。

もう少し特性値を入力特性に近づけたい場合は r キーを押して入力特性を若干変えて入力し直し第2画面で望む特性値になったか確認します(チューニング作業)。

必要によりこのチューニング作業を何回か繰り返し特性値を希望する値に近づけます

本稿では Fig. 2.2-1 に示す第2画面どおりで ok として次のステップに進みます。



```

C:\> コマンド プロンプト - indsynw

Motor equivalent circuit parameters, adjusted for consistent performance data
The numbers in brackets are the specified values. All quantities on kVA rating

Motor rated voltage      kV          4.000      ( 4 )
Motor HP rating          HP          1630.40    ( 1630.4 )
Slip                     %           2.00      ( 2 )
Power factor             0.864      ( .88 )
Efficiency               0.933      ( .93 )
Starting torque          p.u.         0.64      ( .67 )
Pull-out torque (max. torque)
Starting current         p.u.         6.55      ( 6.5 )
Inertia m.kg^2 or Farad  480.75    ( .65 kW s/kVA )
Rated load torque Newton-m or A  18719.36
Damping 1/(N-m/(rad/s)) ohm      0.11

Press y to continue, r to return to data entry, q to quit  ?
```

Fig. 2.2-1 第2画面—算出パラメータに基づく確認用の特性値

注)

- 1) この画面の下から二行目の Rated load torque と最下段の粘性 Damping 抵抗値は入力したデータから Indsynw が算出した値です。
本稿では Indsynw が算出した粘性 Damping 抵抗値 0.11Ω を採用してシミュレーションしていますが、 0.11Ω の算出根拠、妥当性は残念ながら不明です。粘性 Damping の意味は 5.3 項で解説しています。
この粘性 Damping は正確な値が求まらないことから、多くの場合無視してシミュレーションされます。
- 2) 下から 3 行目の慣性モーメントの単位が $m \cdot Kg^2$ と表示されていますがこれは誤りで、正しくは $Kg \cdot m^2$ です。

2.3 第3画面

この画面は Indsynw で算出された p. u. 値のコイルパラメータ値を示しています。
本稿ではパラメータは P. U. 値入力で無く、物理量 (Henry, Ω) で入力するので第四画のコイルパラメータを使います。
いずれかの key を押し第4画面に進みます。

```
コマンドプロンプト - indsynw

Stator resistance      p.u.      0.041755
Stator leakage reactance  $x_l$   unsaturated * p.u. 0.051845
Stator leakage reactance  $x_{lsat}$  saturated * p.u. 0.019986
Rotor  $x_l$ 's same as stator
Magnetizing reactance  $x_m$  no saturation p.u. 2.428535
Rotor outer cage resistance  $r_1$  p.u. 0.015886
Rotor inner cage resistance  $r_2$  p.u. 0.000000
Rotor inner cage reactance  $x_2$  p.u. 0.000000
Rotor type single cage

* these are the components of the leakage reactance
  the total unsaturated value for both the sator and rotor is  $2 * x_l$ 
  while the total saturated value is  $x_l + x_{ls}$ , where  $x_{ls}$  is based on
  saturation at the value of the starting current
  no saturation is taken for the rotor inner cage reactance

press any key to continue
```

Fig. 2.3-1 第3画面

2.4 第4画面

本稿の場合パラメータは物理量で入力するので、第4画面のコイルパラメータを使います。

P. U. 値入力と物理量入力の切り替えは ATPDraw 上で ATP→Settings→Switch/UM の Tag のところでできます。

```
コマンド プロンプト - indsynw

Coil parameters for #3 type U.M.machine
all resistances in ohms, all inductances in Henrys

Direct axis common inductance      0.070295
Quad. axis common inductance       0.070295
Armature coils
0 axis resistance                   blank
0 axis inductance                  blank
d axis resistance                   ra      0.455641
d axis unsaturated inductance      ln      0.003001
d axis saturated inductance        lsat    0.002079
Rotor coils d axis
#1 resistance                       rot1    0.173354
#1 unsaturated inductance           lrln    0.003001
#1 saturated inductance             lr1sat   0.002079
Rotor coils q axis
enter the same values as for the d axis

press any key to continue
```

Fig. 2.4-1 第4画面

この画面を開いたままにしておいて 3. 項の「ATPDraw の誘導電動機アイコンへの入力」作業に移ります。閉じてしまった場合は Indsynw をインストールしたホルダーに MOT.LIS が出来ているのでそれを見て作業できます。

Indsynw を終了させるには第4画面上で任意の Key 入力をして第5画面とし、そこで q キーを入力します。

以上でコイルパラメータの算出作業は完了です。

次に上記で得られたパラメータを使いシミュレーションするための作業に入ります。

ATPDraw 上で右クリックして Floating Menu を呼び出し、その中から Machine→UM3 Induction をクリックし、Fig. 2.4-2 に示す、かご形誘導電動機アイコンを呼び出し上記で得られたパラメータを入力していきます。詳細は 3. 項で述べます。



Fig. 2.4-2 かご形誘導電動機アイコン

尚、シミュレーションに際しては Universal Machine の Rule book IX Dynamic Universal machine と Theory book の 9. UniversalMachine を参照する機会が多々あるのではと思われます。Rule book の読解を容易にするため ATP の Password 保護サーバの次の個所に Rule book の改定版の日本語訳が Upload されています。

rulebook/Universal machine□a□□.pdf 2015-08-01
ご利用ください。

2.5 零相インピーダンスが求められない点に関して

2.4 項第 4 画面の Fig. 2.4-1 の如く、Indsynw ではステータの零相インピーダンスが求められません。

このことから Indsynw で電動機パラメータを算出したときは回路が非対称となる事象のシミュレーションは使えません。留意が必要です。

3. ATPDraw の誘導電動機アイコンへの入力

2.4 項で算出したコイルパラメータを ATPDraw の誘導電動機アイコンへ入力していきます。
ATPDraw の Universal Machine Type 3 (かご形誘導電動機) のアイコンを右クリックして表示される以下に示す入力画面に従って入力して行きます。

3.1 General Tag への入力内容と説明

General tag へ入力した結果を Fig. 3.1-1 に示します。

NODE	PHASE	NAME
Stator	ABC	MOT
M_NODE	1	BUSMG1
BUSM	1	BUSMS
Neut	1	

Fig. 3.1-1 General Tag の入力画面

この誘導電動機の Stator 結線は 星型、ロータコイル数は d 軸巻線, q 軸巻線ともそれぞれ 1 つとしています。

極数が 12 極なので Pole pair は 6 を入力します。

Frequency この入力項目は定常状態の周波数が 60Hz で無い時の定常状態の周波数値を入力します。この例題の定常状態周波数が 60Hz で上書きする必要がないので blank または 0 を入力します。

Tolerance について

この項目は角速度収束裕度です。

予測法でも補償法でも計算 step ごとにロータの角速度を予測してから角速度を計算しています。計算結果の角速度がこの Tolerance を加味した角速度内に入っていれば、次の計算 step に移れるようになっています。

U. M. Rule book RBA-090.pdf によるとこの Tolerance のデフォルト値は同期角速度 N_s の 0.01% です。この例題の場合は $N_s = 600rpm$ 、よって Default の収束 Tolerance は 0.06 rpm になるべきですが、ATPDraw で Default 値適用すべく 0 を入力すると 6 rpm が .atp ファイルに表示さ

れます。これは ATPDraw の bag です。

収束裕度が 6rpm では収束裕度が大きすぎて角速度出力に振動が表れるため、この例題では Tolerance 欄は 1.E-5 の小さい収束裕度として振動を無くしています(この場合. atp ファイルには入力値と同じく 1.E-5 と正しく表示されています)。

一般にこの収束裕度はできるだけ小さい値の方が角速度波形に良好な計算結果が得られますが、小さくしすぎると収束 Error のメッセージが出る場合があるのでその兼ね合いでできるだけ小さく収束裕度を設定します。

この Tag の Output 欄でユーザーが選択した項目が出力されます。選択候補の出力変数の内容説明は HELP ボタンを押せば見るができます。

3.2 Magnet tag への入力内容と説明

この Tag のところで d, q 軸励磁インダクタンスの入力を行います。

入力した Magnet tag を Fig. 3.2-1 に示します。

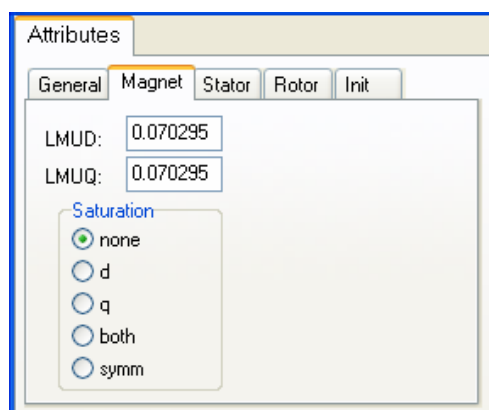


Fig.3.2-1 Magnet tag の入力画面

LMUD, LMUQ へ入力するのは励磁インダクタンス値です。

単位は Henry で入力します。

これらの励磁インダクタンスはルールブック Rb-090 の Fig. 1 に示されている等価回路の L_{mj} のインダクタンスです。

励磁インダクタンスは common inductance とも称し、Indsynw でも common inductance としています。この値は Indsynw の第 4 画面の冒頭に表示されています。その値をこの Tag に転記します。本例では励磁インダクタンスの飽和は無いと仮定しているので Saturation は none を選択しています。

3.3 Stator tag への入力内容と説明

入力した Stator tag の内容を Fig. 3.3-1 に示します。

	R [ohm]	L [H/pu]
0	0	0
d	0.455641	0.003001
q	0.455641	0.003001

Fig. 3.3-1 Stator tag

電機子コイルの 0, d, q 領域巻線の抵抗値、インダクタンス値を入力します。単位はおのこの Ω 、Henry で入力します。

Indsynw では零相分は計算されないので 0 としておきます。

零相インピーダンスを含む正確なパラメータが求められるケースでは零相インピーダンスを入力します。

第 4 画面の電機子コイルデータをここに転記します。

Indsynw の第 4 画面に電機子 q 軸のデータが表示されていませんが、電機子 d 軸の値と同じ値になるので、Indsynw の第 4 画面に表示されている抵抗とインダクタンスのデータを電機子 q 軸のコイルデータにも適用します。

本稿の最初のシミュレーション例はすべり 2% で定常運転中のシミュレーションで電機子コイルの飽和が無い状態なので未飽和値を使っています。

起動シミュレーションなどで電機子電流が 2.0 p.u. を超える場合は一般に飽和が始まると言われているので飽和値を使うべきでしょう。(7, 8, 10 項に起動シミュレーションの例をあげています。使用しているインダクタンス値は未飽和値になっています。飽和効果を考慮する時は飽和値を使用してください。)

3.4 Rotor tag への入力内容と説明

	R [ohm]	L [H/pu]
1	0.173354	0.003001
2	0.173354	0.003001

Fig. 3.4-1 Rotor tag

Fig. 3.4-1 に示すように入力欄が 2 段になっており、上段が d 軸ロータコイルデータ、下段が q 軸ロータコイルデータです。

コイルデータの入力単位は Stator tag と同じです。

飽和は無いと仮定しているので未飽和のインダクタンス値を使っています。

3.5 Init tag への入力内容と説明

この tag は U.M. の初期条件を指定する tag です (Init は Initial condition setting tag の略)。

自動初期化が選択されていればここに入力された slip 値で初期化が行われ各回路の初期値が決定されます。

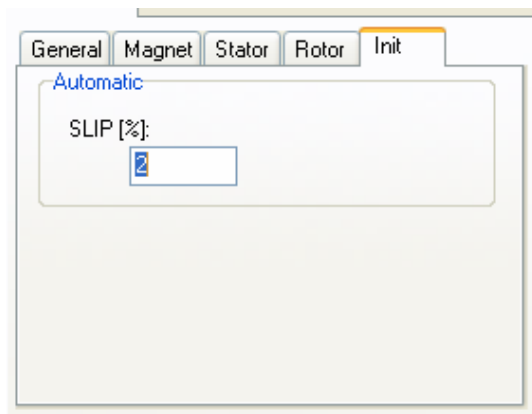


Fig. 3.5-1 Init tag

自動初期化については 5.1.2 項と 5.2.1.2 項をご参照ください。

誘導電動機の初期条件として与えなければならないものは Rb-090 の D.1.5.b 項より、%slip 値です。

この誘導電動機の初期条件の slip は第 2 画面に表示される特性値でのシミュレーションをしたいため 2%を入力します。

4. Simulation の Setting

次に ATPDraw の画面上部に表示される Menu バーから ATP→Settings を選択して行き simulation の ATP Settings を以下のように行います・

尚、以下の Setting は「例題 1－負荷の大きさが突変する場合のシミュレーション」用です。他の例題についても 4.3～4.5 は同一ですが 4.1～4.2 は例題によって一部変更しています。詳しくは Upload している各例題の Project file の ATP Setting の内容をご参照願います。

4.1 Simulation tag への入力内容

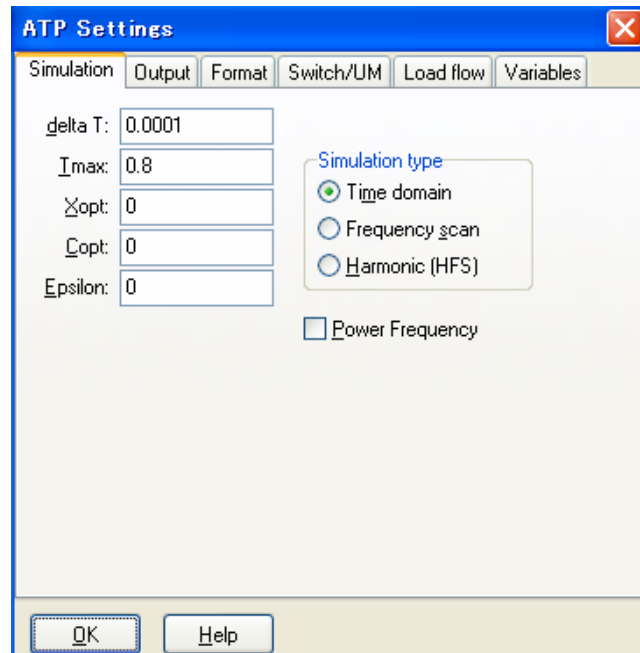


Fig.4.1-1 Simulation tag

4.2 Output tag への入力内容

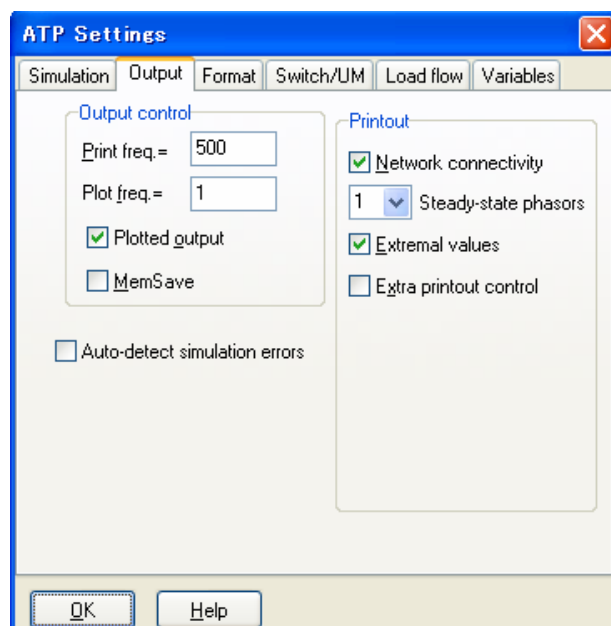


Fig. 4.2-1 Output tag

4.3 Format tag

default のままにしています。

4.4 Switch/UM tag への入力内容

Fig. 4. 4-1 のとおり Initialization(初期化)は自動初期化、単位は SI 単位、U.M. と外部系統との Interface に予測法を指定しています。

予測法と補償法の使い分けは一般的には使用制約の少ない予測法が使われます。

この例題では両方で差異が無いこと確認しています。

自動初期化を指定すると Time step loop の 計算に入る前に誘導電動機を含めた全回路の Phasor 解(極座標表示の定常解)が求められ、それらが初期値として自動的にセットされます(自動初期化をするためには機械系統に設ける Type14 の電流源 1 は Tstart=-1 にしておきます)

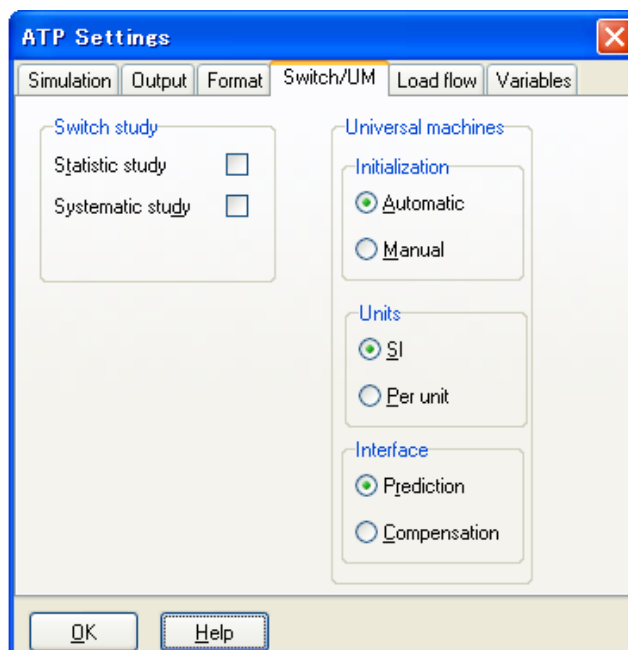


Fig. 4. 4-1 U.M. tag への入力

4.5 Load flow と Variables の Tag への入力内容

Default のままにしています。

5. 例題 1ー負荷の大きさが突変する場合のシミュレーション

本項は例題 1 の回路説明です。シミュレーション結果は 6 項に示します。

この例題は誘導電動機がすべり 2%で定常運転中、計算開始後 0.3 sec. で負荷駆動トルクが 1872 Nm だけ Step down した時のシミュレーションを行います。

誘導電動機の初期状態は 2%すべりに相当する T-S 曲線上の点の負荷トルクで運転しているとし、速度比例する負荷トルク特性は存在しないとしています。

この検討対象回路を Fig. 5-1 に示します。

この例題はシンプルなシミュレーション例ですが、良く吟味すればシンプルであるがゆえに電流源についての概念や誘導電動機シミュレーションの基礎を与えてくれる良い例題です。

Fig. 5-1 の緑の点線部分は電気系で模擬した誘導電動機の機械系統を示していて、粘性自己ダンピング回路、誘導電動機と負荷の慣性モーメント回路、電流源 1 と 2 が含まれています。

電気系で模擬した機械系統中に Measuring switch や 90, 91 の TACS probe が入っていて、一見複雑そうですがこれらは機械系統中のトルク (電流) の流れを理解するために各ブランチ回路の電流検出のために設けているだけです。

この検討対象回路の Project File の名前は Type_3_Mechanical_System_prediction.acp です。

この例題では電源に SW を設けていませんが、電源に SW を設け SW の Tclose=-1 とすれば同じ結果が得られます。

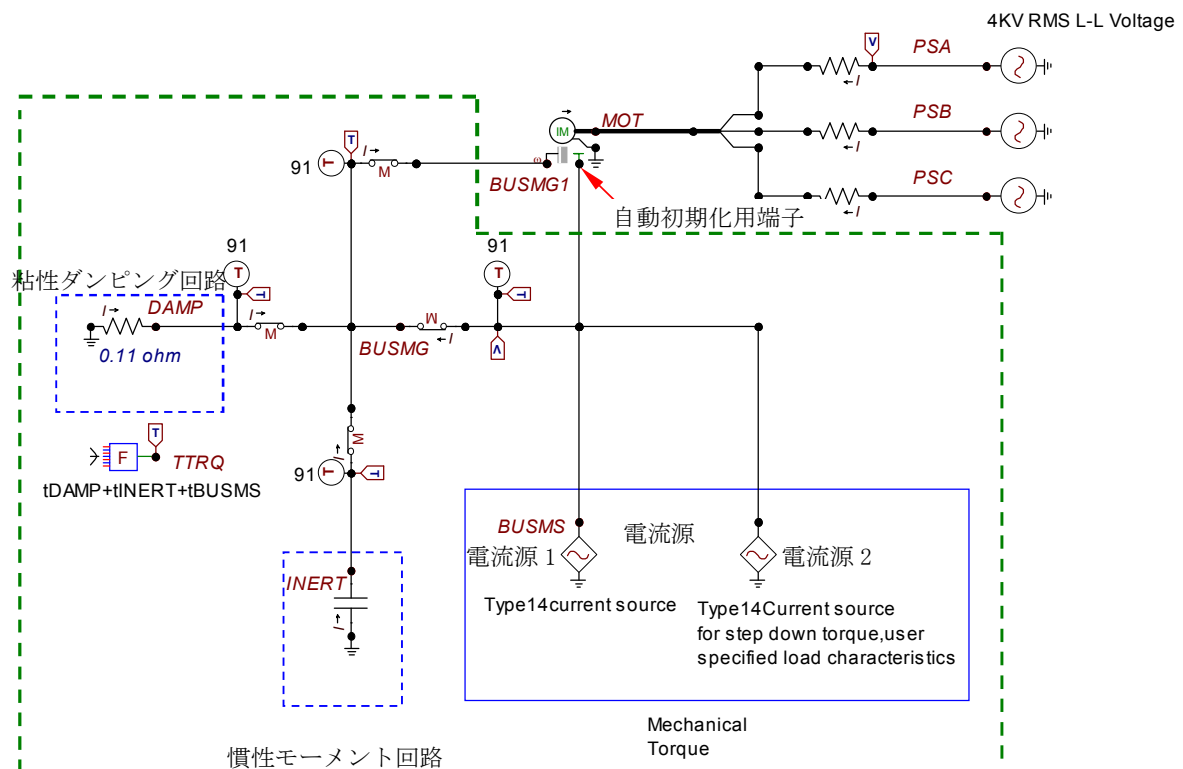


Fig. 5-1 カゴ形誘導電動機のシミュレーション回路

以下に Fig. 5-1 の説明をします。

5.1 誘導電動機アイコンと外部回路の接続

Type 3 誘導電動機アイコンには Fig. 5-1 に示すとおり 4 種類の端子があり、MOT 主回路端子から時計回りに、ステータ巻線中性点端子、自動初期化用 BUSM 端子、空隙電磁トルクが表れる端子 (BUSMG1) の順に配列されています。

5.1.1 中性点端子の接続

中性点端子は Default では非接地になっています。この状態から Fig. 5-1 の如く直接接地に変更します。

中性点を非接地のまま、またはインピーダンス接地にして走らせるとエラーになるので留意が必要です。

5.1.2 自動初期化用 BUSM 端子の接続

自動初期化用 BUSM 端子は端子部分を右クリックすれば Fig. 5.1-1 の如く ATPDraw では BUSM 端子の名前であることがわかります。本例ではこの端子をノード BUSMS に接続しています。

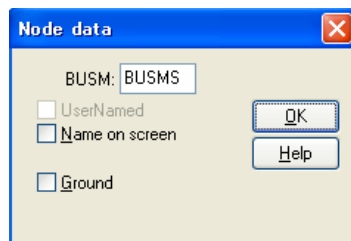


Fig. 5.1-1 BUSM 端子

通常のシミュレーションでは誘導電動機の初期条件にすべりを指定し、後はプログラムが U.M. を外部システムと結合させて定常状態の各回路の phasor 解を求め、それらを自動的に各回路の初期値に設定する自動初期化を採用します。

この通常の自動初期化によるシミュレーションでは Fig. 5-1 の如く電流源 1 と記した Type14 電流源を自動初期化用ノード (BUSMS) に接続しておきます。

(ご参考 : 通常ではないシミュレーションケースとして非結合初期化または手動初期化と呼ばれる方法がありますが特殊なので本稿では取り上げていません。自動初期化はユーザの労力を著しく軽減してくれるので採用すべきです。

尚、Phasor 解とは複素数で表される定常解を指しています。

この Phasor 解は ATP を走らせた後にできる Type_3_Mechanical_System_prediction.lis file 中に示されるので必要に応じて参照します。)

5.1.3 BUSMG1 端子の接続

この端子は Fig. 5-1 に示すごとく電気回路で表した機械システムの粘性ダンピング回路と慣性モーメントの接続ノードに接続します。

6.2 項で解説していますが、この BUSMG1 のノードには誘導電動機の空隙電磁トルクが表れるのでこのように接続すると誘導電動機の空隙電磁トルクが電気回路で表された各機械システムへ電流の形で流れて行きます。

誘導電動機運転の場合この空隙電磁トルクがトルクの源で、このトルクが粘性ダンピングトルク、慣性モーメントへの入出力トルク及び負荷駆動トルクの各トルクを供給します。

5.2 電流源 1 と 2 の説明

Fig. 5-1 中に示している電流源 1 と 2 について説明します。

5.2.1 機械系統中の電流源 1 の説明

電流源 1 の入力内容は次のようにしています。

The screenshot shows the 'Component: ACSOURCE' dialog box. It has two main tables: 'Attributes' and a smaller table on the right. The 'Attributes' table has columns 'DATA', 'UNIT', and 'VALUE'. The smaller table has columns 'NODE', 'PHASE', and 'NAME'. Below the tables are buttons for 'Copy', 'Paste', 'Reset', 'Order', and 'Label'. There is also a 'Comment' field. At the bottom, there are several radio button groups for 'Type of source', 'Num phases', 'Angle units', 'Amplitude', and 'Grounding'. The 'Type of source' group has 'Current' selected. The 'Num phases' group has 'Single' selected. The 'Angle units' group has 'Degrees' selected. The 'Amplitude' group has 'Peak L-G' selected. The 'Grounding' group has 'Grounded' selected. There is also a 'Hide' checkbox. At the very bottom are buttons for 'Edit definitions', 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Ampere	1E-6
Frequency	Hz	1E-5
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	1	BUSMS

Copy Paste 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. 5. 2-1 電流源 1 の入力内容

次に機械系統中に置かれるこの Type14 電流源 1 の設置目的を説明します。
電流源 1 の役割は必要なトルクを供給するトルク源として働くのではないと思われるかもしれませんが、しかしそうではなく、この電流源の役割は以下の役割を担っています。

電流源 1 が設置されている役割は二つあります。

5.2.1.1 電流源 1 の役割その 1

電流源 1 が接続されているノードに U. M. の外部から働く機械的トルクがあることを示しています。この点に関し、Theory book 9. 4 項では次のように説明されています。

もし軸系の質点に働く機械的トルクがあれば(発電機へのタービントルク、モータの機械的負荷トルクのように)、電流源をその質点のノードに接続します(タービントルクは正の電流源、負荷トルクは負の電流源)。

また U. M. の Rule book RBA090. PDF の D. 2. 2. 項では次のようになっています。

原動機から発電機に与えられるトルクのように U. M. の機械系へ外部から与えられるトルクは電氣的な模擬では電流源で模擬されます。

この記述から機械系統中に設置されている電流源 1 の一つ目の目的は、外部から U.M. に与えられる機械的トルクは電流源が接続されたノードに働くことを示していることがわかります。

Theory book で電流源は “その質点のノードに接続” と記載されているのでこの例の場合キャパシタンスのノード BUSMG に接続するのですが、この例題では電流源 1 のところに Measuring switch を設けているのでノード BUSMS に接続しています。

電動機運転の場合、機械的トルクを表すマイナス極性の電流が電動機から負荷へ流れ、発電機運転の時と反対になるので発電機運転の場合は正の電流源、電動機運転の場合は負の電流源にします。この電流源には 5.2.1.2 の理由で Type14 の電流源を使わなければなりません。

この電流源 1 はシミュレーションの間 phasor 解の大きさに留まる定電流源になります。

この電流源とは別に負荷特性を表す TACS 電流源や負荷特性を示す TYPE14 電流源 2 を並列に設置すれば、TACS 電流源や負荷特性を示す TYPE14 電流源 2 により、時間と共にまたは角速度と共に可変になる電流源になるので、負荷特性はこれらを使って模擬します。

5.2.1.2 電流源 1 の役割その 2

二つ目の役割は Time step loop に入るに先立って全系統の Phasor 解を求める役割です。

この役割のため電流源 1 に Type14 電流源が使われています。

Type14 電流源を使って Type14 電流源の Tstart= -1 にすれば time step loop の計算に先だって誘導電動機と系統を組み合わせた回路の Phasor 解が求められます。

(Ref. Rule book VII ELECTRICNETWORK SOURCES Type 14 Sinusoidal Sources)

電流源 2 も Type-14 ですが、Tstart = 0.3 sec. としており、Tstart=-1 でないので Phasor 解に関与していません。

この例題でも電流源 1 は Tstart= -1 としているので、time step loop の計算に先だって誘導電動機と系統を組み合わせた回路の Phasor 解が求められます。

また後述の「4.3 Switch/UM tag」のところで説明しているようにこの例題でも自動初期化が宣言されているので、この Phasor 解が U.M と電気系統の全ての回路に初期値として自動的にセットされます（自動初期化と呼ばれます）。

電流源 1 の大きさに 1.E-6 という極めて小さい値が入力されていますが、自動初期化により phasor 解のトルク値に上書きされた上で計算が開始されます。このように Type-14 の電流源 1 は回路各部の諸量に正しい初期値にセットするために必須の電流源です。

5.2.1.3 電流源 1 の周波数

U.M. の機械系に表れるトルクは後述のシミュレーション例にも示しているように直流電流として表れます（極性が直流と言うことで、大きさが一定という意味ではありません。大きさは運転状態により変動します）。

外部から U.M. に与えられるトルクを表すために交流の Type14 電流源が使われていても、この電流源の周波数を 0.00001Hz にしているため実質的に直流として扱えます。

5.2.1.4 Mechanical torque の極性

U.M. の空隙電磁トルクはマイナス極性の電流として表れ、この電流が電気回路で構成された機械系統へ流出します。誘導電動機空隙電磁トルクの電流がおおもとの電流になっており、これの一部が粘性ダンピング抵抗回路の電流及び慣性モーメントのキャパシタンス回路の充、放電電流として分流して行き、残りの電流が負荷駆動のトルクになります。

このようになることは 6.11 項でさらに詳しく説明しています。

5.2.1.5 電流源 1 の大きさについて

電流源 1 の大きさについては

1) 電流源 1 の大きさの入力値は 1. E-6 (A) と入力しています。

2) 一方、Rule book の D. 1. 5. b の e. によればトルク源の大きさは、与えられたすべりの初期値と矛盾しない内部値を与えるために調整可能な振幅を持つ必要があると述べられています。

理解すべき点は入力した 1. E-6 (A) と Rule book D. 1. 5. b の e. の記述の関係です。

この解釈は次のとおりになります。

電流源 1 に入力した 1. E-6 の大きさの電流値はそのままの大きさで使われるのではなく、U. M. と外部電気系統を組み合わせで行われる phasor 解の値に自動的に調整された上でシミュレーションに使われるということを示しています。

このように電流源 1 の入力値 1. E-6 は Phasor 解で調整可能な振幅となっています。

電流源 1 の入力した振幅の大きさが Phasor 解の値に調整されることは第 6. 10 項及び第 8. 3. 6 項に示しています。

さて運転中この電流源の大きさが Phasor 解に調整された後、どのような挙動をするのかという言う点も非常に興味深い点です。

この点についても検討を行い結果は第 6. 10 項及び第 8. 3. 6 項に示していますが、結論は、

シミュレーション期間中電流源 1 の大きさは phasor 解の値に留まる定電流源として働きます。

ここで電流源は負荷トルクを供給するものであるから例えば角速度の二乗に比例する大きさでなければならないのに一定値では困る、と思われることと思います。これに対する答えは角速度の二乗に比例するトルクなどは電流源 1 に並列に TACS 電流源を接続してやり、そこに TACS で記述した負荷特性を接続してやれば模擬できるので電流源 1 の大きさが定電流源であっても問題ありません。

電流源 1 の Tstart= -1 の意味するところについてももう少し述べておきます。

電流源 1 の大きさを調べると Phasor 解の一定値ですがその値は電流源 1 が接続されたノードにおける値であって、その他のノードでは当然異なった Phasor 解になります。

例えばノード BUSMG-BUSMG1 間の電流値の Phasor 解の値 > ノード BUSMS-BUSMG の間の電流値の Phasor 解の値 になっています。

つまり 電流源 1 の Tstart=-1 は検討対象回路の全ての岐路の phasor 解を求めるように働きます。

5.2.2 Type-14 電流源 2 の説明

入力値は Fig. 5.2.2-1 に示すとおりです。

The screenshot shows the 'Component: ACSOURCE' dialog box. It has two main tables: 'Attributes' and 'NODE'. The 'Attributes' table lists parameters like AmplitudeA, Frequency, PhaseAngleA, StartA, and StopA with their units and values. The 'NODE' table lists the connection node (AC), phase (1), and name (BUSMS). Below the tables are buttons for Copy, Paste, and Reset, along with fields for Order and Label. A Comment field is also present. At the bottom, there are radio buttons for '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), and 'Grounding' (Grounded, Ungrounded). There is also a 'Hide' checkbox. At the very bottom are buttons for 'Edit definitions', 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Ampere	1872
Frequency	Hz	1E-5
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	0.3
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	1	BUSMS

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. 5.2.2-1 電流源 2 の入力データ

電流源 2 はユーザが指定した負荷トルク特性(この例では Step down torque 特性)を持つ Type14 の電流源です。

一般にはこの負荷トルク特性を表す電流源は Type14 の電流源では無いケースが多く、TACS の電流源を使い、その TACS 電流源に TACS で記述した負荷トルク特性を接続して用います。この一般的な用法の一例は「8. 負荷の角速度—トルク特性を考慮した起動シミュレーション」に述べています。

さてこの例の Type-14 電流源 2 は計算開始後 0.3 sec. から動作を開始し、トルクの大きさが +1872 A で一定の大きさを持つ電流源としています。
この電流源が計算開始後 0.3 sec. で生きて突変トルクの +1872 A の電流を Phasor 解の -22610 A の負荷駆動トルクに重畳させています。重畳の結果 0.3 sec. 以降で負荷トルクが Step 状に -20738 A = +1872 A + (-22610 A) に減少する負荷特性を模擬しています。

もし計算途中で Step down torque のように突印するトルクがあれば次の点を考慮して突印する電流源の符号(極性)を決定します。

U. M. 誘導発電機の発電機運転モードの定常状態の空隙電磁トルク TQGEN 値は+の値で出力されています。

U. M. の誘導電動機で電動機運転モードの場合定常状態の空隙電磁トルク TQGEN 値は-の値で出力されています。

5.3 ノード DAMP の抵抗

ノード DAMP の抵抗は粘性ダンピング抵抗を示しています。
入力している値は 0.11Ω で、Indsynw で算出された粘性ダンピング抵抗をそのまま使っています。

ダンピングには単一質点系自己ダンピングのほかに多質点系の軸ねじりに関する相互ダンピングがありますが、誘導電動機を含めた駆動系は単一質点系とみなして検討できるケースが殆どのため、ここでは自己ダンピングだけを取り上げています。
相互ダンピングを考慮した多質点系のシミュレーションをする場合は
「9. 多質点系のシミュレーション」を参照願います。

自己粘性ダンピングとは流体と Fan blade または pump impeller 間に速度差がある場合粘性抵抗による、Damping を指します。

粘性 Damping Torque に関するパラメータと電気回路パラメータの間には次表に示す 1～3 の対応関係があります。

機械系と電気系の対応		
	機械系	電気系
対応 1	Damping Torque $T (N \cdot m)$	電流 $i(A)$
対応 2	角速度 $\omega (rad/s)$	電圧 $v(V)$
対応 3	Damping Torque T と角速度 ω の関係式は $Damping Torque T = D \cdot \omega \quad (5.3-1)$ $D: Damping \text{ 係数 } (N \cdot m \cdot sec/rad)$	電流 i と電圧 v の関係式は 電流 $i = \frac{1}{R} \cdot \text{電圧 } v \quad (5.3-2)$

Table 5.3-1 機械系と電気系の対応

対応 3 より

$$D = \frac{1}{R} \quad (5.3-3) \text{ の対応になります。}$$

粘性 Damping Torque は (5.3-1) 式に示すごとく回転角速度に比例するトルクです。

5.3.1 粘性ダンピングトルクの取り扱い

正確なダンピング係数を求めることは困難であることから粘性 Damping Torque は無視されて取り扱われるのが一般的です。

もし無視して取り扱う場合は Fig. 5.3-1 の朱記点線部の回路を削除し、且つ TACS の TTRQ 中の tDAMP 信号も削除します。

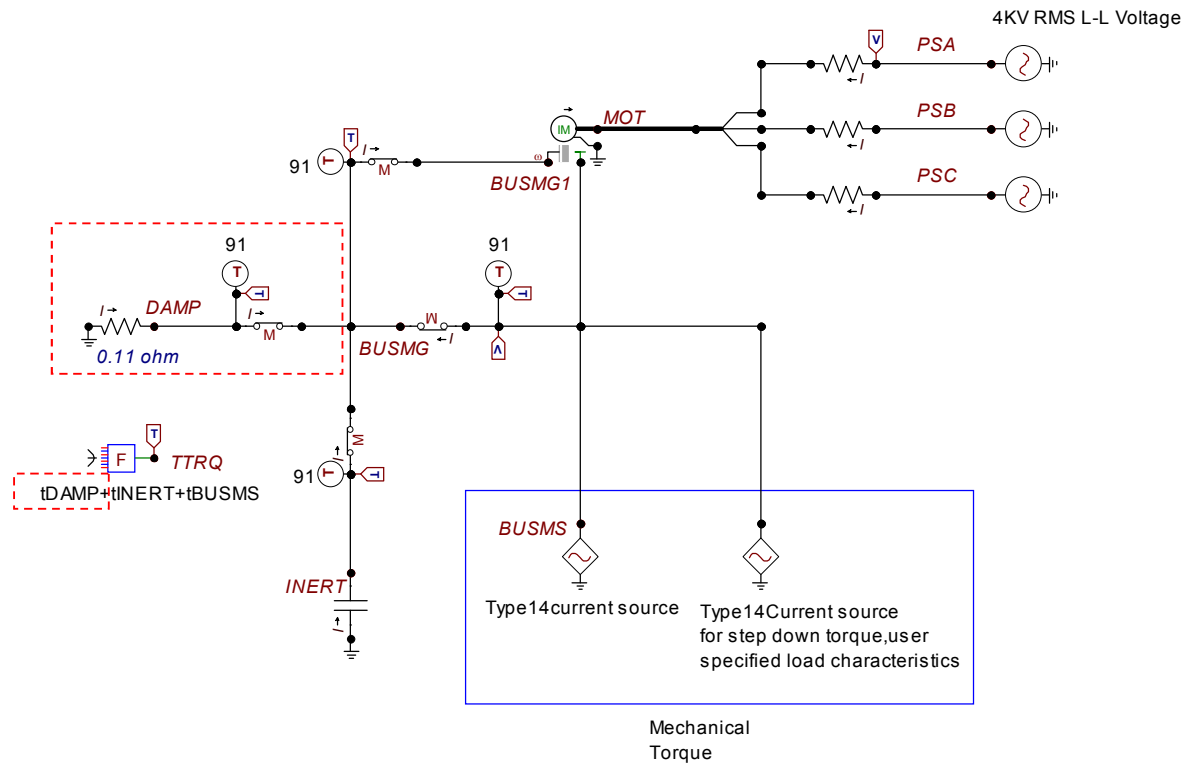


Fig. 5.3-1 粘性ダンピングを無視するときの回路変更

5.3.2 粘性自己ダンピング抵抗の接続位置

粘性自己ダンピングを考慮する場合は質点のダンピングに関わるものなので Fig. 5.3-1 に示すように当該キャパシタンスが接続されているノードと大地間へ接続します (BUSMG と大地間に接続します)。

多質点系の場合でも粘性自己ダンピングはその質点に付随するものなので 9.1 項に示す如く各慣性モーメントと並列に慣性モーメントが接続されるノードと大地間に接続します。

5.3.3 粘性相互ダンピング抵抗の接続位置

質点間に相互ダンピングトルクを考慮する場合は 9.1 項に示す如く各軸ねじりバネ定数を表すインダクタンスと並列に粘性ダンピング抵抗を挿入します。

5.4 負荷駆動トルクはどこに表れるのか

「Fig. 5-1 カゴ形誘導電動機のシミュレーション回路」で負荷を駆動するトルクはノード BUSMG と BUSMS を結ぶ回路電流として表れます。
この電流はまた Fig. 5-1 のノード BUSMS に接続した 91 番の電流検出プローブでも検出していて、この電流の信号の変数名は tBUSMS です。
シミュレーション結果の tBUSMS の波形は第 6.9 項に示しています。

5.5 ノード INERT のキャパシタンス

ノード INERT のキャパシタンス値は軸系の誘導電動機の慣性モーメントと負荷の慣性モーメントの和に等しいキャパシタンス値にしている、軸系を 1 質点系で模擬しています。
このキャパシタンスの入力値は $480750000 \mu F$ で、Indsynw で算出された値(第 2 画面の値)を使用しています。

Indsynw のキャパシタンスは Farad の単位で出力されますが、電気回路で表される U.M. の機械系のキャパシタンス値は電気系統のブランチ回路と同じく μF の単位で入力しなければなりません。

キャパシタンスと慣性モーメントの関係は U.M. モジュールでは

$$I(F) = I(Kg \cdot m^2) = I(N \cdot m \cdot sec^2) \quad \text{になるように調節されています。}$$

ノード INERT に流れる充・放電電流が慣性モーメントへ与えられるトルク、または慣性モーメントから放出されるトルクを表します。

慣性体に角加角速度が働くとき慣性モーメントからトルクの注入/放出が行われます。

慣性モーメントが大きいとキャパシタンスの端子電圧が遮断器投入により電圧上昇(角速度上昇)して行く時間が長くなり、起動時間が長くなります。

機械系のトルクを表わす回路電流が直流のため定常状態ではキャパシタンスは充電が完了しているので、キャパシタンス回路の電流は 0 で、後述の (6.1-1) 式に示すごとく、軸系の角加角速度が変化した時に初めて慣性モーメントの電流(トルク)の注入/放出が行われます。

5.6 Measuring switch

回路中に設けた Measuring switch は各回路電流を検出するために設けています。

91 番の probe は switch 電流を検出し、TACS で電流の演算ができるようにしています。

6. 例題 1 のシミュレーション結果と機械系統の説明

次に ATPDraw の Menu から ATP-run ATP の順にクリックし、
Type_3_Mechanical_System_prediction.acp を走らせます。

以下にシミュレーション結果を紹介すると共に、シミュレーション結果をもとに誘導電動機
シミュレーションで使われる機械系の説明をして行きます。

最初にシミュレーション結果の波形を理解する時に役立つので、各種トルクの数式をあげておき
ます。

6.1 各種トルクの数式表現

単一質量系の空隙電磁トルク T_{tqgen} 、慣性モーメントトルク $J \frac{d^2 \beta}{dt^2}$ 、粘性 Damping Torque $D \frac{d \beta}{dt}$ 、
負荷駆動トルク T_{drive} の関係式は (6. 1-1) 式で表すことができます。

(6. 1-1) 式は誘導電動機の空隙電磁トルクは慣性モーメントの放出トルク、粘性ダンピングトルク、
負荷駆動トルクの三者の和に等しいことを示しています。

$$T_{tqgen} = J \frac{d^2 \beta}{dt^2} + D \frac{d \beta}{dt} + T_{drive} \quad (6. 1-1)$$

ここで、

T_{tqgen}	:	空隙電磁トルク ($N \cdot m$)
β	:	ロータ回転角度 (rad)
$\frac{d \beta}{dt}$	:	ロータ回転角速度 (rad / sec)
$\frac{d^2 \beta}{dt^2}$	:	ロータ回転角加角速度 (rad/sec^2)
J	:	慣性モーメント ($N \cdot m \cdot sec^2$)
$J \frac{d^2 \beta}{dt^2}$	:	慣性モーメントトルク ($N \cdot m$)
D	:	粘性 Damping 係数 ($N \cdot m \cdot sec/rad$)
$D \frac{d \beta}{dt}$	:	粘性 Damping Torque ($N \cdot m$)
T_{drive}	:	負荷駆動トルク ($N \cdot m$)

(6. 1-1) 式は次のことも示しています。

- A) 慣性モーメントによるトルクは角加角速度が存在する時だけ表れます。したがって角加角速度が 0 である定常運転状態では慣性モーメントから放出又は流入するトルクは 0 です。
- B) 粘性 Damping Torque の大きさは角速度に比例します。したがって一定角速度で回転する定常運転状態では粘性 Damping Torque の大きさは一定になります。
- C) もし定常状態時で慣性モーメントトルクが 0、且つ粘性 Damping Torque を無視する場合は

$$T_{tqgen} = T_{drive} \quad (6. 1-2)$$

6.2 空隙電磁トルクが表れる機械系のノード

空隙電磁トルクが表れるノード(この例では BUSMG1 のノード)は電気系で模擬した機械系統に接続します。このように接続することで、空隙電磁トルクが電動機運転時のトルクの源になって Fig. 5-1 の機械系統の粘性ダンピング回路、慣性モーメント回路へ流れて行き、残りのトルクが負荷駆動トルクとしてノード BUSMG-BUSMS 間の電流として表れます。

誘導電動機の空隙電磁トルクはシミュレーションを実施すれば出力変数名 TQGEN として U. M. モジュールからも直接出力されますが、電気回路で模擬した機械系のノード BUSMG- BUSMG1 間の電流値として同じ値のトルクが表れます。

さて Rule book に戻り、電気回路で模擬した機械系のどこに空隙電磁トルクが表れか調べると、U. M. Rule book RBA-090. PDF の次の個所で空隙電磁トルクは機械系と U. M. を結ぶノードに現れると記載されています。

- 1) U. M. の Rule book G. 1. マシンテーブルのデータ説明 a) の 7) 項
- 2) U. M. の Rule book G. 3 マシンテーブルのデータ説明 a) の 7) 項
- 3) U. M. の Rule book G. 4. マシンテーブルのデータ説明 a) の 6) 項

本例の機械系と U. M. を結ぶノードは BUSMG1 なので空隙トルクはこの BUSMG1 のノードのところに表れる筈です。このことをシミュレーションで確認してみます。

この確認は BUSMG-BUSMG1 間の電流を調べ、それが TQGEN のトルク値と同一であれば BUSMG-BUSMG1 間に現れると確認できます。

機械系を電気系で模擬する時トルクは電流で表され、 $1(A) = 1(Nm)$ になるように調節されています。このため機械系に表れる空隙電磁トルクを調べるには BUSMG-BUSMG1 間の電流を調べればよいことになります。

BUSMG-BUSMG1 間の電流と TQGEN の両者のプロットを Fig. 6.2-1 に示します。

Fig. 6.2-1 から TQGEN の空隙電磁トルクと BUSMG-BUSMG1 間の電流は同一波形になり、機械系を電気系で模擬した場合、空隙電磁トルクはノード BUSMG-BUSMG1 間の電流として表れることが確認できます。

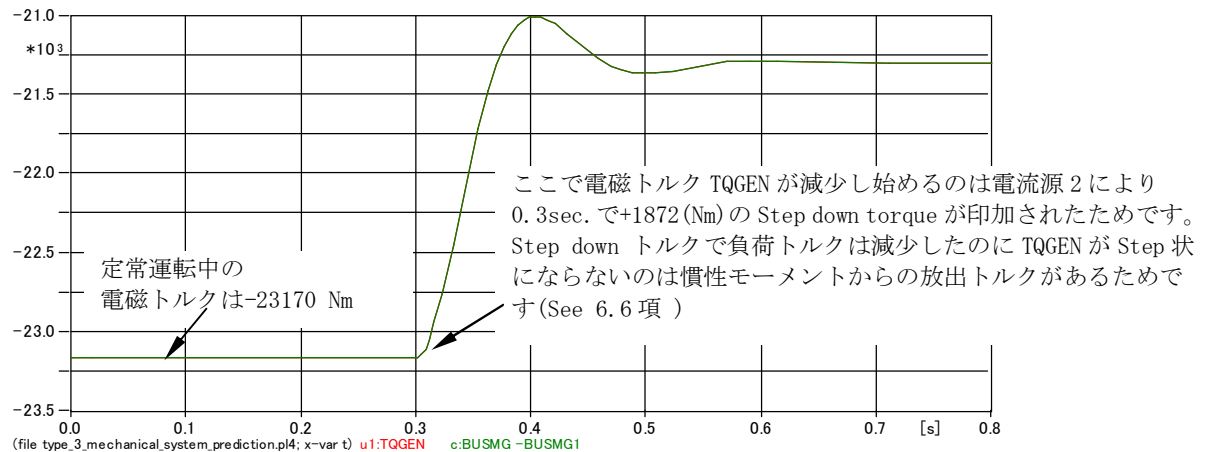


Fig. 6.2-1 TQGEN と BUSMG-BUSMG1 間の電流のプロット

空隙電磁トルク TQGEN は Fig. 6.2-1 の Plot の如く電動機運転モードではマイナスの極性の直流電流で出力されます。

この空隙電磁トルクが 6.11 項ごとくノード BUSMG1 から機械系を模擬した各ブランチに分流して行きます。各ブランチ回路で観測される電流もマイナス極性にしておけば検討が楽になるため各ブランチ回路の Measuring switch の取り付け向きを Fig. 5-1 に示すようにしています。

トルク値の初期値 -23170 Nm は初期条件として入力した誘導電動機のすべり 2%から計算された BUSMG-BUSMG1 間電流(空隙電磁トルク)の phasor 解になっています。

下記に type_3_mechanical_system_prediction.lis 内の BUSMG-BUSMG1 間電流の phasor 解部分を抜粋して示します。

```
Output for steady-state phasor switch currents.↓
Node-K      Node-M      I-real      I-imag      I-magn      Degrees      Power      Reactive↓
BUSMG       BUSMG1      -2.31702540E+04  -1.86093365E+00  2.31702541E+04  -179.9954  -7.13356698E+05  5.72936957E+01↓
```

自動初期化が宣言されていればすべりの初期値から決まる phasor 解の空隙トルク値が自動的に BUSMG-BUSMG1 の電流初期値としてセットされるようになっています。

自動初期化が宣言されていれば空隙トルクのみならず、全諸量の Phasor 解が初期値としてセットされます。

6.3 %%% Note. メッセージ

type_3_mechanical_system_prediction.lis 中のノード接続状態の後に次のメッセージが表示されますが、これによる計算結果への影響はありません。

(type_3_mechanical_system_prediction.acp 中の全ての Measuring sw を取り去り、その代わりに 1.0E-9Ω の微小抵抗を挿入して計算させればこのメッセージは出なくなり、計算結果も type_3_mechanical_system_prediction と同じになります)

```
%%% Note. Node "BUSMS " has both voltage and current sources connected to it. The current source has no effect on the↓
solution, of course, so it could be omitted without any repercussion. In case the preceding advice seems to make↓
no sense, check for a switch connected to the named node. Remember, any node that is shorted to the named node is↓
really the same. In case ground is one such node, remember that it is a known-voltage node, so it qualifies as↓
having a voltage source connected to it, for purposes of this message.↓
```

6.4 機械系各部のトルクの大きさ

機械系各部のトルクの流れを概念的に把握しておくことは誘導電動機機のシミュレーションでは極めて大切なので、以下に機械系各部のトルクの流れを検討します。

機械系各部のトルクの大きさはその個所の電流の大きさを測定すれば知ることができます。

結論から先に述べておきます。

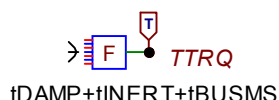
空隙電磁トルクの電流はノード BUSMG1 からノード DAMP の粘性 Damping 抵抗、ノード INERT の慣性モーメントを表すキャパシタンスへ分流して行き残りがノード BUSMS へと流れていきます。

ノード BUSMS へ流れる電流が負荷駆動トルクの大きさを表します。

このことをシミュレーションで確認してみます。

6.5 Fig. 5-1 の Fortran 演算回路の説明

トルクの流れを把握する上で各ブランチ回路の電流の和を取って考察しています。この和を取る作業に使っているのが Fig. 5-1 に示している下記の Fortran の演算回路です。



この Fortran 演算回路で $TTRQ = tDAMP + tINERT + tBUSMS$ の演算をさせ、機械系統各部に流れるトルクの合計を求めています。

tTTRQ の波形は「6.11 機械系統ブランチの合計電流 tTTRQ」に示しています。

tDAMP, tINERT, tBUSMS の変数は Measuring switch の所に付けた TACS probe で検出された電流信号で、接頭辞の t は TACS probe で検出された信号をノード電圧と区別するために付けています。実際の Fortran の入力は接頭辞なしの信号で行います。

6.6 慣性モーメントからのトルク tINERT 信号

負荷トルクが Step down した時慣性モーメントから放出されるトルクは tINERT で、これをプロットすると Fig. 6.6-1 になります。

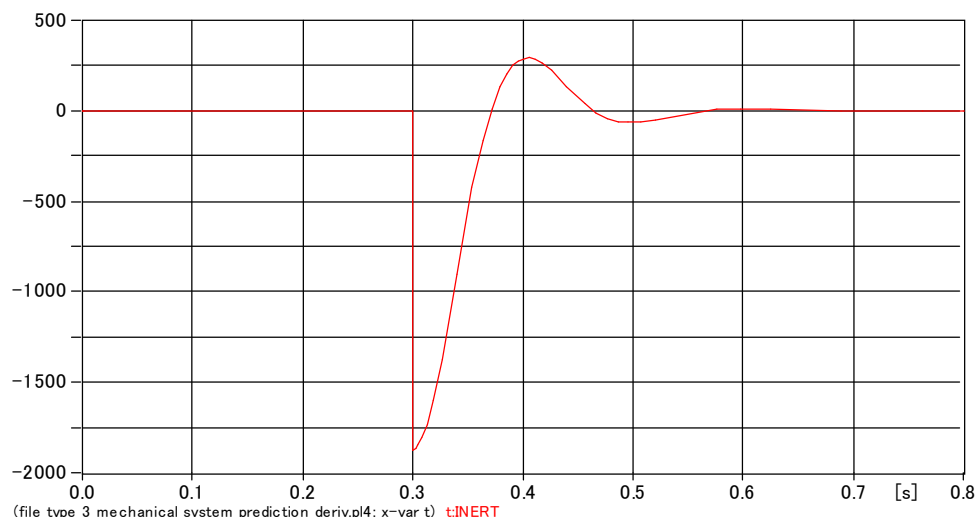


Fig. 6.6-1 慣性モーメントから放出されるトルク tINERT

このようになることを発生する角加速度、慣性モーメントの値から検討してみます。角加速度の算出回路は Type_3Mechanical_System_Prediction.acp に表示していませんが、次の変更を行えば計算できます。

- 1) BUSMS の Switch 電流検出用の 91 番 Probe を 90 番のノード電圧検出 Probe に変更
- 2) TTRQ 算出回路は削除しておきます (削除しないと TTRQ 演算のなかの電流信号 tBUSMS が上記の如く電圧信号に変更されて存在しないのでエラーになります)
- 3) 角加速度 tANGACC の演算回路及び角加速度に慣性モーメントを乗じる Fig. 6.6.-2 の回路を追加します。

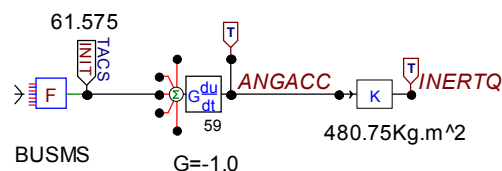


Fig. 6.6-2 角加速度と放出トルク演算用の追加回路

この回路の説明：

最初の Fortran statement には BUSMS と入力し BUSMS のノード電圧(角速度)を取り込んでいます。TACS の初期条件には定常状態の角速度 61.575 (rad/sec.) を入力しています。これを次の 59 番の微分回路に接続します。Gain は 1 ですが、誘導電動機の場合トルクがマイナスで取り扱われることから Gain を -1 としています。微分回路の出力 ANGACC が得られる角加速度です。次の K は慣性モーメント値を入力しています。

最終的に慣性モーメントからの放出トルク tINERTQ が得られます。

この追加回路で計算された角加速度を Fig. 6.6-3 に示します。

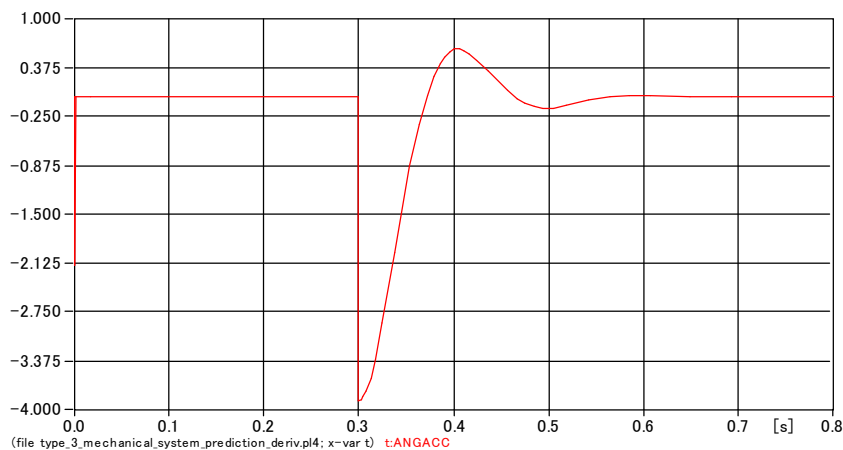


Fig. 6.6. -3 Step down Torque で発生する角加速度 (rad/sec²)

Fig. 6.6. -4 に演算された放出トルク tINERTQ とキャパシタンスからの放電電流のプロットを示します。

両者は一致します。

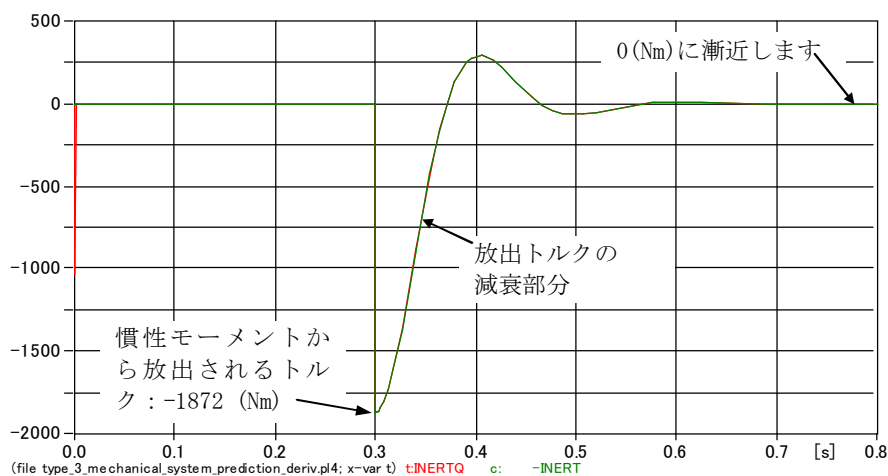


Fig. 6.6. -4 放出トルク tINERTQ とキャパシタンスからの放電電流

この慣性モーメントからの放出トルクは Fig. 6.6-4 の如く 0.3 SEC. において -1872Nm です。この値は電流源 2 で与えられる突変トルクと大きさが等しく符号が逆になる関係にあります。このため突変トルクの影響をキャンセルするように働き、結果的に角速度変化を抑制する働きをしますが、慣性モーメントの放出トルクは Fig. 6.6. -4 に示す如く急激に減衰してしまうため突変トルクを持続的にキャンセルできません。

Fig. 6.2-1 の如く空隙電磁トルクの 0.3 sec. 以降の立ち上がり部分の波形が Step down torque が働いているにも拘わらず、Step 状に減少せず緩やかに減少するのはこの慣性モーメントからの放出トルクの影響によるものです。

もし慣性モーメントがこの例題の 1/2 倍、または 2 倍であれば慣性モーメントからの放出トルクは Fig. 6.6-5 のようになります。このように慣性モーメントの大きさが大きければ大きいほど放出トルクの持続時間は長くなります。

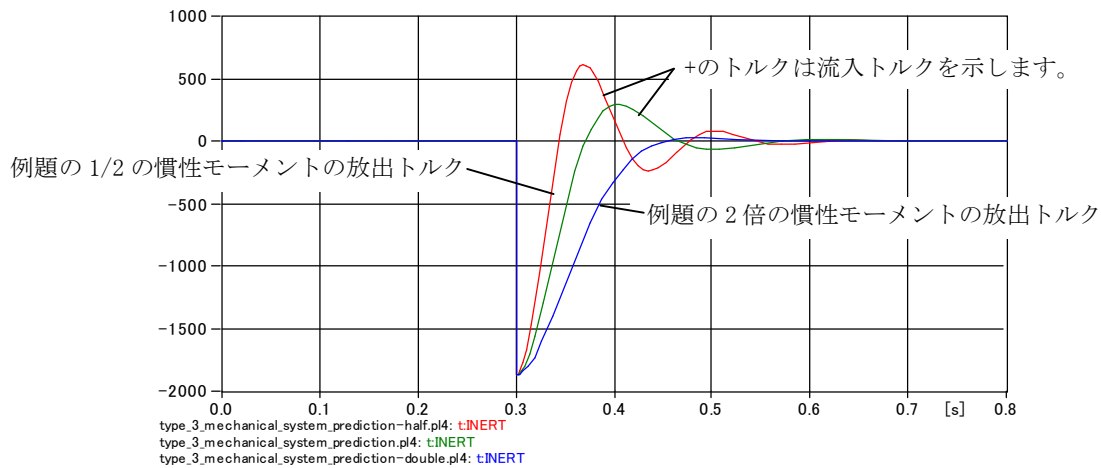


Fig. 6.6-5 慣性モーメントからの放出トルク

Fig. 6.6-5 で慣性モーメントのトルク極性がマイナス→プラス→マイナスと変化して行くのは角加角速度の極性が Fig. 6.6-6 のごとく変わるため、慣性モーメントトルクは放出と流入を繰り返してやがて定常状態に落ち着きます。

Fig. 6.6-6 は放出トルクと角加角速度の相対関係を示すため角加角速度は 100 倍して表示しています。

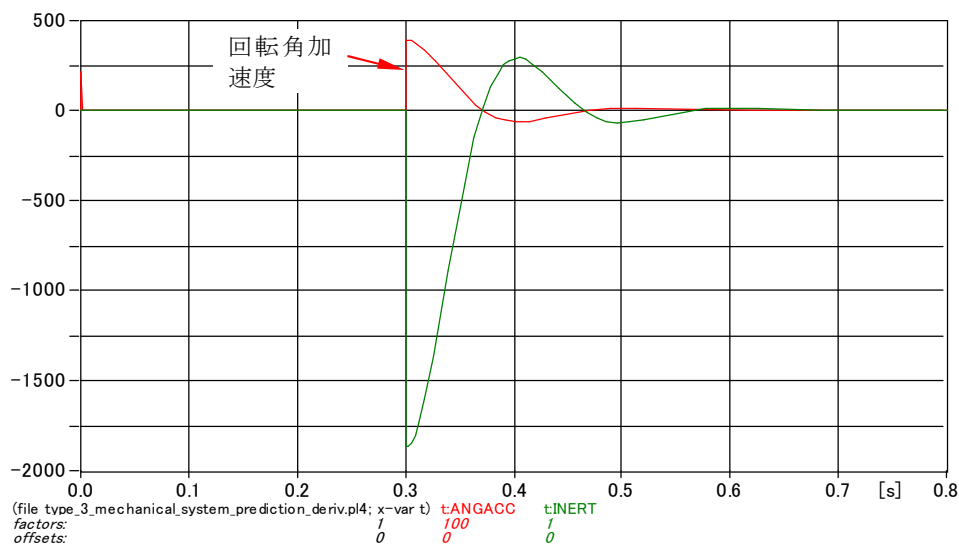


Fig. 6.6-6 慣性モーメントのトルクと角加回転角速度の関係

これらの放出トルクの結果、空隙電磁トルクの立ち上がり部の波形はFig. 6.6-7のように、慣性モーメントが小さいほど、負荷トルクの変動を抑制する慣性モーメントからの放出トルクが小さいので Step down トルクの影響が強く出て立ち上がり部が急になります。一方慣性モーメントが大きい場合は慣性モーメントからの放出トルクが大きいので立ち上がり部の傾斜は慣性モーメントが小さい場合より緩やかになります。このように空隙電磁トルクの大きさは慣性モーメントの放出トルクの影響を受けます。
(注 Fig. 6.6. -7 は空隙電磁トルクとして tBUSMG で表示していますが TQGEN で表示させても同じ結果になります)

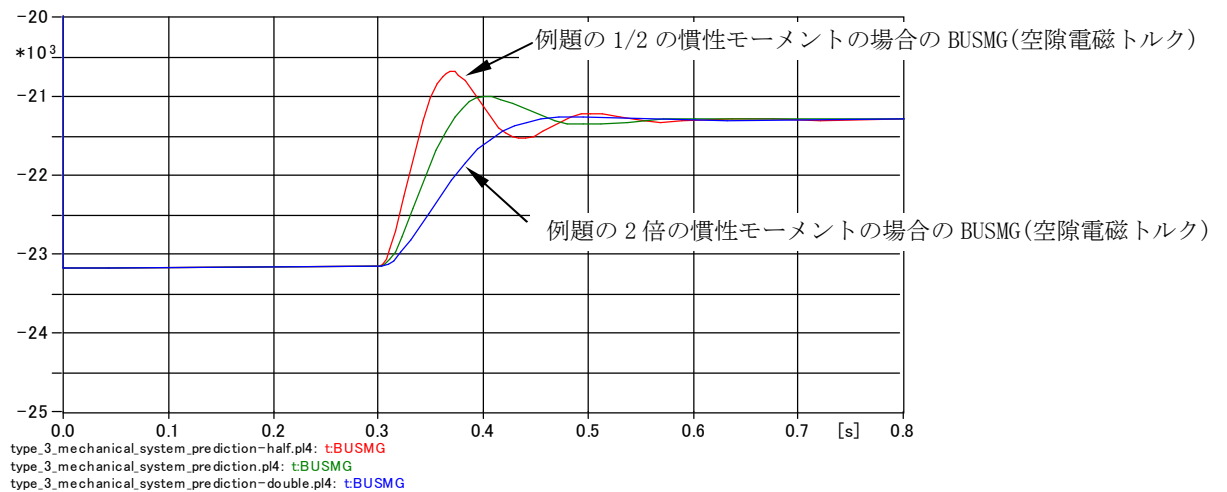


Fig. 6.6-7 慣性モーメントが空隙電磁トルクに及ぼす影響

6.7 回転角速度

回転角速度とノード電圧の対応は $1V = 1\text{ rad/s}$ になります。

ノード BUSMS の TACS Prove 91 を 90 に変えて BUSMS のノード電圧を検出すればそれが角速度になります。

このようにして検出した角速度を以下に示します。

0.3 sec. で突変減少トルクの影響を受け角速度は Fig. 6.7-1 のように僅かに増加し、T-S 曲線上の新しい運転点に移行して運転が継続されます。

縦軸の単位は rad./sec です。

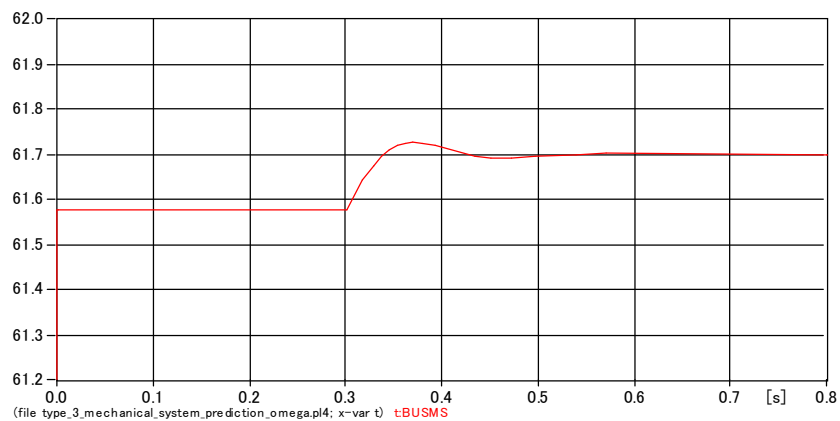


Fig. 6.7-1 突変トルクで負荷トルクが減少するときの回転角速度上昇

6.8 粘性ダンピングトルクを表す tDAMP の信号

Step down Torque の影響を受け、負荷が軽くなるので角速度が上記の「角速度」の如く増加する

るので $D \frac{d\beta}{dt}$ によりダンピングトルも Fig. 6.8-1 の如く僅かに増加します (D は粘性ダンピング係数)。

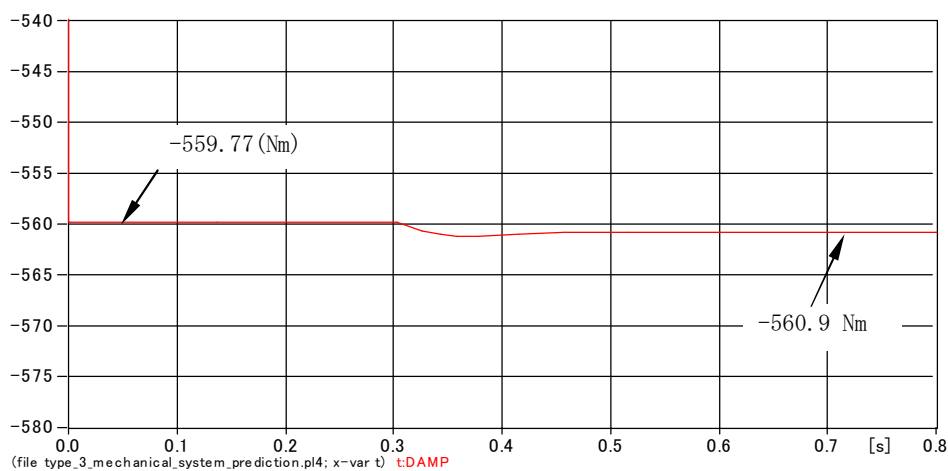


Fig. 6.8-1 回転上昇に伴う粘性ダンピングトルクの増加

6.9 tBUSMG と tBUSMS トルクの大小関係

誘導電動機運転の時の空隙電磁トルク tBUSMG と負荷駆動トルク tBUSMS の Plot を Fig. 6.9-1 に示します。空隙電磁トルクと負荷駆動トルクの大小関係は
| 空隙電磁トルク | > | 負荷駆動トルク | になります。

定常状態では慣性モーメントを表す Capacitance は充放電が完了しているので慣性モーメントのトルクは0のため空隙電磁トルク tBUSMG と負荷駆動トルク tBUSMS にある差はダンピング回路に流れるダンピングトルクになります。

0.3 sec. 後は慣性モーメントからのトルク放出の影響を受け tBUSMG の波形は Fig. 6.9-1 になります。

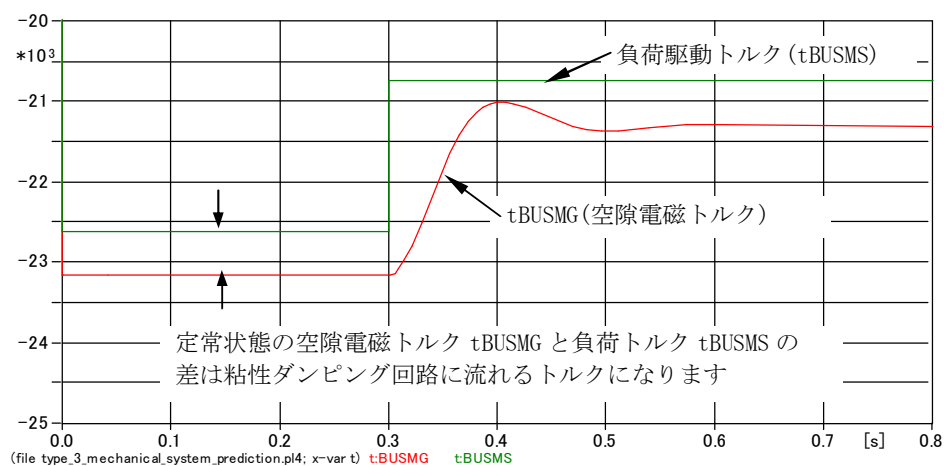


Fig. 6.9-1 空隙電磁トルク tBUSMG と負荷駆動トルク tBUSMS のプロット

もしこの誘導電動機が-2 % slip で誘導発電機として運転されれば tBUSMG と tBUSMS の大小関係は逆転し、空隙電磁トルク tBUSMG < 誘導電動機駆動トルク tBUSMS になります。誘導発電機運転時の tBUSMG と tBUSMS を下図に示します。
(誘導発電機の時とはトルク極性が+で出力されます。)

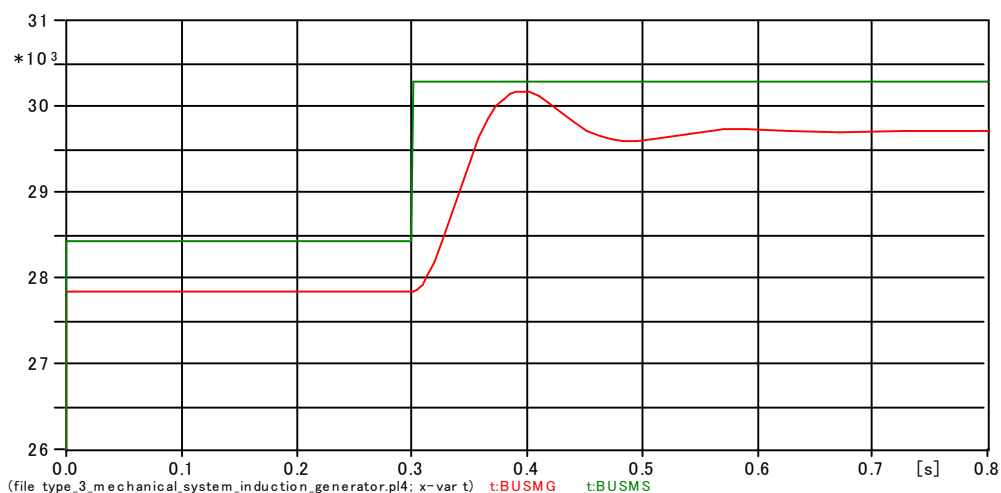


Fig. 6.9-2 誘導発電機運転時は tBUSMG < tBUSMS

6.10 負荷駆動トルク tBUSMS について

負荷を駆動するトルクは Fig. 5.-1 でノード BUSMS と BUSMG を結ぶ回路電流として表れます。この回路電流は空隙電磁トルクから粘性ダンピングトルクおよび慣性モーメントトルクを差し引いた電流になります。この回路の電流は Measuring switch のノード BUSMS に付けた TACS Probe で検出され、その検出された信号は tBUSMS で、これが負荷駆動トルクになります。

下図に tBUSMS の Plot を示します。

0～0.3 sec. 間は phasor 解の-22610 (Nm)の負荷駆動トルクで、0.3 sec.以降は+1872(Nm)の Step down torque 信号が生きたので負荷駆動トルクは-22610 (Nm)から Step 状に減少し-20738 (Nm)になります。
-20738 (Nm)は電流源 1 の定常解-22610 (Nm)に Step down torque+1872(Nm)が重畳した結果です。

このことは次のことを示しています。

電流源 1 の大きさのシミュレーション中の挙動については一見したところ謎めいていますがこの例題により電流源 1 の大きさはシミュレーションの結果、過渡状態でも Phasor 解の値に留まることが明らかです。

このことは一般の負荷特性の場合でも成立します(第 8.3.6 項を参照ねがいます)。

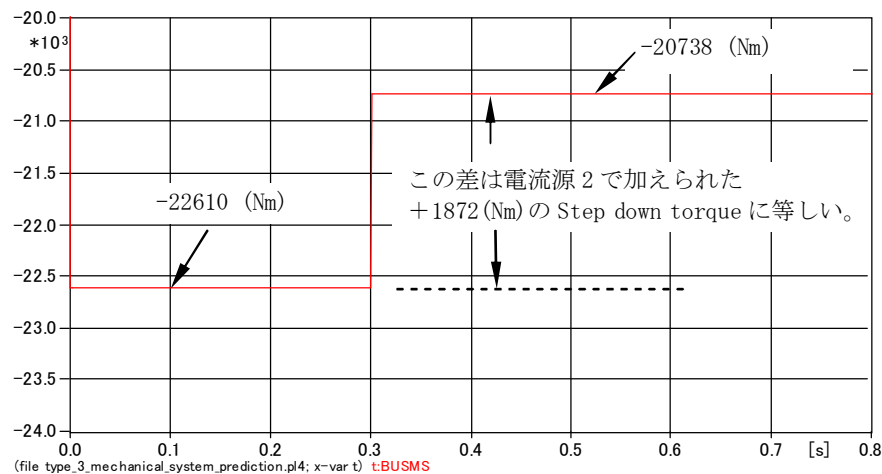


Fig. 6.10-1 負荷駆動トルク tBUSMS のプロット

6.11 機械系統ブランチの合計電流 tTTRQ

さて上記で粘性ダンピングトルク tDAMP の波形、慣性モーメントの放出トルクの波形 tINERT、負荷駆動トルクの波形 tBUSMS が求められたので、今度はこれらの各波形を重畳させた波形と空隙電磁トルク波形の関係を見てみます。

これらの波形を重畳させた波形は tTTRQ です。この tTTRQ と空隙電磁トルクである tBUSMG 及び TQGEN をプロットすると Fig. 6.11-1 の如く 3 者は一致します。

このことは粘性ダンピングトルク、慣性モーメントトルク、負荷駆動トルクの合計が空隙電磁トルクに等しいことを示すとともに、空隙電磁トルクが機械系の各ブランチに tDAMP, tINERT, tBUSMS の電流を流すことも示しています。

このことは(3)式のとおり結果になっています。

また、ノード BUMS と初期化端子 BUSM が接続されていますがこの接続回路には電流が流れないことも示しています。

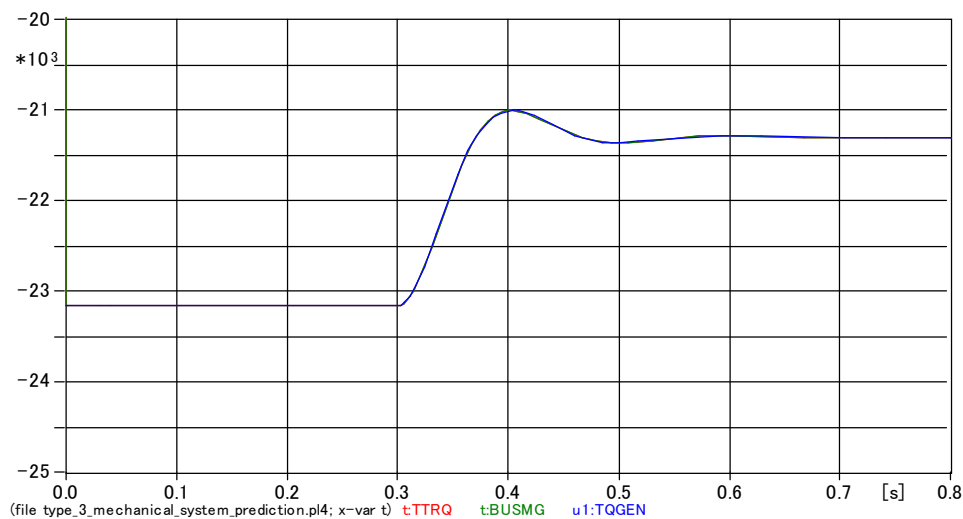


Fig. 6.11-1 ブランチ電流の合計電流 tTTRQ と空隙電磁トルク tBUSMG, TQGEN は一致する

6.12 この例題の負荷のトルク特性

この例題の負荷トルク特性がどうなっているのか述べておきたいと思います。

この例題は 0.3 sec. で+1872(Nm)の電流源 2 を生かし、これを定常状態の負荷トルクに重畳させ、結果として負荷駆動トルクを Step 状に小さくすると言う負荷特性になっています。これが考慮されている唯一の負荷特性で、これ以外の負荷トルク特性、例えば角速度の二乗に比例する負荷トルク特性は本例題では存在しないものとして考慮されていません。

電流源 2 の代わりにここに TACS 電流源を接続し、この接続ノードに TACS で記述した負荷特性を接続すれば任意の負荷特性を模擬できます。

任意の角速度－トルク特性を考慮することは容易で、その一例として角速度の二乗に比例する負荷トルク特性の例を第 8 項に示します。

6.13 この例題の電源スイッチについて

この例題の電源 SW は設けておらず、誘導電動機は計算開始時点で電源に直接接続されています。この例題では TACS で記述したトルク特性などの TACS 回路が無いため、これで支障なくシミュレーションできますが、もし、TACS 回路がある場合は最初から U. M. を電源に接続しておくとし、正しいシミュレーションができません。

正しいシミュレーションをさせるためには第 8、10、12 項の如く電源 SW を設け $T_{close} > 0$ で電源を投入する必要があります。

7. 例題 2—無負荷起動シミュレーション

7.1 検討対象回路

二番目の例題は無負荷起動シミュレーションです。この Project File、Type_3_Mech_Sys_pre_start_with_no_load.acp を以下に示します。

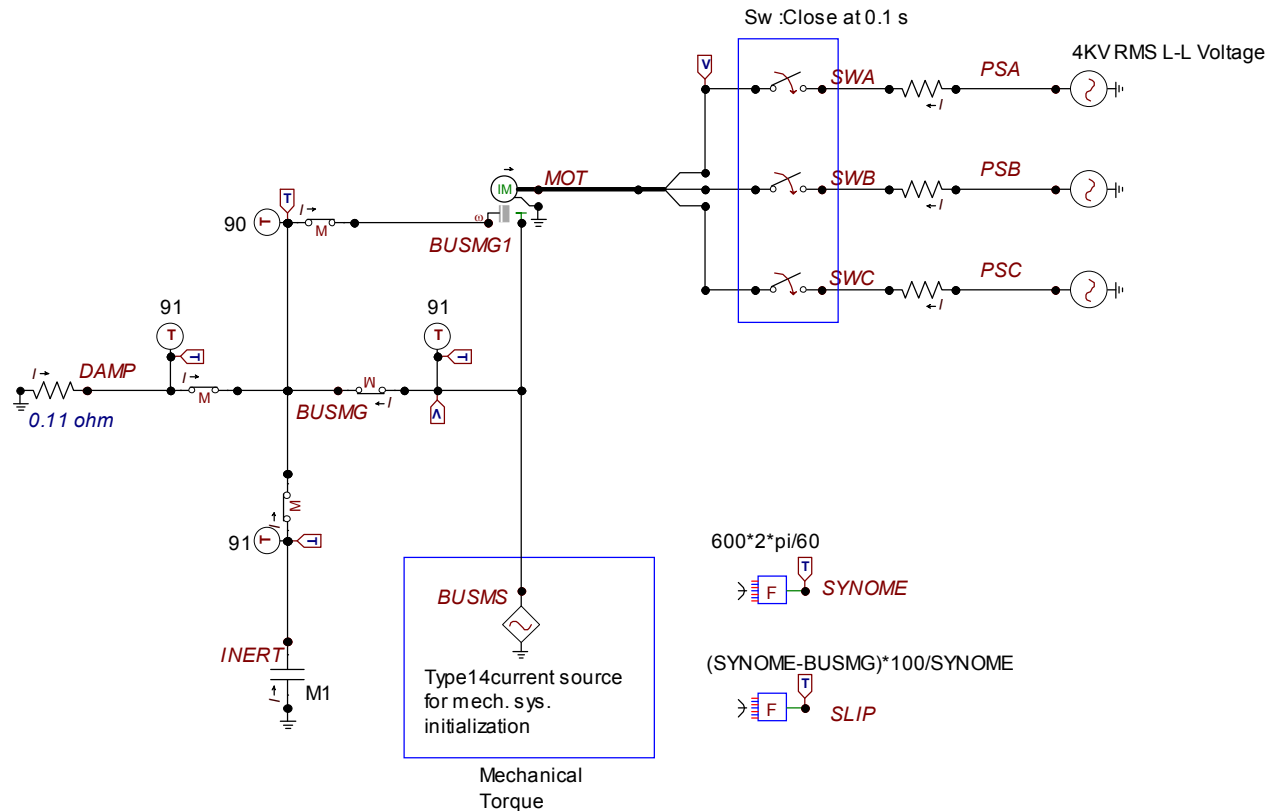


Fig. 7.1-1 無負荷起動シミュレーションの検討回路

Fig. 7.1-1 で $\Rightarrow$ **F** ● で示す Fortran statement の入力内容は Fortran statement アイコンの上部に示す数式を入力しています。

7.2 検討対象回路の説明

この project file は Type_3_Mechanical_System_prediction.acp より内容を一部変更したものです。変更点は次のとおりです。

- 1) 全電圧直入起動をさせるために 0.1 sec. で閉じる電源スイッチをノード SW と MOT の間に設けた。
- 2) U. M. のすべり初期値を 100%に変更した。
- 3) STEP DOWN TORQUE の電流源 2 を削除した。これにより外部から軸系に働くトルクは 0 になります。
- 4) BUSMG の 91 を 90 に変更し電圧(角速度)検出するようにした。
- 5) 同期角速度 tSYNOME とすべり tSLIP を算出する TACS 演算回路を設けた。
- 6) 起動時間が無負荷で短くなるので計算時間を 3sec. に変更

起動シミュレーションをする場合、電源投入用スイッチを設け、本例のように $T_{close} > 0$

にしておきます。Tclose = -1 にしておくと U.M. の初期条件ですべり 100%を指定しているのでロータが拘束状態で運転される時のシミュレーションになってしまいます。

7.3 シミュレーション結果

7.3.1 電機子電流

代表して A 相電流を示します。

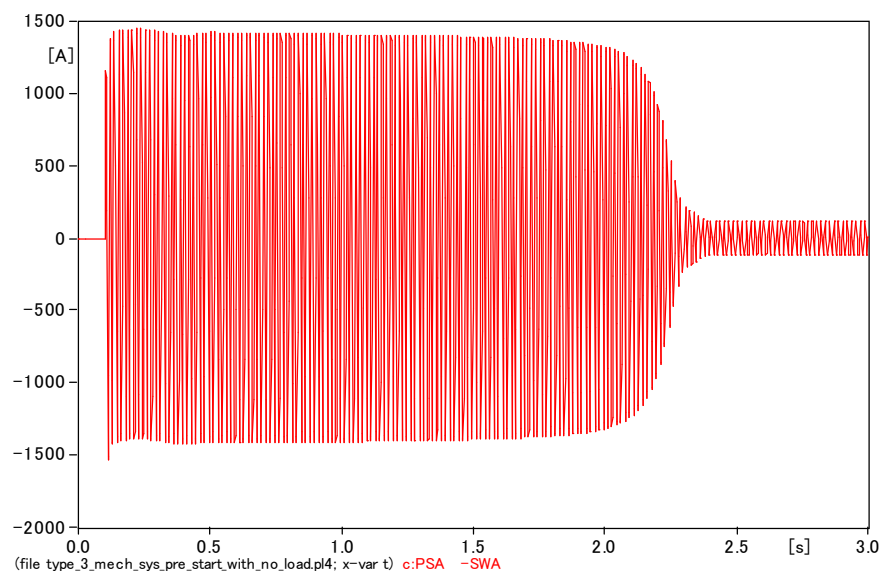


Fig. 7.3.1-1 A 相電機子電流

Fig. 7.3.1-1 の 2.0～2.5 SEC. 間の拡大図を下図に示します。

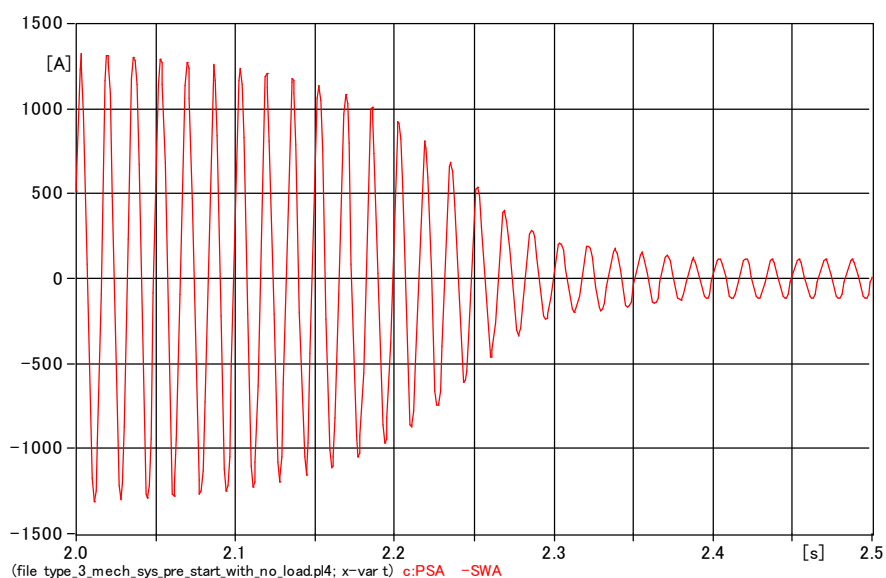


Fig. 7.3.1-2 A 相電機子電流の拡大図

7.3.2 角速度

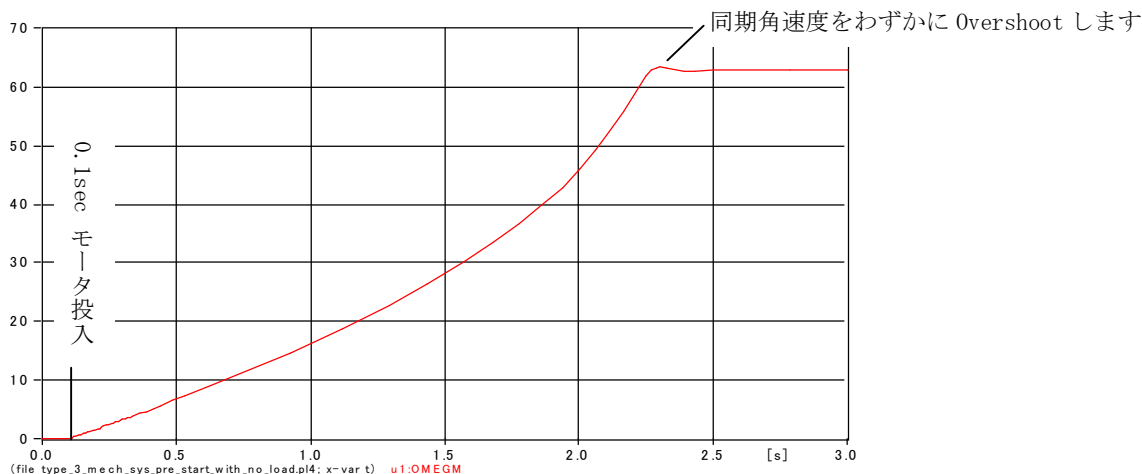


Fig. 7.3.2-1 無負荷起動時の回転角

2.3 sec. 近傍で角速度は無負荷状態のため反抗トルクが小さく同期角速度を僅かに Overshoot し、Ns=600 rpm に対し 604.7 回転まで上がりますが誘導発電機になるため減速トルクが 7.3.3 項に示すように働き同期角速度以下に落ち着きます。

7.3.3 空隙電磁トルク

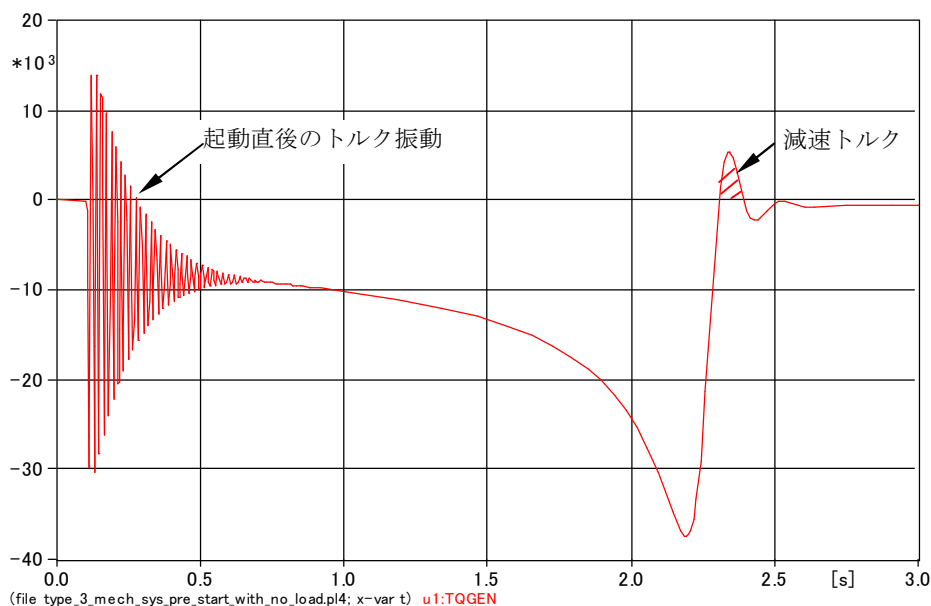


Fig. 7.3.3-1 空隙電磁トル

起動直後のトルク振動は Air gap 中に捉えられた電機子電流の過渡直流分磁束によるものです。電機子巻線に流れる起動電流には交流分のほか、過渡直流分電流が含まれます。

三相交流分電流が回転磁界を発生させるのと同じ理由で三相中に含まれる過渡直流分電流も空隙中に静止した直流分磁界(Trapped DC magnet field)を発生させます。

この直流分磁界とロータ巻線で作られる回転磁界の相互作用でこの過渡振動トルクが発生しています。直流分電流は回路抵抗により減衰し0になるので直流分磁界、したがって過渡振動トルクも時間と共に減衰します。

この過渡振動は実際に発生するものですが測定器の応答が遅いとこの振動は観測されません。

2.3 sec. 近傍で同期角速度を超え誘導発電機になるため減速トルクが働きます。

減速トルクが働いた結果角速度は低下するため今度は加速されるというように振動しながらトルクは推移していきます。

最終的に落ち着くトルク値は Fig. 7.3.3-2 の拡大図に示すようにダンピングトルクに等しくなります。

このようになる理由は 1) 慣性モーメントトルクは減衰して0になり、2) 負荷駆動トルクも0としているため、空隙電磁トルクはすべてダンピング回路に流れるからです

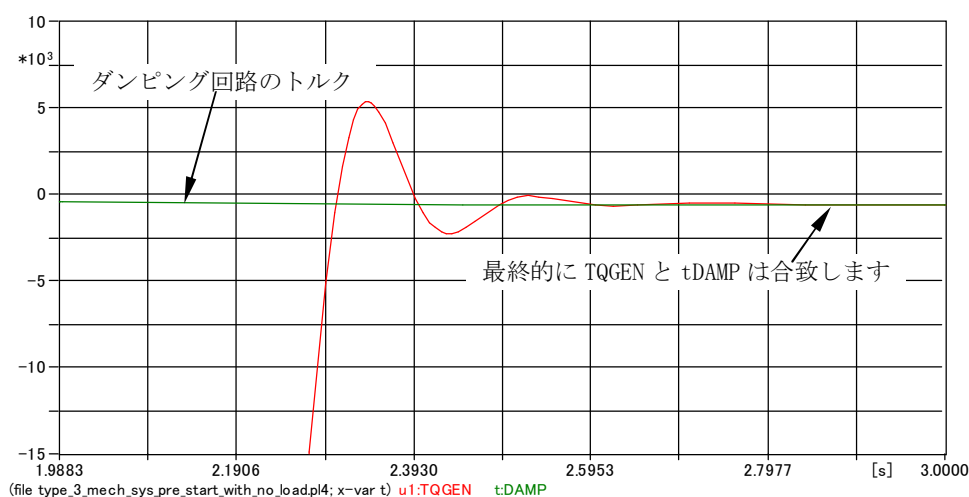


Fig. 7.3.3-2 無負荷起動後の空隙電磁トルクと粘性ダンピングトルク

7.3.4 すべり

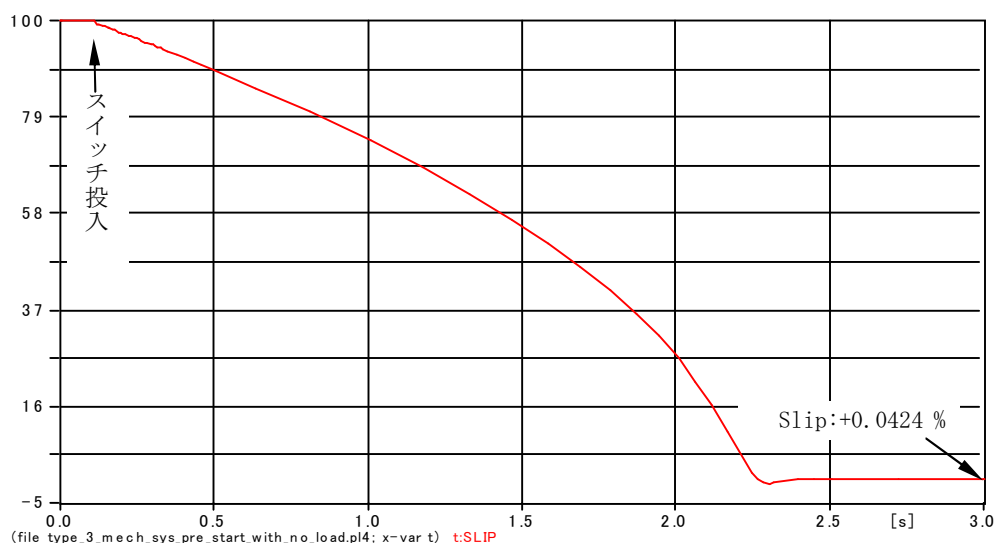


Fig. 7.3.4-1 無負荷起動時のすべり

7.3.5 負荷駆動トルク tBUSMS

電流源から供給される負荷駆動トルクはシミュレーション期間中下図の如く無負荷状態として
いるので0で推移します。

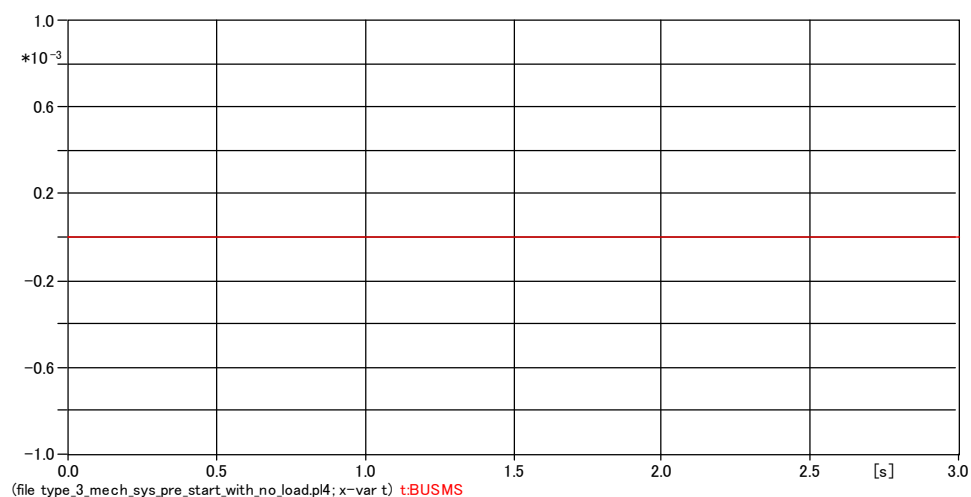


Fig. 7.3.5-1 無負荷起動時の負荷駆動トルク tBUSMS

7.3.6 T-S カーブを描かせる方法

プロジェクトファイル Type_3_Mech_Sys_pre_start_with_no_load.acp でトルクとすべりが求められるので、これから Torque-Speed 曲線を描かせる方法を紹介します。
PlotXWin を使って Torque-Speed 曲線を描かせる方法は次のとおりです。

最初に Allow Multiple Files の状態では描けないので次のようにして Allow Multiple Files を解除しておきます。

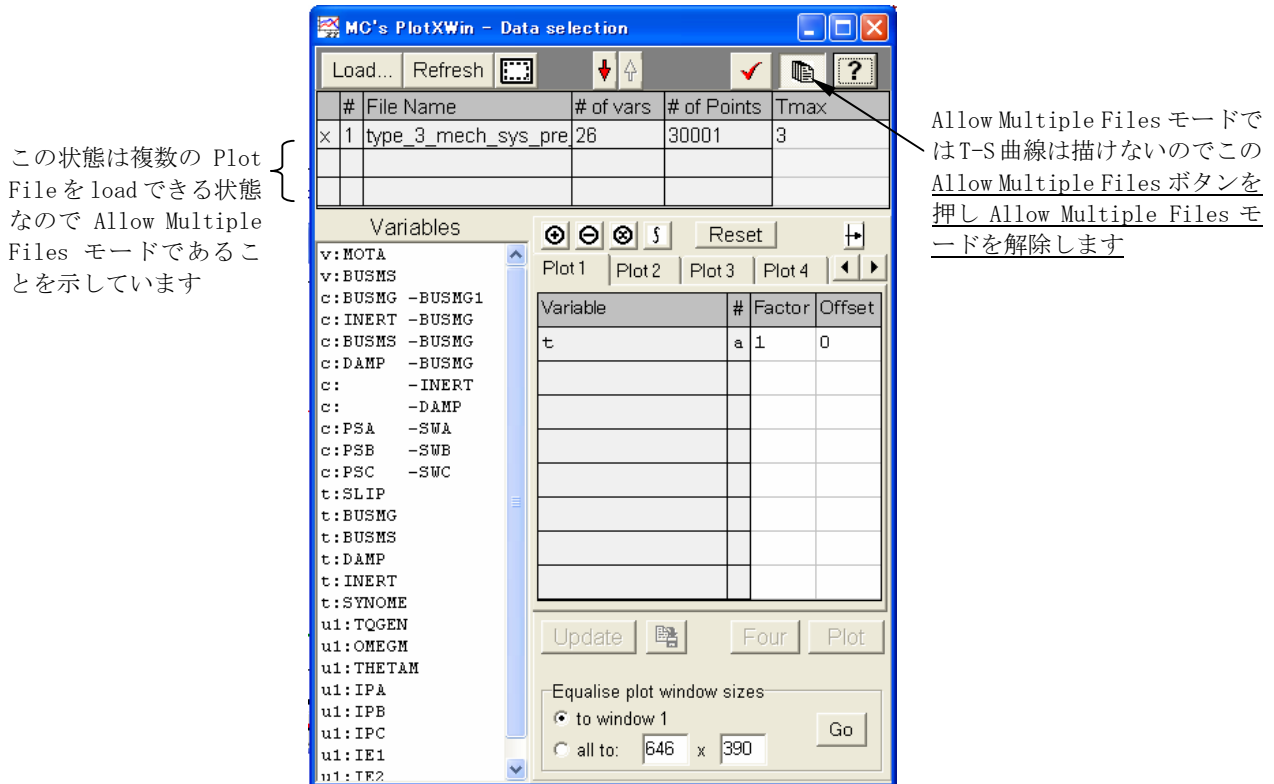


Fig. 7.3.6-1 PlotXwin の Allow Multiple File モードの解除方法

PlotXWin の画面は Fig. 7.3.6-2 に示すように Default で X 軸には時間 t が割り当てられています。

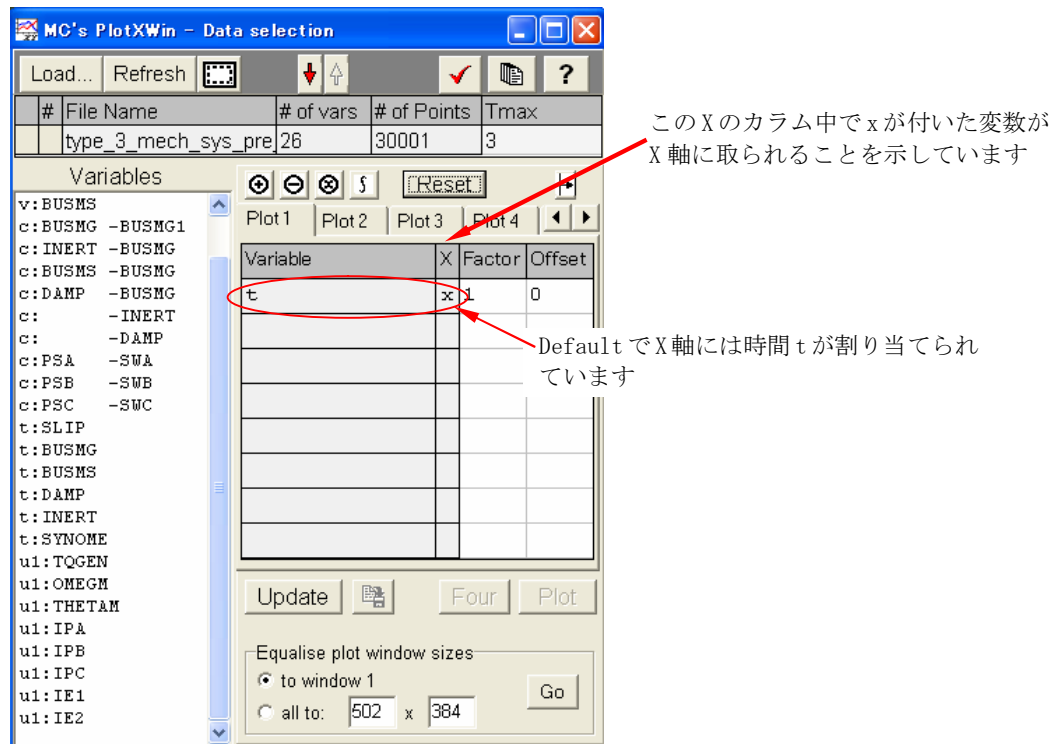
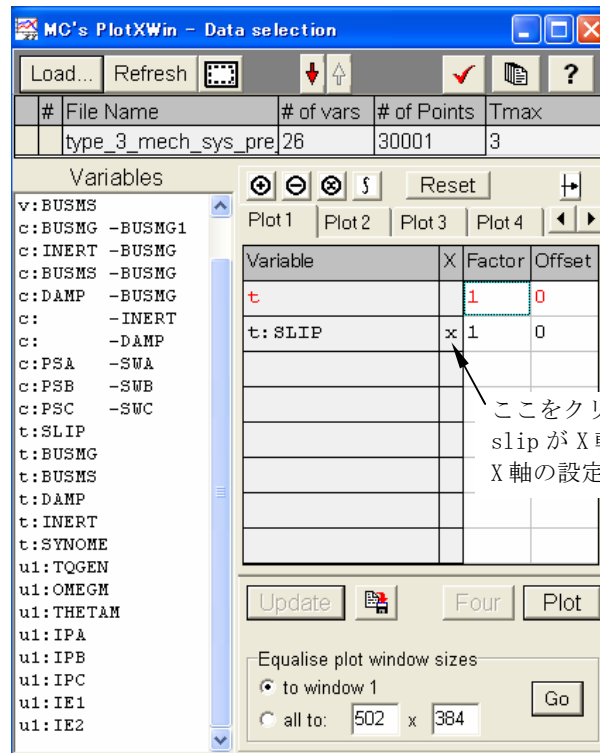


Fig. 7.3.6-2 PlotXWin は Default で X 軸には時間 t が割り当てられている

X 軸をすべりとするため、Fig. 7.3.6-3 のように TACS 出力 SLIP を選択した上で、t:SLIP 行の X 欄をクリックすれば Fig. 7.3.6-3 のように SLIP が X 軸に選定されると共に、デフォルトの時間が X 軸であることが解除されます。



ここをクリックすればこの図のとおり X が入力され、slip が X 軸に設定されます。同時に Default の t が X 軸の設定は解除されます。

Fig. 7.3.6-3 X 軸にすべりをセットする

これで X 軸を SLIP にできたので次に Torque である TQGEN を Fig. 7.3.6-4 のごとく選択します。これで Y 軸に TQGEN がセットされるので Plot ボタンを押せば X 軸がすべり、Y 軸がトルクとなった T-S カーブが描けます。

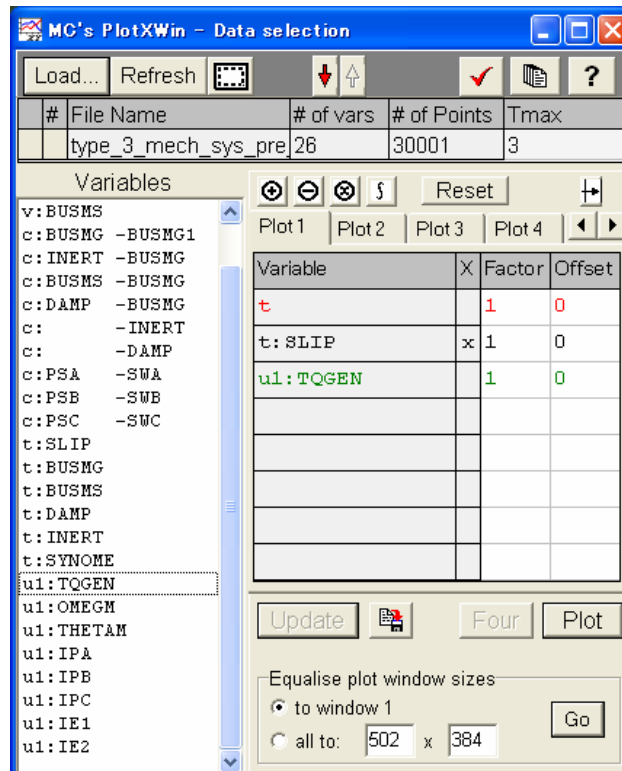


Fig. 7.3.6-4 T-S 曲線を描かせる方法

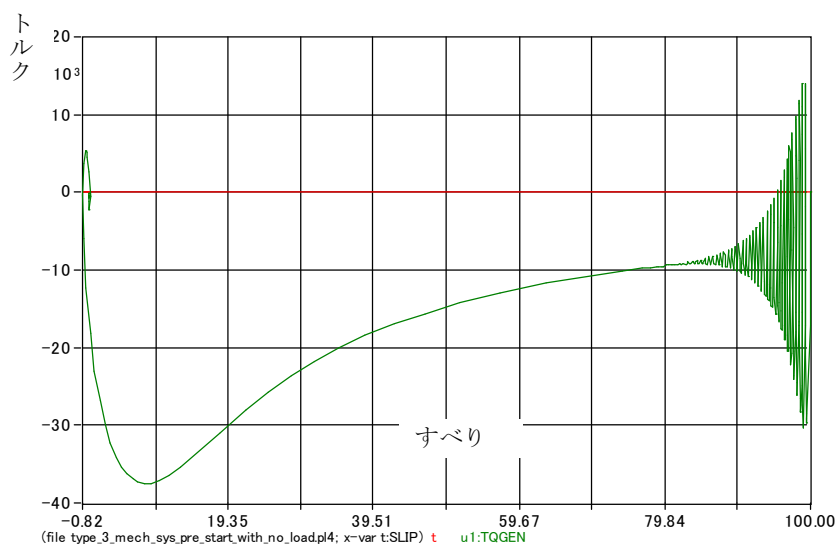


Fig. 7.3.6-5 描かれた T-S 曲線

Fig. 7.3.6-5 のすべり 0 付近を拡大すると T-s 曲線は Fig. 7.3.6-6 のようになっています。
 この説明は次のとおりです。
 無負荷状態での起動で負荷が軽いいため角速度は一時的に同期角速度を上回りマイナスのすべりになり (A-B)、この状態は誘導発電機運転になるため+の減速トルクが働きます (B-D)。
 誘導発電機運転になると減速トルクのため、すべりは+の値に復帰します (C-D-E)。
 D 点を過ぎると誘導電動機運転になるため負荷トルクは元のマイナスの値に復帰します (D-E)。

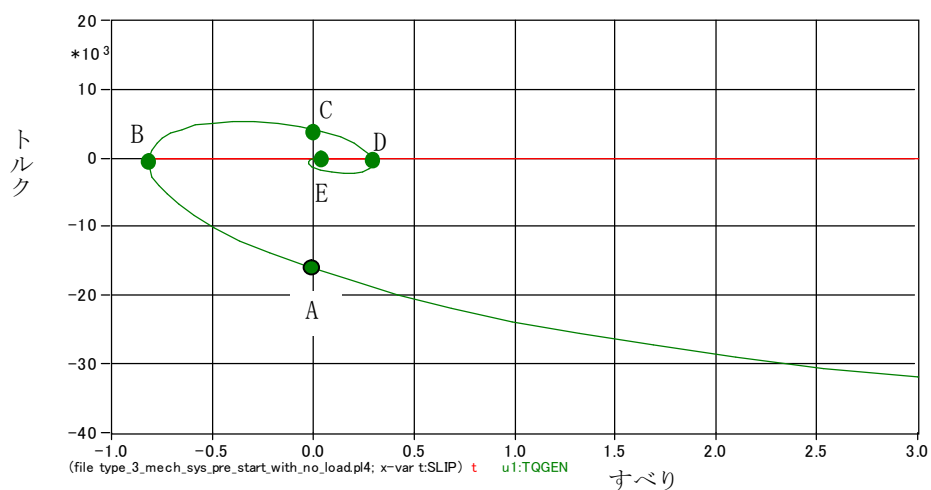


Fig. 7.3.6-6 T-S 曲線のすべり 0 付近の拡大図

ところで、この図の E 点の部分をもっと拡大するとすべりの曲線と TQGEN の曲線が Fig. 7.3.6-7 の如く交わっていないことがわかります。

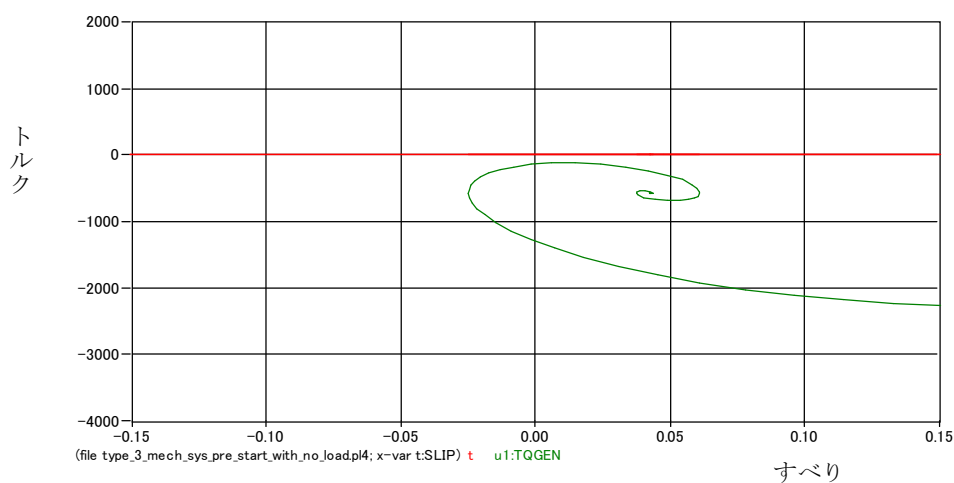


Fig. 7.3.6-7 E 点部分の更なる拡大

これはダンピング回路があるため、TQGEN とすべりを時間軸ベースで表すと Fig. 7.3.6-8 の如くダンピング回路があるため両者が一致しないためです。

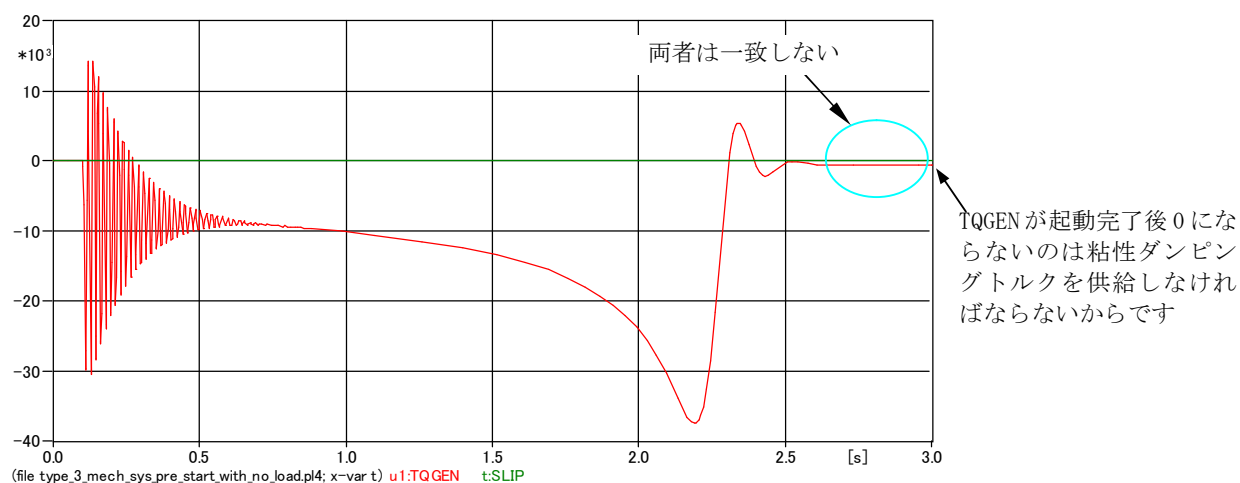


Fig. 7.3.6-8 粘性ダンピングを考慮している場合時間軸を X 軸にして TQGEN とすべりを描くと、両者は起動完了後一致しない

もしダンピング回路を削除すれば時間軸で表した TQGEN と SLIP は下図の如く一致し、

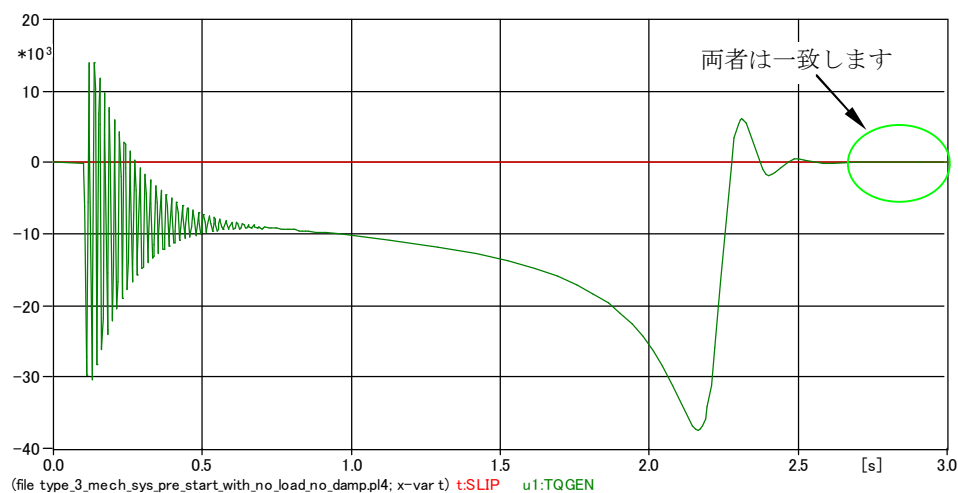


Fig. 7.3.6-9 粘性ダンピング回路を削除すれば起動完了後トルクとすべりは 0 になり
両者は一致します

T-S 曲線も下図の如く一致します。

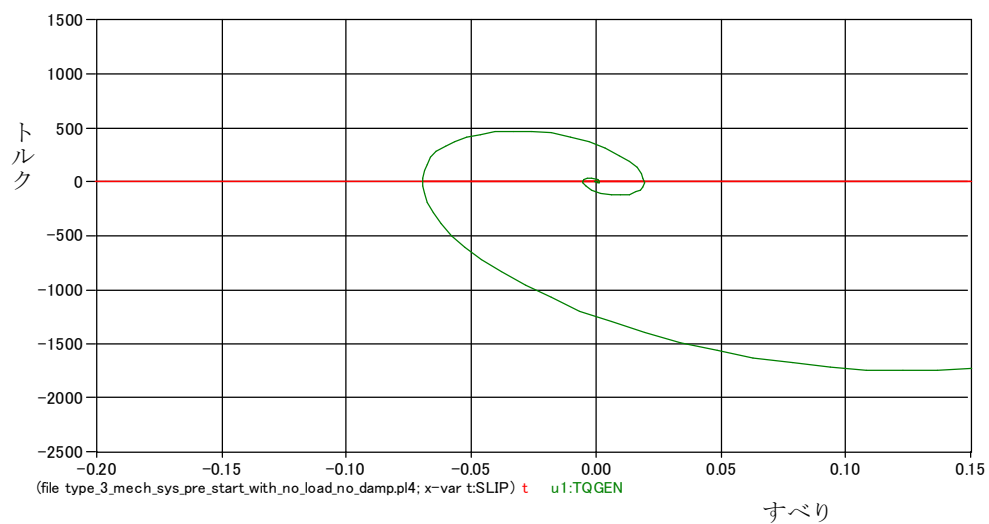


Fig. 7.3.6-10 粘性ダンピング回路を削除すれば起動完了後トルクとすべりは
一致します

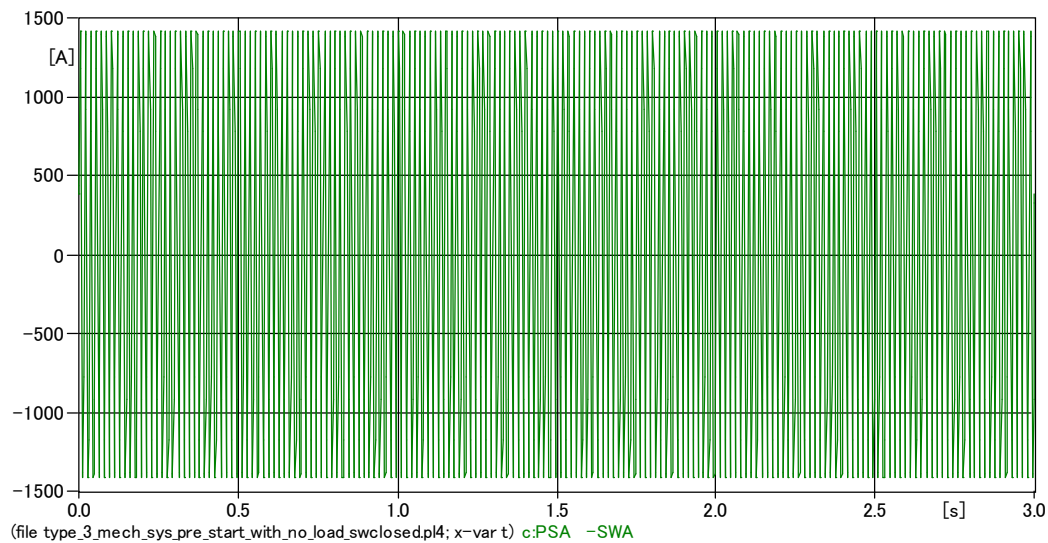
7.3.7 電源 SW を最初から閉じた状態にした時のシミュレーション

U. M. にすべり 100%を指定していても電源 SW の $T_{close}=-1$ ではロータ拘束状態のシミュレーションになり、 $T_{close}>0$ では起動シミュレーションになります。

以下に $T_{close}>0$ の Type_3_Mech_Sys_pre_start_with_no_load.acp と $T_{close}=-1$ の Type_3_Mech_Sys_pre_start_with_no_load_swclosed.acp の A 相電機子電流、角速度、TQGEN の比較を示します

7.3.7.1 A 相電機子電流の比較

電源 SW の $T_{close}=-1$ のケースではすべり 100%の状態が持続し起動電流がシミュレーション期間中持続して流れる結果になります。



$T_{close}=0.1$ SEC. で SW が閉じられる時は 100%すべりの状態から起動シミュレーションが行われます。

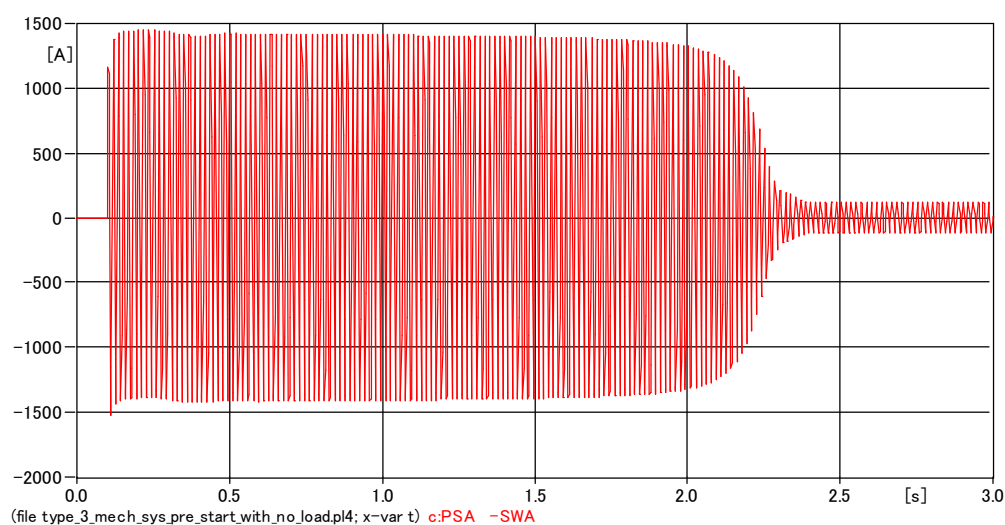
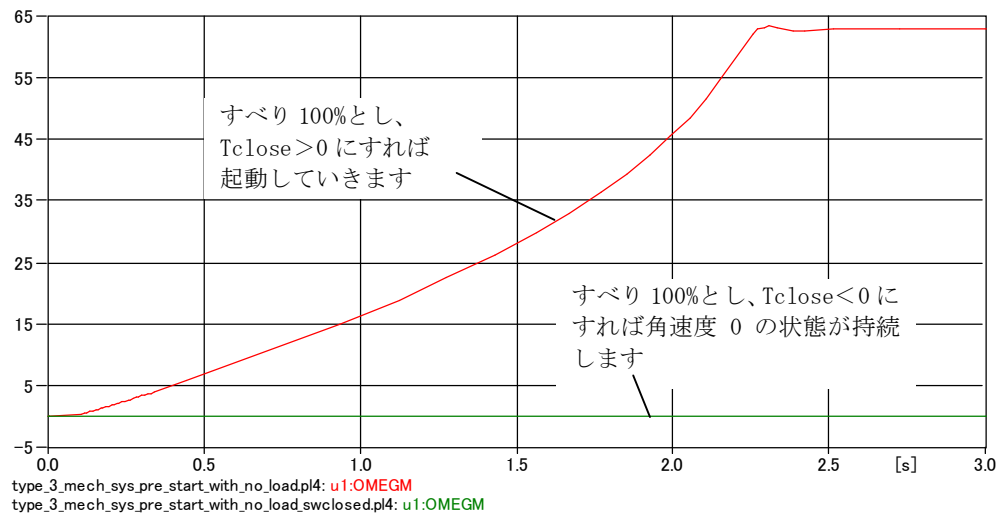
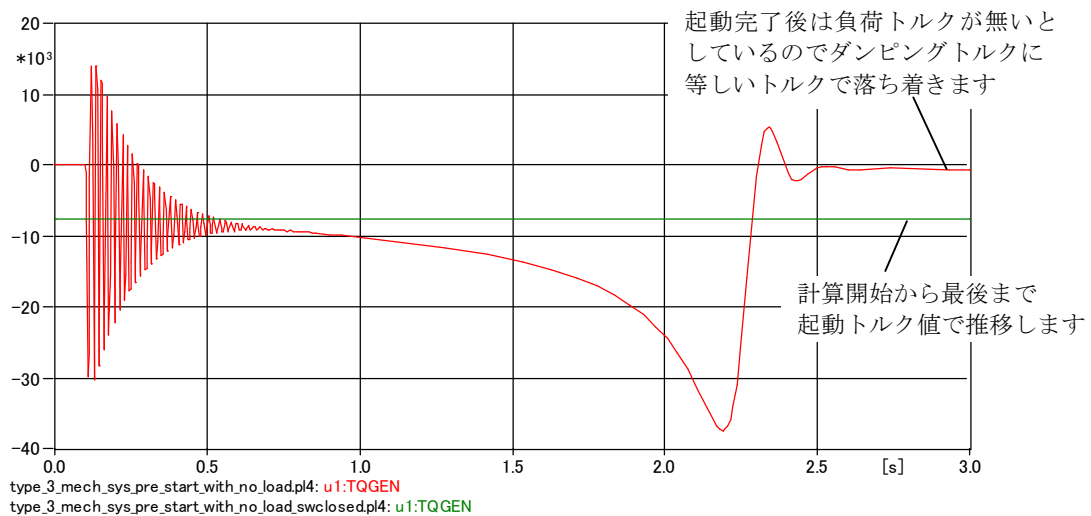


Fig. 7.3.7.1-1 SW の $T_{close}>0$ 時の電機子電流

7.3.7.2 角速度の比較



7.3.7.3 TQGEN の比較



以上の如く電源 SW の Tclose > 0 とすれば起動シミュレーションが行われ、電源 SW の Tclose = -1 ではロータが拘束された状態(すべり 100%)のシミュレーションが行われます。

なぜ電源 SW の Tclose = -1 と Tclose > 0 で上述のシミュレーションになるのか、Lis ファイルを調べると次のようになっています。

Tclose=-1 のケース

Time step loop の t=0.0 sec. で U. M. の諸量は 100%すべりから算出される値に初期化されるのでこの状態が継続します。

Step	Time	MOTA	BUSMS	BUSMG BUSMG1	INERT BUSMG	BUSMS BUSMG	DAMP BUSMG	TERRA INERT	TERRA DAMP	PSA SWA	PSB↓ SWB↓
		PSC SWC	TACS SLIP	TACS BUSMG	TACS BUSMS	TACS DAMP	TACS INERT	TACS SYNOME	UM-1 TQGEN	UM-1 OMEGM	UM-1↓ THETAM↓
		UM-1 IPA	UM-1 IPB	UM-1 IPC	UM-1 IE1	UM-1↓ IE2↓					
***		Phasor I(0) = -7.6588425E+03			Switch "BUSMG "	to "BUSMG1"	closed in the steady-state.↓				
***		Phasor I(0) = 0.0000000E+00			Switch "INERT "	to "BUSMG "	closed in the steady-state.↓				
***		Phasor I(0) = -7.6588425E+03			Switch "BUSMS "	to "BUSMG "	closed in the steady-state.↓				
***		Phasor I(0) = 0.0000000E+00			Switch "DAMP "	to "BUSMG "	closed in the steady-state.↓				
***		Phasor I(0) = -3.8201777E+02			Switch "MOTA "	to "SWA "	closed in the steady-state.↓				
***		Phasor I(0) = 1.3740607E+03			Switch "MOTB "	to "SWB "	closed in the steady-state.↓				
***		Phasor I(0) = -9.9204298E+02			Switch "MOTC "	to "SWC "	closed in the steady-state.↓				
0	0.0	3264.06991	0.0	-7658.8425	0.0	-7658.8425	0.0	0.0	0.0	382.017769	-1374.0607↓
		992.042979	100.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-7658.8425	0.0	.261799388↓
		-382.01777	1374.06075	-992.04298	1601.70764	-458.76646↓					
500	.05	3264.07017	-.18315E-3	-7657.5921	1.24874447	-7658.8425	.001665008	1.24874447	.001665008	381.96544	-1373.9766↓
		992.011162	100.000291	-.18315E-3	-7658.8425	.001665008	1.24874447	62.8318531	-7657.5921	-.18315E-3	.261795124↓
		-381.96544	1373.9766	-992.01116	1601.61629	-458.74453↓					

Tclose>0 のケース

U. M. は 0.0 sec. で初期化を受けますが電源 SW が入っていないため電源が入っていない状態の値に初期化され電源 SW が入るまでこの状態が継続します。電源 SW が投入され、U. M. に電圧がかかると起動して行きます。

Step	Time	MOTA	BUSMS	BUSMG BUSMG1	INERT BUSMG	BUSMS BUSMG	DAMP BUSMG	TERRA INERT	TERRA DAMP	PSA SWA	PSB↓ SWB↓
		PSC SWC	TACS SLIP	TACS BUSMG	TACS BUSMS	TACS DAMP	TACS INERT	TACS SYNOME	UM-1 TQGEN	UM-1 OMEGM	UM-1↓ THETAM↓
		UM-1 IPA	UM-1 IPB	UM-1 IPC	UM-1 IE1	UM-1↓ IE2↓					
***		Phasor I(0) = 0.0000000E+00			Switch "BUSMG "	to "BUSMG1"	closed in the steady-state.↓				
***		Phasor I(0) = 0.0000000E+00			Switch "INERT "	to "BUSMG "	closed in the steady-state.↓				
***		Phasor I(0) = 0.0000000E+00			Switch "BUSMS "	to "BUSMG "	closed in the steady-state.↓				
***		Phasor I(0) = 0.0000000E+00			Switch "DAMP "	to "BUSMG "	closed in the steady-state.↓				
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0↓
		0.0	100.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.261799388↓
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0↓					
1	.1E-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0↓
		0.0	100.	0.0	0.0	0.0	0.0	62.8318531	0.0	0.0	.261799388↓
		n n	n n	n n	n n	n n					

このように Tclose=-1 と Tclose>0 では各々初期化状態が 100%すべり状態、電源が入っていない状態に初期化されたため上述のようにシミュレーションに差が出ます。

もし負荷トルク特性が TACS で模擬されていて、すべり初期値を 100%にし、電源 SW の Tclose=-1 とした場合は第 13 項に示す如く、正しくないシミュレーション結果になるので留意が必要です。

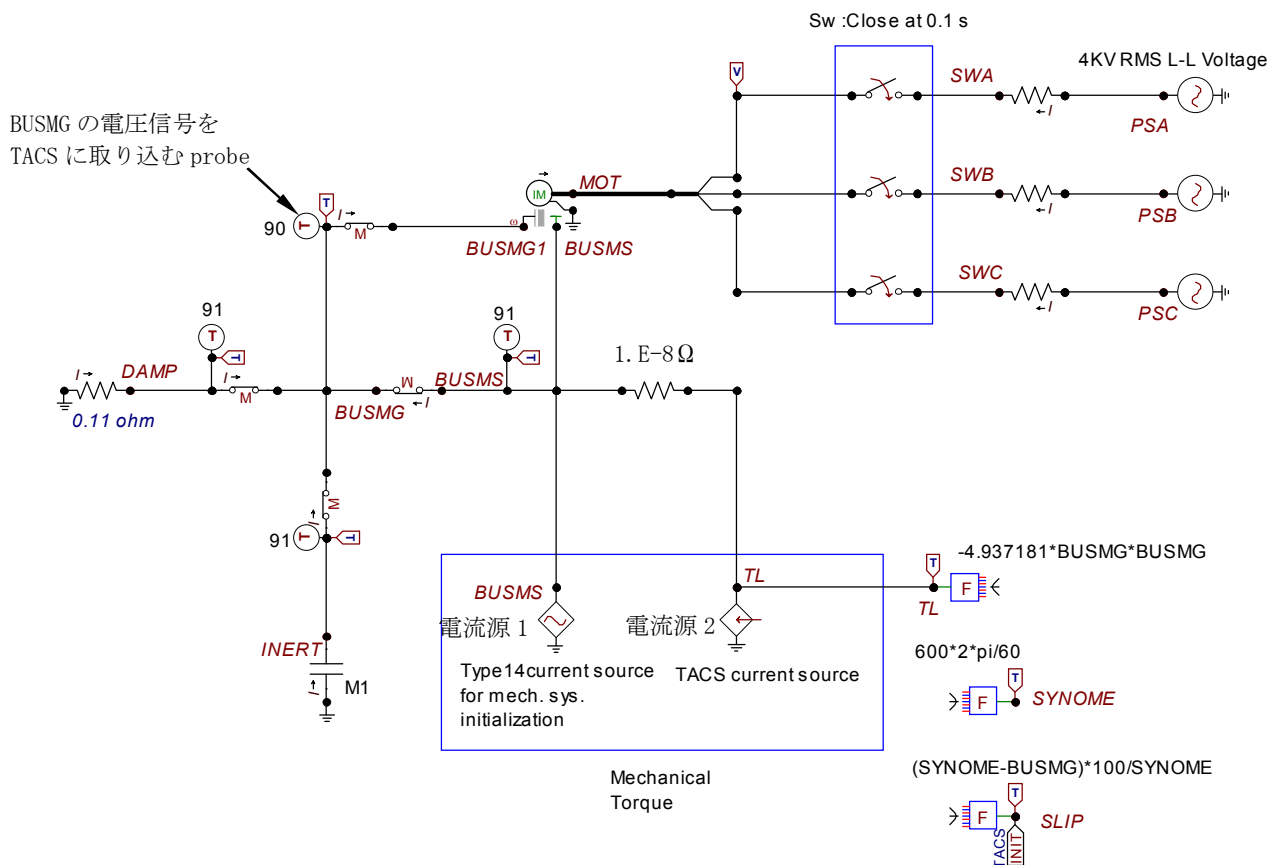
負荷トルク特性が TACS で模擬されていて、すべり初期値を 100%にしてシミュレーションしたい場合は第 12 項のようにします。

8. 例題 3—負荷の角速度—トルク特性を考慮した起動シミュレーション

この例題で負荷トルクが角速度の二乗に比例する負荷トルク特性の模擬方法を説明すると共にこの負荷トルク特性を有する負荷の起動シミュレーションを行います。

8.1 検討対象回路

検討対象回路は下図の Project file ; Type_3_Mech_Sys_pre_start_with_load.acp のとおりです。



8.2 検討対象回路の説明

ノード BUSMS とノード TL 間の $1.E-8$ (Ω) の抵抗はノード BUSMS とノード TL にノード名を分離するために設けています。ノード TL に Fig. 8.1-1 の角速度の二乗に比例する負荷トルクを表す TACS 信号 TL を接続します。

各 Fortran Statement の入力内容は Fortran Statement の上部に示すとおりです。

TL の内容は Fig. 8.1-1 に示す如く、 $-4.937181 \cdot tBUSMG \cdot tBUSMG$ であると設定しています。 $tBUSMG$ は機械系から 90 番の probe で検出した電圧信号でこれは角速度信号です。

TACS の Fortran で演算した負荷トルク TL を Fig. 8.1-1 の如く機械系に設けた電流源 2 の TACS current source に接続すると、この電流源 2 の電流が角速度の二乗特性の振舞いをするようになります。

この電流源の入力内容は次のとおりです。

DATA	UNIT	VALUE
TStart	s	0
TStop	s	1000

NODE	PHASE	NAME
TACS	1	TL

Order: 0 Label:

Comment:

Type of source
☒ Current ☐ Hide
☐ Voltage

NumPh 1

Edit definitions OK Cancel Help

Fig. 8.2-1 電流源 2 の入力内容

TACS 信号 SYNOME は同期角速度信号で、すべりを計算するために設けています。
 SYNOME の計算式は図に示すように $600(rpm) \cdot 2 \cdot \pi / 60$ であり、これは秒速の回転数に $2 \cdot \pi$ (rad) を乗じて 1 sec. あたりの同期角速度を計算しています

TACS 信号 SLIP は Slip の定義式に則り $(SYNOME - BUSMG) \cdot 100 / SYNOME$ を演算させています。

起動シミュレーションなので U. M. の初期条件は 100%すべりにしておきます。
 起動はノード MOT と SW 間のスイッチを計算開始後 0.1 SEC. で投入して起動するようにしています。

8.3 シミュレーション結果

8.3.1 A 相電機子電流

下図赤の Plot が今回の電機子電流です。

参考までに無負荷状態の Type_3_Mech_Sys_pre_start_with_no_load.acp の緑の A 相電流も plot しています。

無負荷状態に比して起動電流が長く流れ、起動後の負荷電流も大きくなっています。

無負荷状態のシミュレーションの計算時間は 3 sec. としているため 3 sec. でプロットが終了しています。

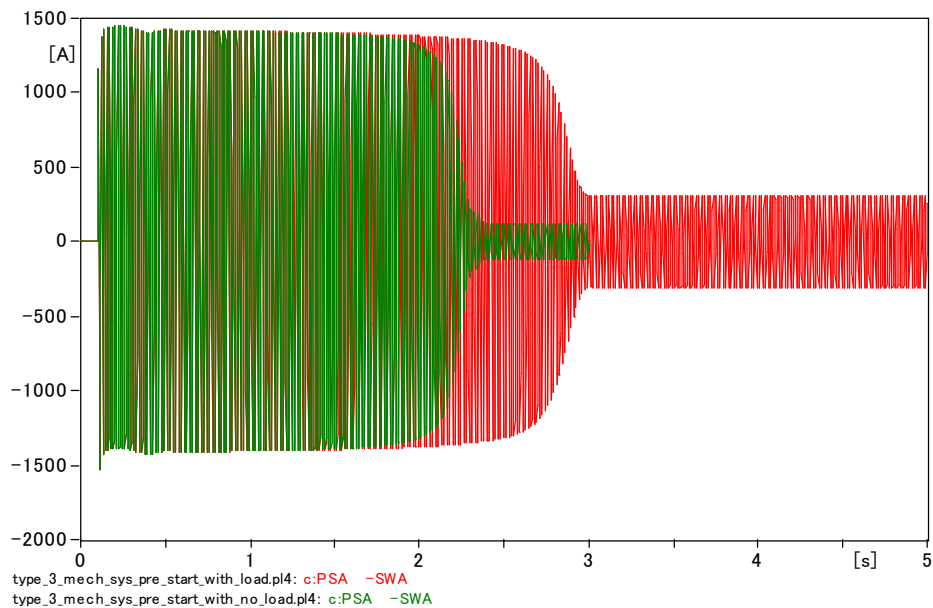


Fig. 8.3.1-1 A 相起動電流

8.3.2 角速度

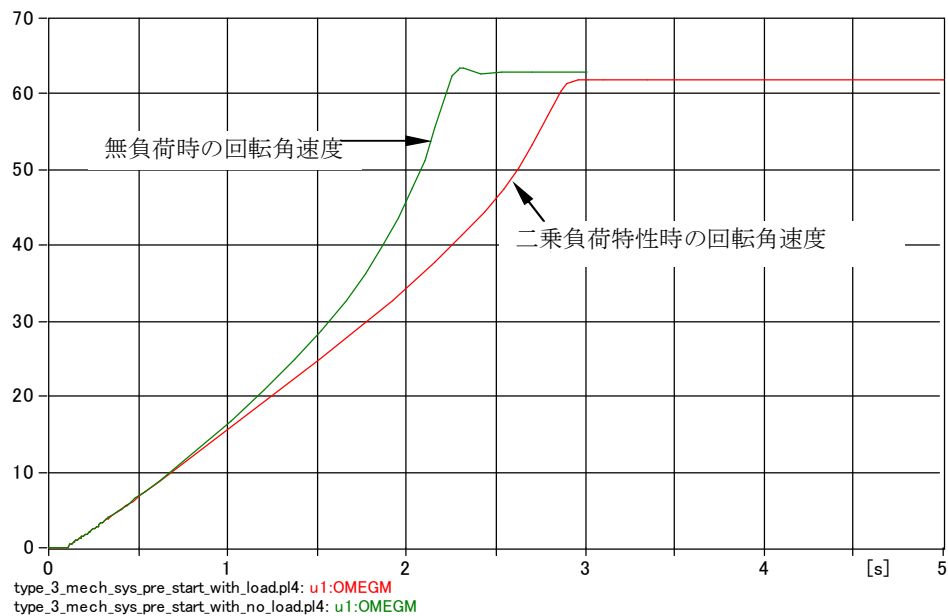


Fig. 8.3.2-1 回転角速度

角速度の二乗に比例するトルクがかかるため角速度上昇は無負荷に比して遅くなっています。

8.3.3 空隙電磁トルク

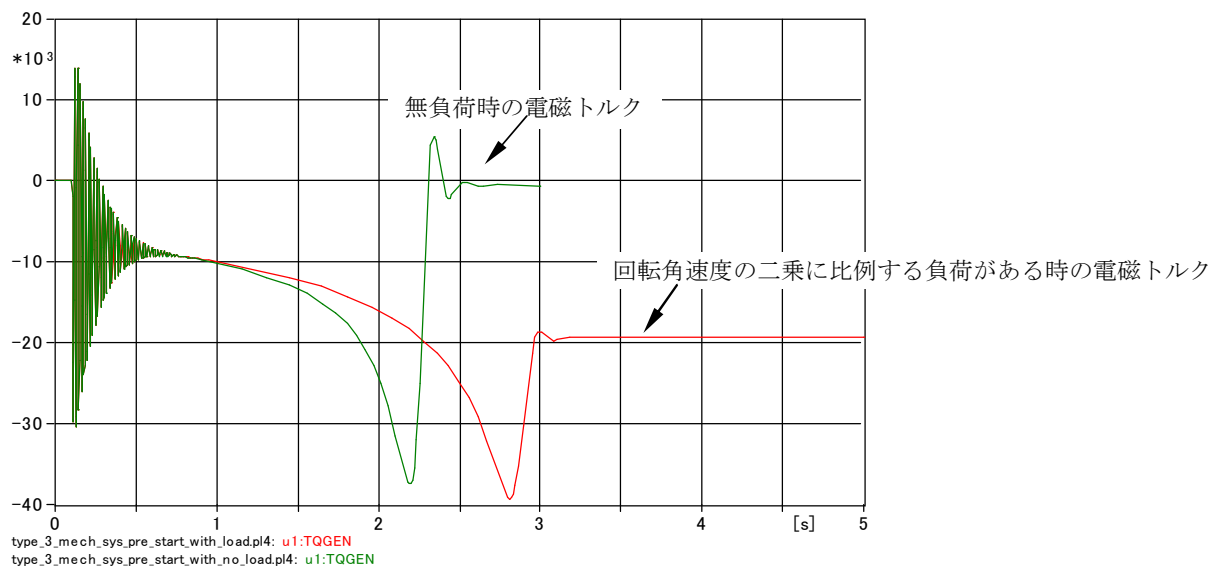


Fig. 8.3.3-1 空隙電磁トルクのプロット

両者でトルク値が異なるのは次項で示すようにすべり値が異なるためです。

8.3.4 すべり

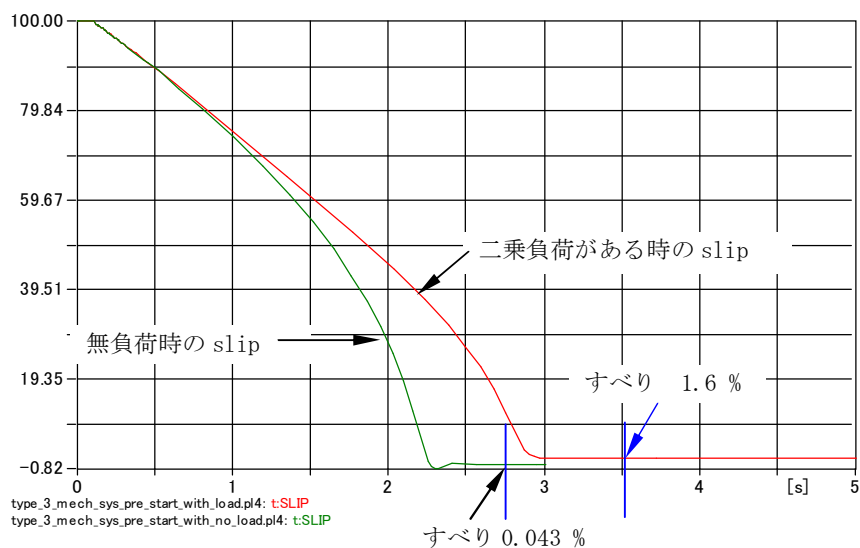


Fig. 8.3.4-1 すべり

8.3.5 T-s カーブ

X 軸にすべりを取り、負荷駆動トルク、空隙電磁トルクを表示すると Fig. 8. 3. 5-1 を得ます。

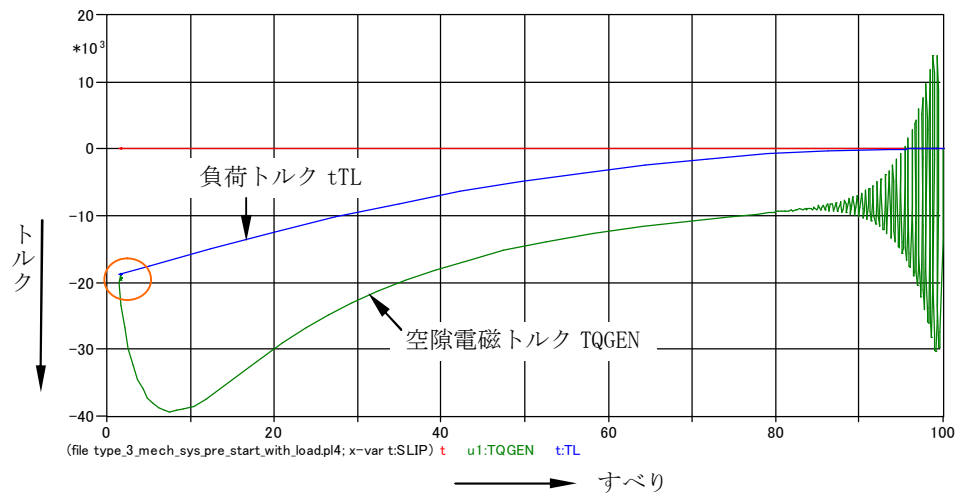


Fig. 8. 3. 5-1 T-S 曲線

Fig. 8. 3. 5-1 の  部を拡大すると、Fig. 7. 3. 6-7 と同じく両者の交点で運転されていません。理由は Fig. 7. 3. 6-8 で示した理由と同じく、定常状態ではダンピング回路があるため負荷トルクと TQGEN が一致しないためです。

この補足説明として Fig. 8.3.5-2 に X 軸に時間を取り、粘性ダンピングトルクを考慮した場合と無視した場合の負荷駆動トルクと空隙電磁トルクのプロットを示します。

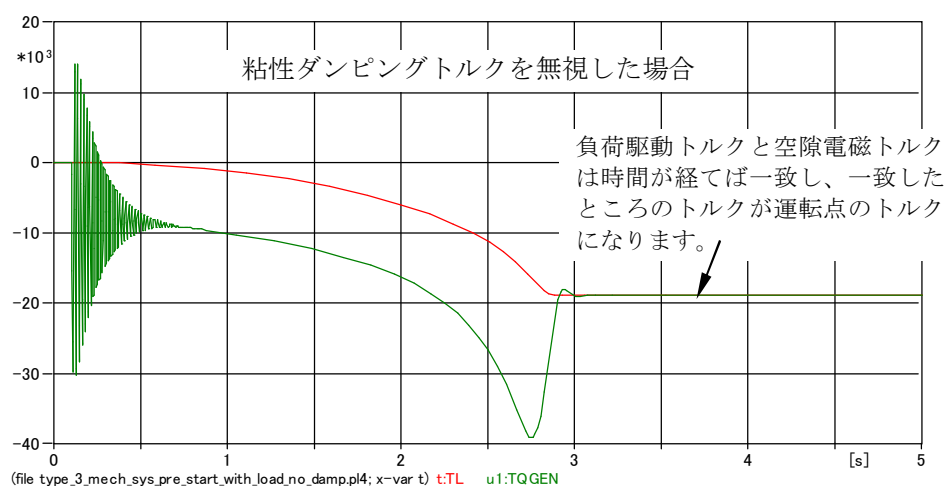
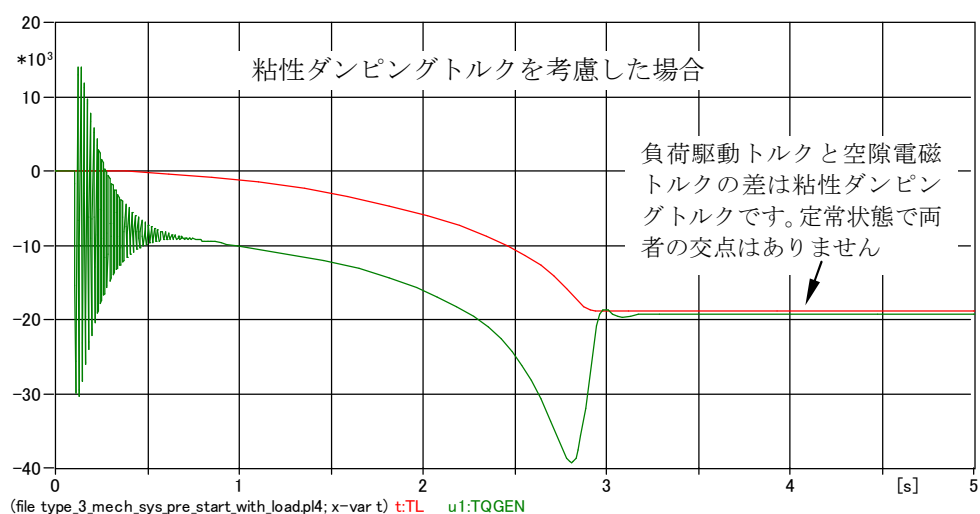


Fig. 8.3.5-2 粘性ダンピングトルクを考慮した場合と考慮しない場合の負荷駆動トルクと空隙電磁トルク

8.3.6 電流源 1 の大きさについての考察

Fig. 8.1-1 の電流源 1 の大きさについて考察してみます。

BUSMS-BUSMG 間のスイッチ電流の Phasor 解は次のとおり 0 です。

Output for steady-state phasor switch currents.↓

Node-K	Node-M	I-real	I-imag	I-magn	Degrees	Power	Reactive↓
BUSMG	BUSMG1	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.0000	0.00000000E+00	0.00000000E+00↓
INERT	BUSMG	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.0000	0.00000000E+00	0.00000000E+00↓
BUSMS	BUSMG	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.0000	0.00000000E+00	0.00000000E+00↓
DAMP	BUSMG	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.0000	0.00000000E+00	0.00000000E+00↓
MOTA	SWA	Open	Open	Open	Open	Open	Open↓
MOTB	SWB	Open	Open	Open	Open	Open	Open↓
MOTC	SWC	Open	Open	Open	Open	Open	Open↓

さらに tTL と tBUSMS をプロットすると次のようにほぼ同じになります。

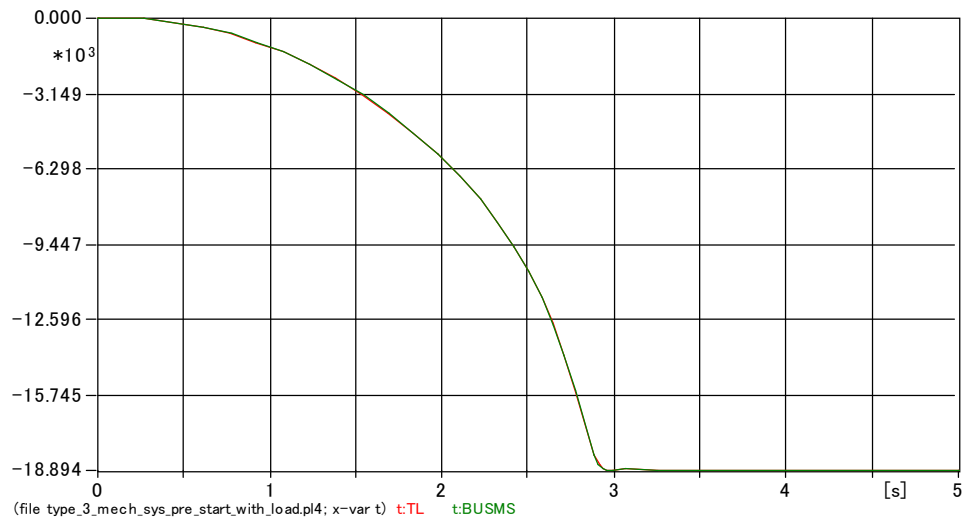


Fig. 8.3.6-1 回転角速度の二乗に比例する負荷トルク tTL と負荷駆動トルク tBUSMS のプロット

このことは TACS の負荷トルクがそのまま BUSMS に表れていることを示し、電流源 1 の大きさはシミュレーション期間中 Phasor 解の値の 0 に近い値に留まっていることを示しています。

上記で「ほぼ同じ」「0 に近い」と述べているのは下記の如く tTL-tBUSMS の演算をさせると Fig. 8.3.6-2 の如く極めて微小な差が表れるからです。
この差が発生する理由は小生には不明です

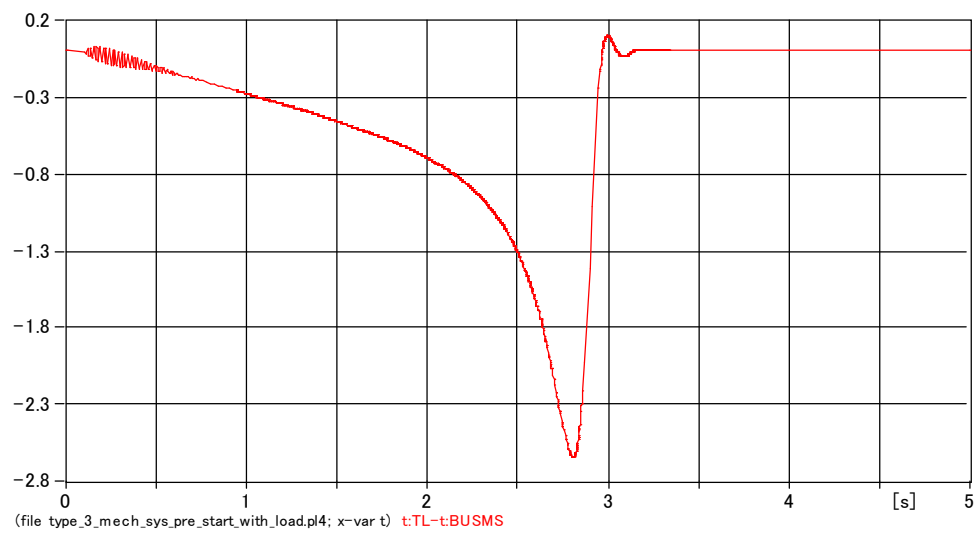


Fig. 8.3.6-2 tTL-tBUSMS の演算で発生する差

9. 例題－4 多質点系のシミュレーション

4 番目の例題は多質点系のシミュレーションです。

9.1 シミュレーション条件

9.1.1 軸系構成

誘導電動機と質点の軸系構成は Fig. 9.1-1 のとおりとし、軸系に働く負荷トルクは質点 JL にのみ働くとしています。

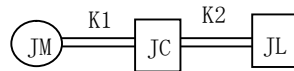


Fig. 9.1.1-1 軸系構成

この図で

JM：誘導電動機の慣性モーメント

JC：カップリング部の慣性モーメント、

JL：負荷の慣性モーメント、

K1：JM と JC 間の軸ねじりバネ定数

K2：JC-JL 間の軸ねじりバネ定数

9.1.2 慣性モーメントの値

慣性モーメントは Type_3_Mechanical_System_Prediction.acp の慣性モーメントを表すキャパシタンス 480750000 μF を JM:J1:J2 = 0.5:0.1:0.4 の割合で分割した下記の値であるとしています。

JM = 誘導電動機慣性モーメント 240375000 μF

JC = カップリング部の慣性モーメント 48075000 μF

JL = 負荷の慣性モーメント 192300000 μF

9.1.3 軸系の軸ねじりバネ定数

軸系の軸ねじりバネ定数は次のとおりであると仮定します。

K1：JM と JC 間の軸ねじりバネ定数 700E6 (Nm/rad)

K2：JC-JL 間の軸ねじりバネ定数 600E6 (Nm/rad)

9.1.4 軸ねじりバネ定数 K に対応するインダクタンス値

K の単位は (Nm/rad) です。軸ねじりバネ定数は電気系の模擬ではインダクタンスで模擬されます。

軸ねじりバネ定数 K とインダクタンス間の関係は次式のとおりです。

$$\text{インダクタンス値} = 1/K \quad (H) \quad (9.2.4-1)$$

この関係式になる理由は次のとおりです。

軸ねじりトルクを質点 1 と質点 2 間の軸ねじりバネ定数を K、質点 1 の回転角度を θ_1 、質点 2 の回転角度を θ_2 とすると軸ねじりトルク T_{12} は

$$T_{12} = K_{12}(\theta_1 - \theta_2) = K_{12} \int (\omega_1 - \omega_2) dt \quad (9.2.4-2) \text{ の関係になります。}$$

一方、電気回路ではインダクタンスを流れる電流を i_{12} 、インダクタンスの端子電圧を V_1, V_2 、インダクタンス値を L とすれば

$$i_{12} = \frac{1}{L} \int (V_1 - V_2) dt \quad (9.2.4-3)$$

の関係式が成立します。

電気回路ではトルクは電流に対応するので、 $T_{12} = i_{12}$ となります。

そのため

$$K_{12} \int (\omega_1 - \omega_2) dt = \frac{1}{L} \int (V_1 - V_2) dt \quad (9.2.4-4) \quad \text{となります。}$$

(4)式で更に角速度は電圧に対応するので両辺の積分部分は等しくなり、結局(4)式は(5)式の関係になるからです。

$$L = \frac{1}{K_{12}} \quad (9.2.4-5)$$

よって、 K_1 、 K_2 に対応するインダクタンス L_1 、 L_2 値は次のようになります。

$$L_1 = 0.142857 \cdot 10^{-5} \text{ (mH)}$$

$$L_2 = 0.166666 \cdot 10^{-5} \text{ (mH)}$$

9.1.5 粘性自己ダンピング抵抗

各慣性モーメントに並列に接続している粘性自己ダンピング抵抗の値は 0.44Ω で全ての質点で同じと仮定しています。

9.1.6 粘性相互ダンピング抵抗

粘性相互ダンピング抵抗は $1.4\text{E-}4 \Omega$ と仮定しています。

この値に対するダンピング係数 D は

$$D = \frac{1}{R} = 7142.85 \quad \text{Nmsec/rad}$$

9.2 検討対象回路

Type_3_Mechanical_System_Prediction.acp は軸系に突変負荷トルクを与えるので軸ねじりが発生しやすいので、これを1質点系から3質点系に変更してシミュレーションします。初期条件のすべり値、突変負荷の大きさ、突変負荷が重畳される時間はType_3_Mechanical_System_Prediction.acp と同じにしています。

この変更した File 名は Type_3_Mechanical_System_Prediction_multi_mass.acp で Fig. 9.2-1 に示す内容です。

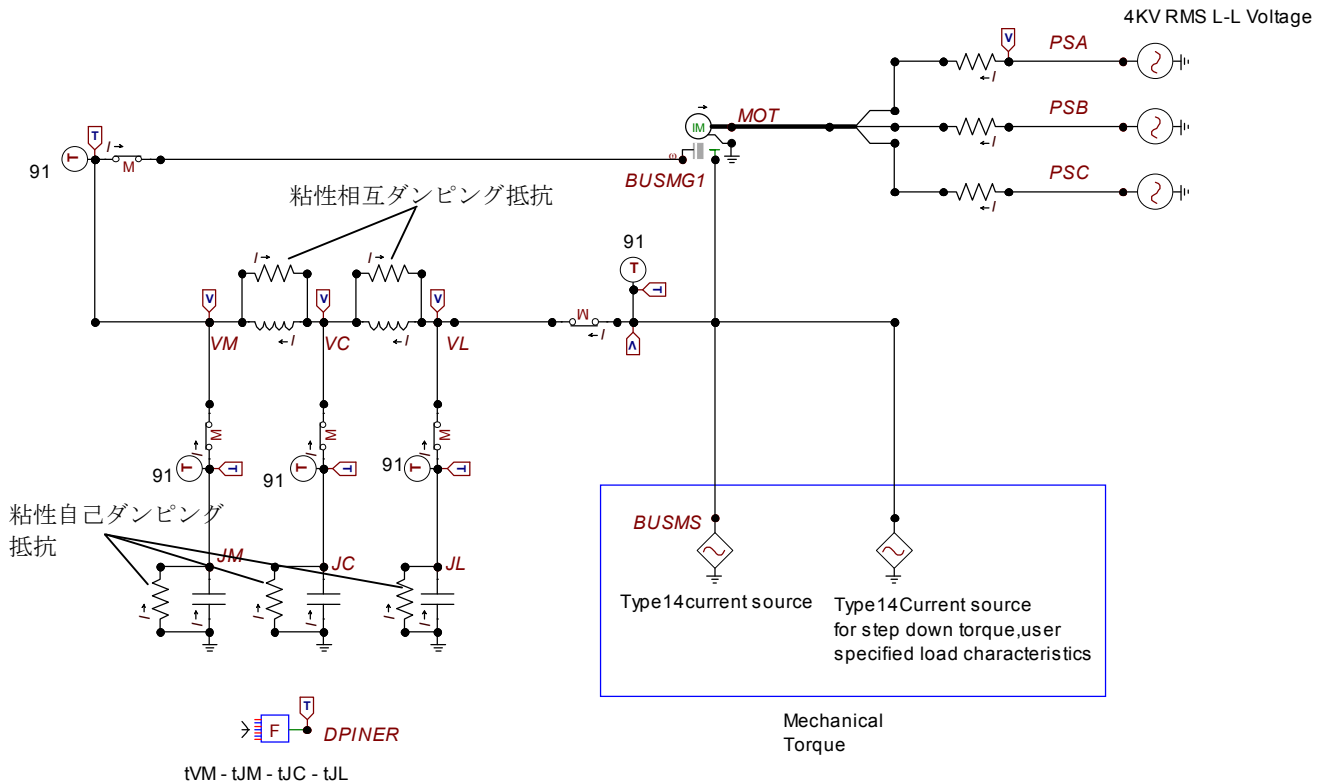


Fig. 9.2-1 多質点系のシミュレーション回路

ノード VM-VC 間とノード VC-VM 間のインダクタンスは軸捻りバネ定数で、並列に入っている抵抗は粘性相互ダンピング抵抗です。

ノード VC-VL 間のインダクタンスと抵抗は同じく軸捻りバネ定数と粘性相互ダンピング抵抗です。

ノード JM-大地間、ノード JC-大地間、及びノード JL-大地間の抵抗は粘性自己ダンピング抵抗です。これらの抵抗と並列に入っているキャパシタンスは各質点の慣性モーメントです。

出力名 DPINER の FORTRAN 演算回路は空隙電磁トルクから各質点で発生する自己ダンピングトルクと慣性モーメントトルクを差し引いたトルクを演算しています。

この DPINER の値は [9.3.2](#) 項に示す如く負荷駆動トルク tBUSMS に等しくなります。

9.3 シミュレーション結果

9.3.1 各質点の角速度

質点 JM、JC、JL の角速度はそれぞれノード VM、VC、VL のノード電圧として表れます。

これらのプロット波形を Fig. 9.3.1-1 に示します。

縦軸の単位は V ですがこれは rad/sec に等しい。

Fig. 9.3.1-1 からこれらの三つの波形は同一では無く、若干差異が発生しているように見えます。波形を拡大して詳細を見てみましょう。

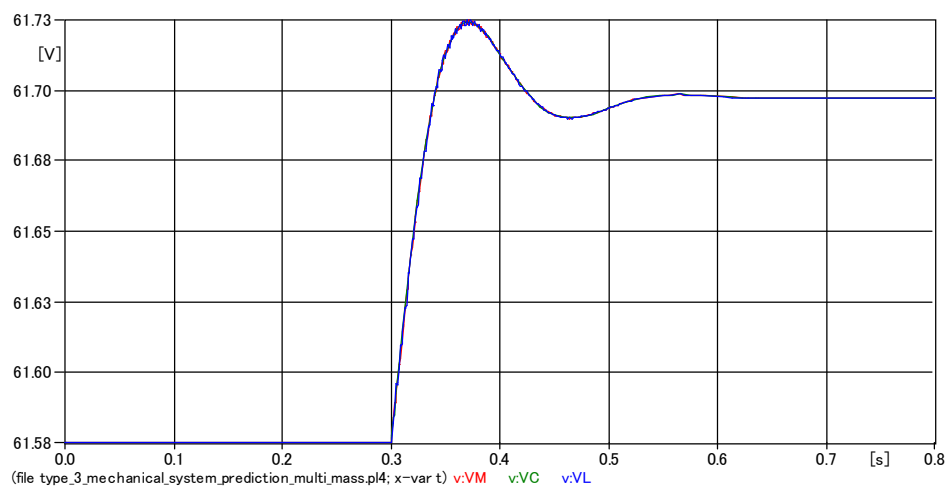


Fig. 9.3.1-1 質点 JM、JC、JL の回転角速

Fig. 9.3.1-1 の Peak 部を拡大表示すると下図のごとくカップリングの左右で角速度の Peak 値が逆位相になっており、軸ねじりが発生しています。このねじりは粘性相互ダンピング抵抗によりやがて減衰して行く様子も観察されます。

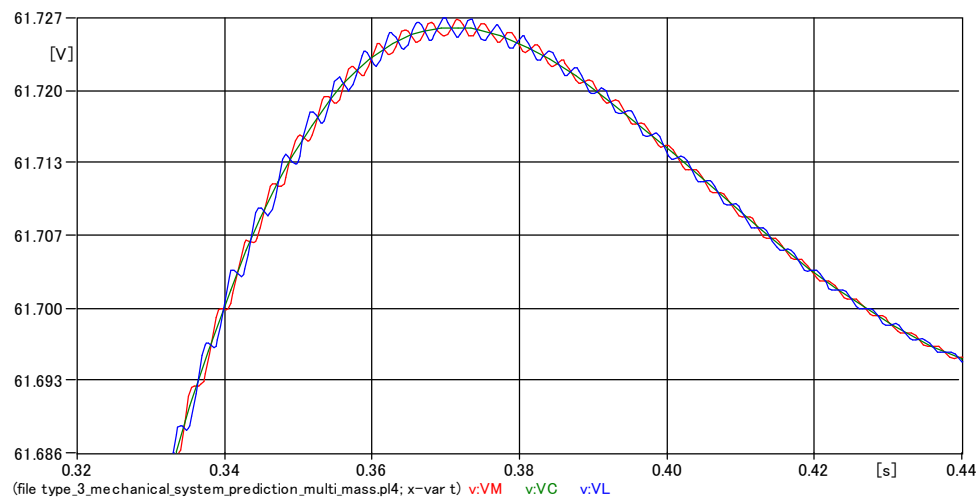


Fig. 9.3.1-2 質点 JM、JC、JL の回転角速度の拡大

9.3.2 tDPINER は負荷駆動トルク(ノード BUSMS - VL 間電流)に等しくなる

ノード VM に注入された空隙電磁トルクの一部はキャパシタンスと粘性自己ダンピング抵抗からなる並列回路に分流します。注入トルクから全並列回路に流れるトルクを差し引いた tDPINER は次のごとく負荷駆動トルク(ノード BUSMS-VL 間電流または tBUSMS)に等しくなります。

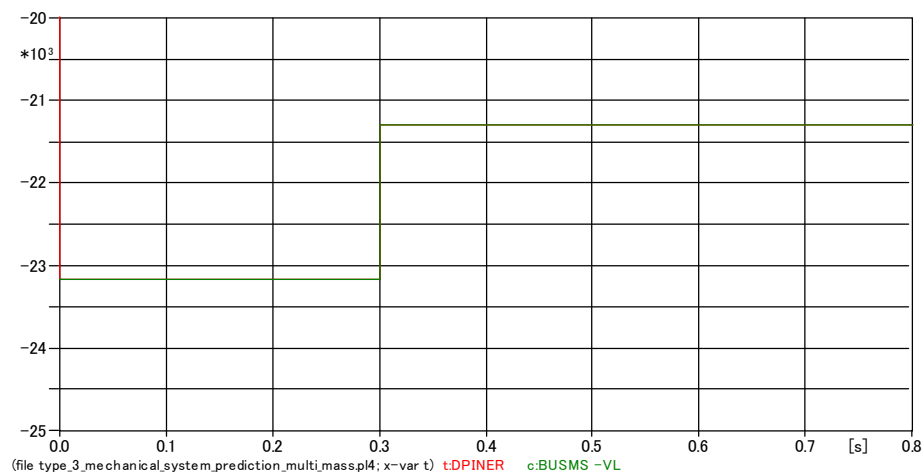


Fig. 9.3.2-1 ノード VM の注入トルクから並列回路に流れるトルクを差し引いた tDPINER は負荷駆動トルク(ノード BUSMS-VL 間電流)に等しくなります。

10. 例題 5—残留電圧、電源再投入のシミュレーション

この例題は電源喪失時の誘導電動機の残留電圧シミュレーションと電源喪失後短時間で電源が再投入された場合のシミュレーション例です。

誘導電動機が運転中に三相短絡などで回路電圧が 0 になった場合、誘導電動機の空隙磁束鎖交数は瞬時に運転中の磁束鎖交数から 0 に減衰できず、回路時定数に従って減衰していきます。この残留磁束の時間微分でしばらくの間誘導電動機端子には残留電圧が発生します。

この電源電圧が無くなった時に残る残留電圧はいわゆる Motor contribution 電流を流す源になります。

主回路で短絡事故が発生すれば主回路電圧はこの残留電圧になり、短絡点に向けて誘導電動機群から Motor contribution 電流を流します。短絡点には電源からの短絡電流と motor contribution 電流の重畳した事故電流が流れるため遮断器選定の際考慮が必要になります。

瞬時停電母線切り替えが行われる時、この残留電圧と新しい電源電圧のつき合わせになり、切り替えタイミングによっては救援電源電圧と残留電圧の重畳で過電圧状態が引き起こされ、結果として過電流状態が引き起こされます。

本項はこれらの現象検討に使えます。

10.1 検討対象回路

この検討対象回路は Project file; Type_3_Mech_Sys_pre_start_with_load.acp から次の変更をしています。

誘導電動機主回路構成を Fig. 10.1-1 のごとく変更しています。

ノード FAULTA, FAULTB, FAULTC と大地間に接続した R-C 直列インピーダンスは電源スイッチ開放時の電圧振動を抑制するために設けています。R=100 Ω 、C=0.1 μ F としています。

計算時間は 8 sec に変更しています。

ノード PS-FAULT 間の電源スイッチは投入時間が 0.1 sec. とし、100%すべりの起動からシミュレーションが始まります。

t>0 sec. で電源 SW が閉じることが key point で TACS 系を含んだ正しいシミュレーションができるようになります。

開放時間は Topen =4.0 sec. としています。

各相電流は 4.0 sec. 以降の各相の電流 0 点で順次遮断されて行きます。

その後 Reclosing sw により、残留電圧が未だ残っている 4.3 sec で三相電源を再投入時の過渡状態をシミュレーションしています。

これらの変更を行った Project file は Fig. 10.1-1 の Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage.acp です。

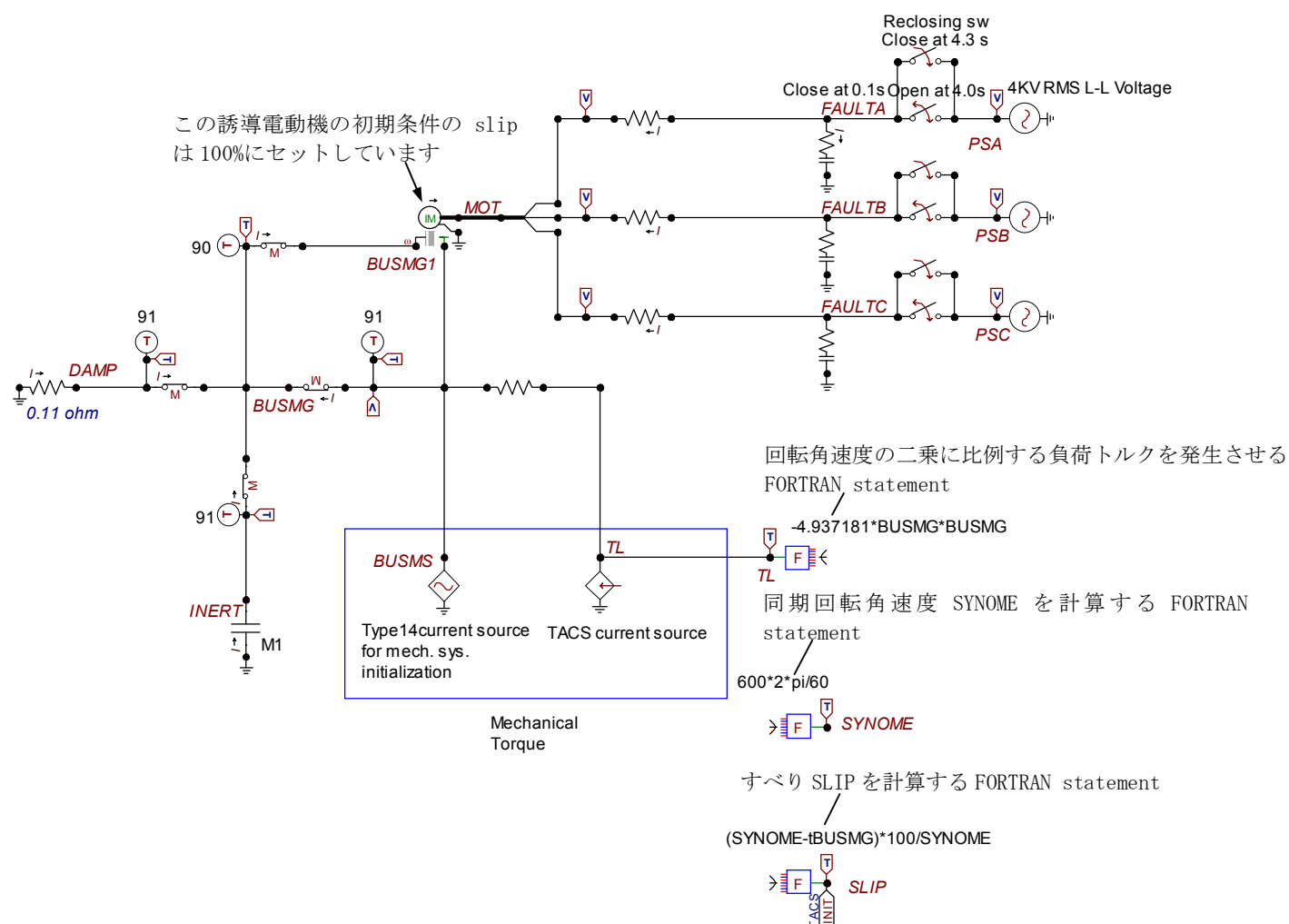


Fig. 10.1-1 残留電圧、電源再投入の検討対象回路

10.2 シミュレーション結果

10.2.1 残留電圧

A 相の残留電圧 MOTA の 3.8 sec～4.5 sec. 間を拡大して示します。

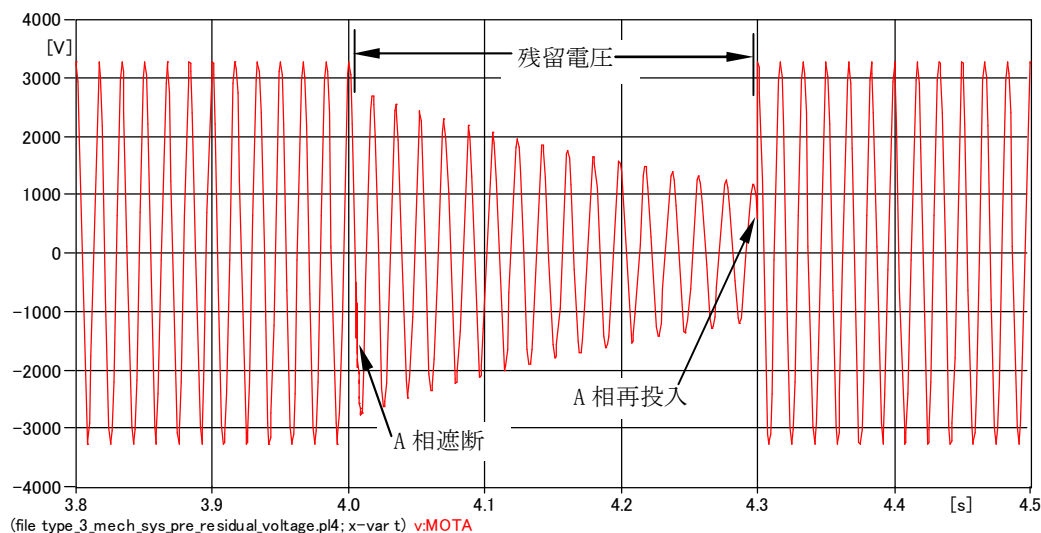


Fig. 10.2.1-1 A 相残留電圧

10.2.2 残留電圧と電源電圧の差電圧

A 相電圧の差電圧 PSA-MOTA を代表して示します。

差電圧はこの図の如く時間と共に大きさが変化します。

最大差電圧の時電源が再投入されれば突入電流の大きさは最大になります。

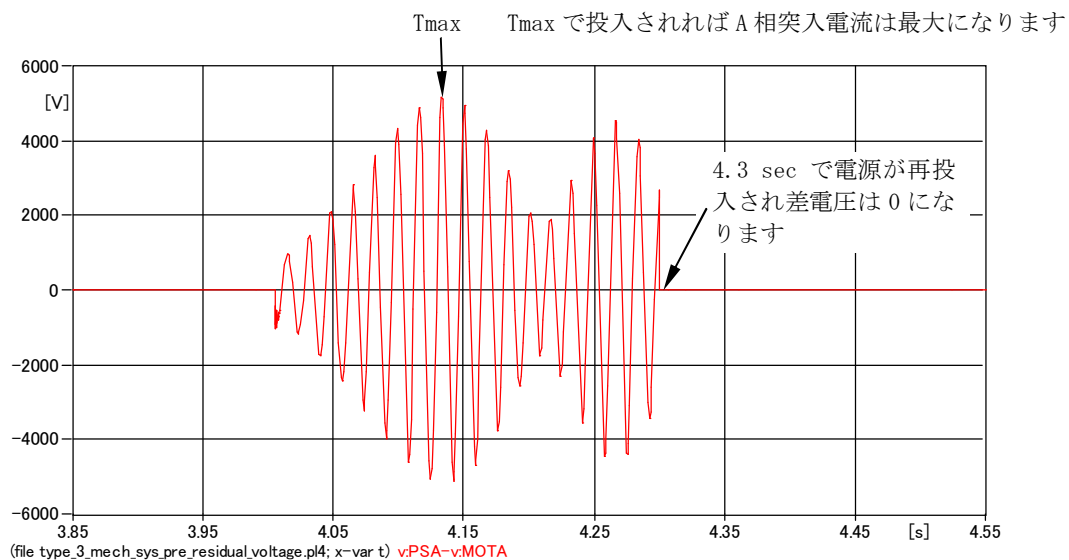


Fig. 10.2.2-1 残留電圧と電源電圧の差電圧

10.2.3 過渡突入電流

4.3 sec で電源を再投入した時の $t=2.0\sim 5.0$ 間の A 相の突入電流を Fig. 10.2.3-1 に示します。最大過渡突入電流は残留電圧と電源電圧の最大差電圧の T_{max} のタイミングで投入すると発生します。

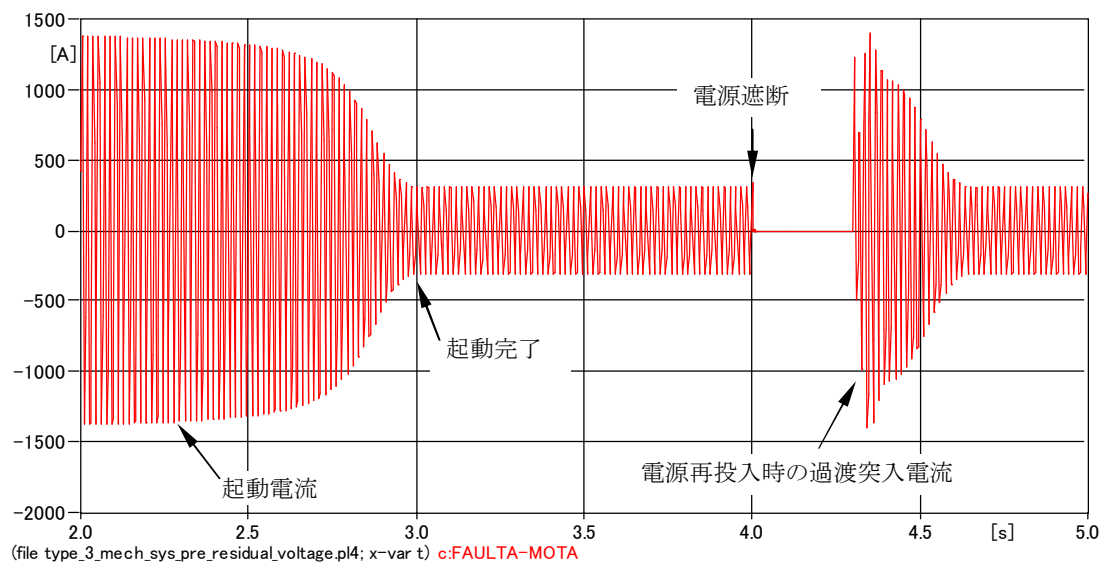


Fig. 10.2.3-1 電源再投入時の過渡突入電流

10.2.4 誘導電動機の角速度

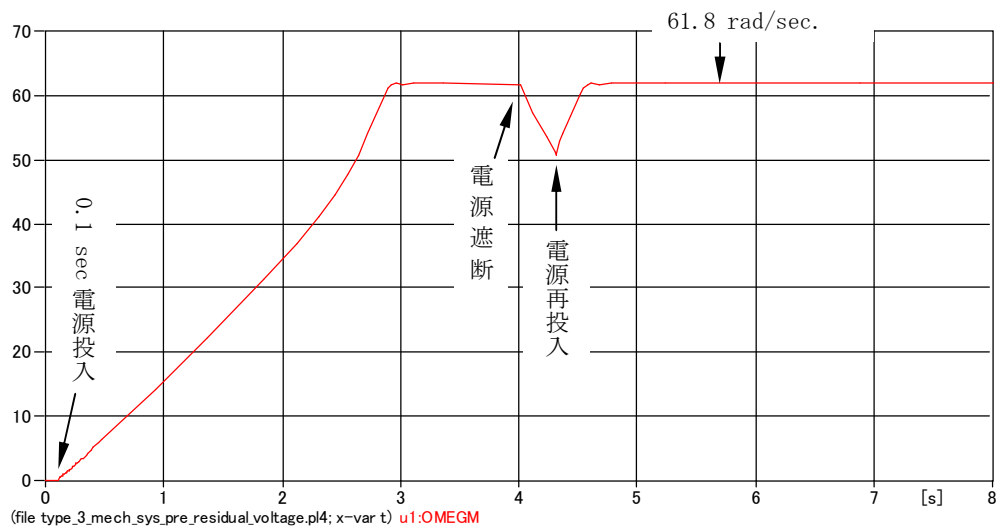


Fig. 10.2.4-1 角速度変化

10.2.5 すべり

TACS で計算しているすべりを Fig. 10.2.5-1 に示します。

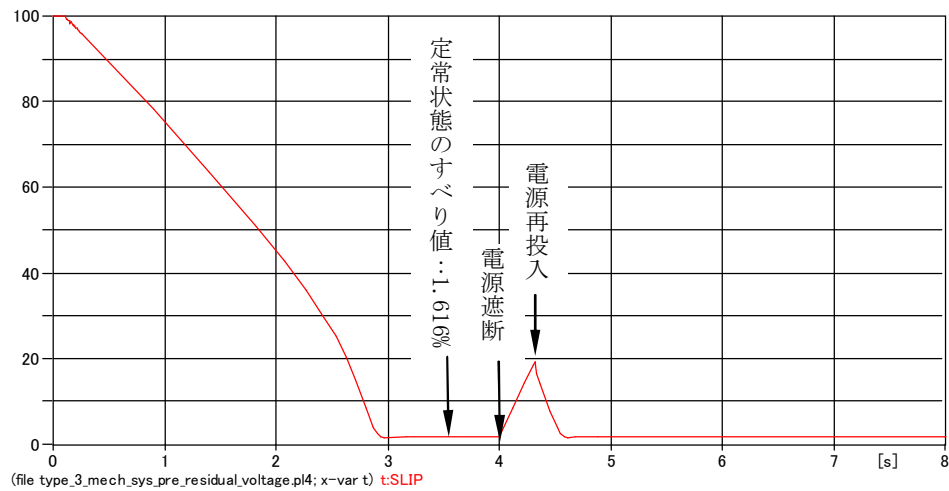


Fig. 10.2.5-1 すべりの挙動

10.2.6 軸系の過渡トルク

t = 4.3 sec. で電源が再投入されると空隙電磁トルクは最初+の過渡トルクが発生し、次に-の過渡トルクに移行し、軸系には大きなねじり過渡トルクが生じています。

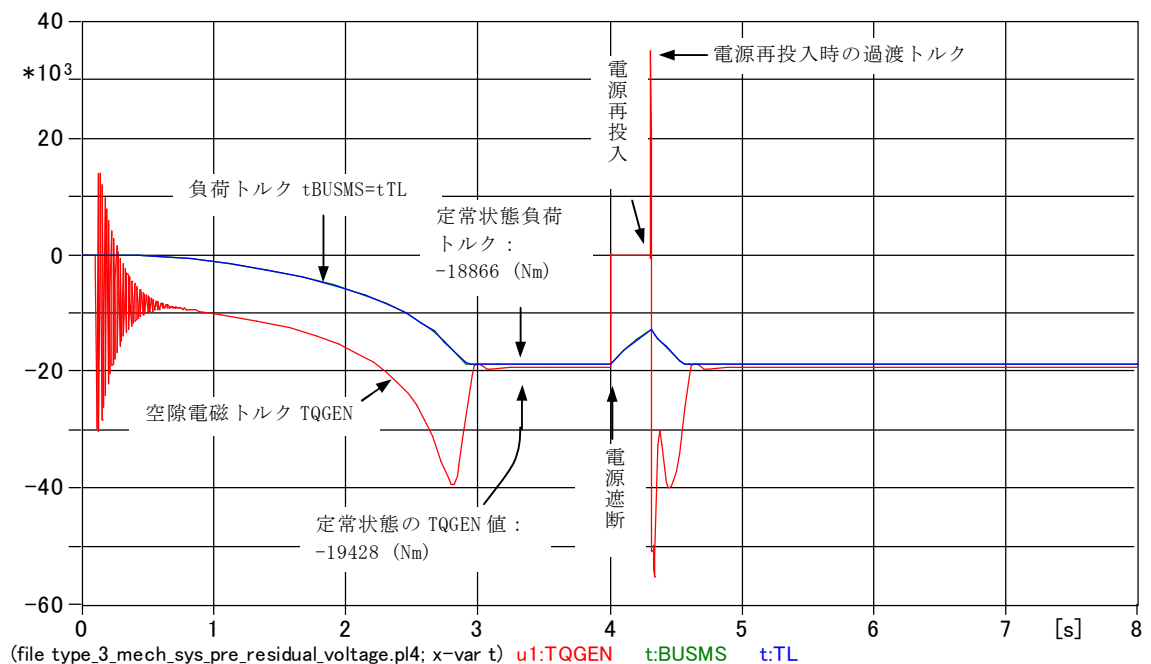


Fig. 10.2.6-1 電源再投入時の軸系の過渡トルク

Fig. 10.2.6-1 で定常状態になった時の負荷トルクと空隙電磁トルクの差は粘性ダンピング回路に流れるトルクになります。

10.2.7 電源再投入時の軸系過渡トルクの大きさ

Fig. 10.2.6-1 の過渡トルク部の拡大図を下記に示します。

一度＋方向のトルクになり次の半サイクルで－のトルクに急変します。そのトルク差はこの計算例では 90072 (Nm) であり、これは Rated load torque 18719.36 (Nm) の約 4.8 倍のトルクに達しています。

電源切り替えをする場合はこのように過渡トルクが発生するので過渡トルクが最大になるケースで、軸系強度が十分か検討することも必要でしょう。

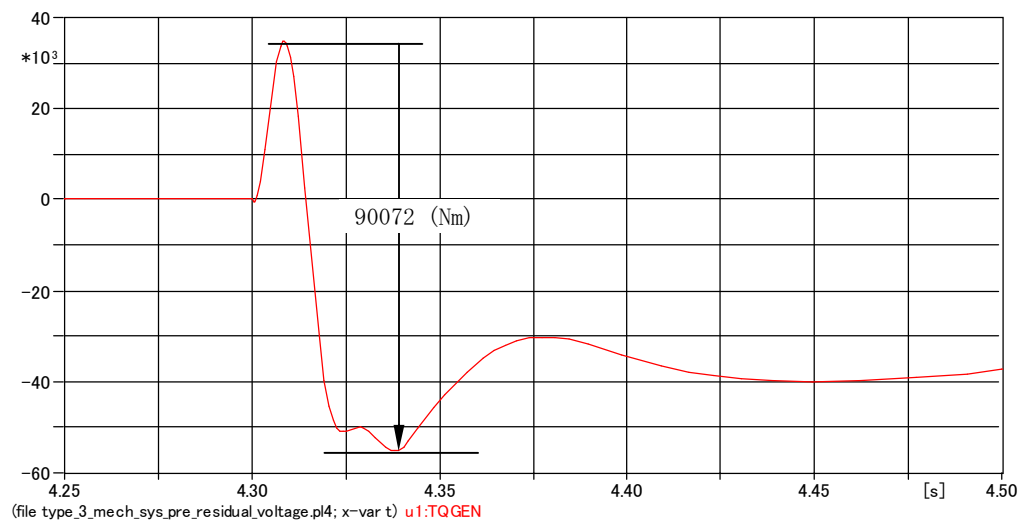


Fig. 10.2.7-1 軸系過渡トルクの拡大図 (Fig. 10.2.6-1 の過渡トルク部の拡大)

10.2.8 角速度の二乗に比例するトルク信号 tTL と負荷トルク信号 tBUSMS の比較

両者を下図に示します。
tTL は TACS で生成された負荷トルクの大きさです。また tBUSMS はノード BUSMS-BUSMG 間の Measuring Switch に流れる電流です。

下図の如く、両者はシミュレーション期間中同一の大きさに推移します。
このことは TACS で生成された負荷トルクの大きさがそのまま BUSMS-BUSMG 間の Measuring Switch に流れることを示すので Type14 電流源の大きさはシミュレーション期間中、Phasor 解の 0(A) に留まることを示しています。

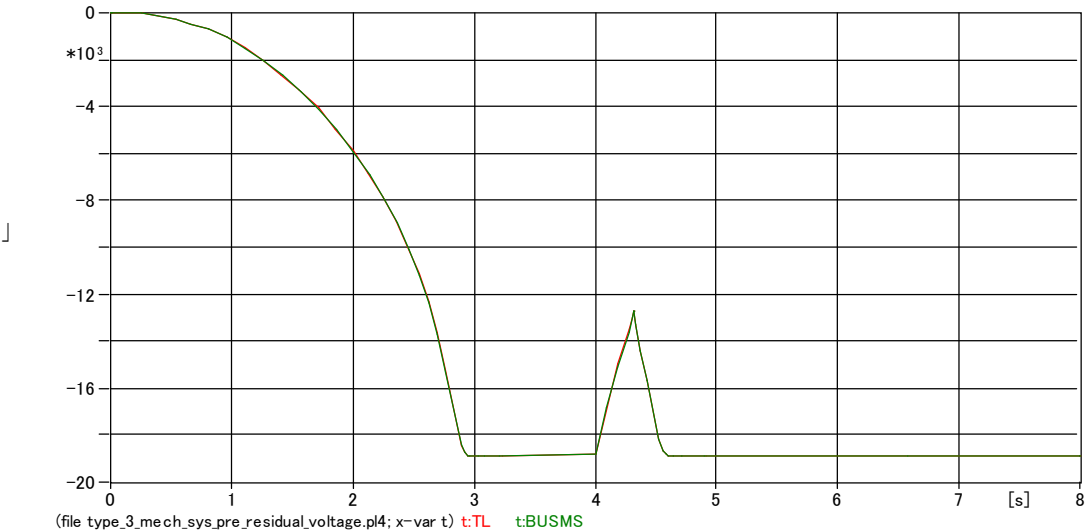


Fig. 10.2.8-1 角速度の二乗に比例するトルク信号 tTL と負荷トルク信号 tBUSMS の比較

この回路で Phasor 解の値が 0(A) であることは電流源 1 の Phasor 解の大きさが 0(A) であることを示し、このことはこの例題の .lis ファイルを見れば Fig. 10.2.8-2 の→の箇所からわかります。

→

Output for steady-state phasor switch currents.↓							
Node-K	Node-M	I-real	I-imag	I-magn	Degrees	Power	Reactive↓
BUSMG	BUSMG1	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.0000	0.00000000E+00	0.00000000E+00↓
INERT	BUSMG	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.0000	0.00000000E+00	0.00000000E+00↓
BUSMS	BUSMG	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.0000	0.00000000E+00	0.00000000E+00↓
DAMP_	BUSMG	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.0000	0.00000000E+00	0.00000000E+00↓

Fig. 10.2.8-2 電流源 1 の Phasor 解の大きさ

10.2.9 例題－6 電源 SW の再投入時間を更に遅らせた場合

Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage.acp の電源 SW の Reclosing time を 4.3 sec. から 12 sec. に変更し 15 sec. まで計算させてみます。この検討目的は停電時間が長い場合 U. M. モデルの挙動が不安定にならずにシミュレーションできるか調べるものです。

File 名は Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage_long_blackout.acp とします。

電源 SW 開放により、角速度は 0 に向けて漸近して行きますが 12 sec. で電源が再投入されるため角速度は再び上昇を始め、遮断器開放前の 61.8 rad/sec の角速度まで上昇し正常なシミュレーション結果になっています。

電源再投入時角速度は 0 になっていないので、起動時間 $T_{st1} > T_{st2}$ になります。

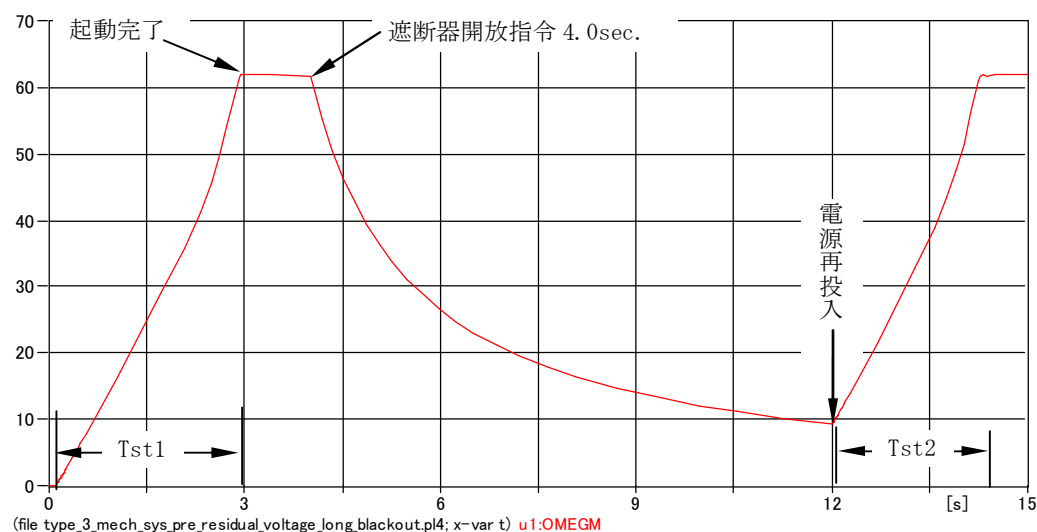


Fig. 10.2.9-1 電源 SW の再投入時間を遅らせた場合の角速度

空隙電磁トルク TQGEN と負荷トル BUSMS は次のとおりになります。

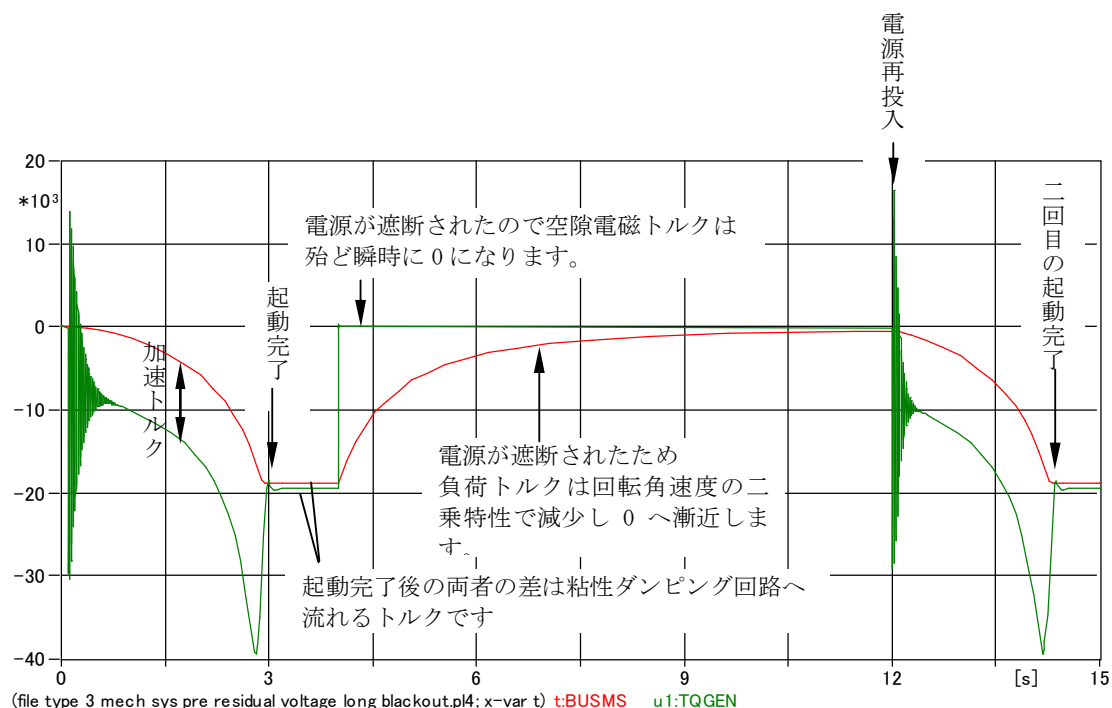


Fig. 10.2.9-2 電源 SW の再投入時間を遅らせた場合の TQGEN と負荷トル BUSMS

Fig. 10.2.9-2 に各相電圧を追加してプロットさせた結果を Fig. 10.2.9-3 に示します。

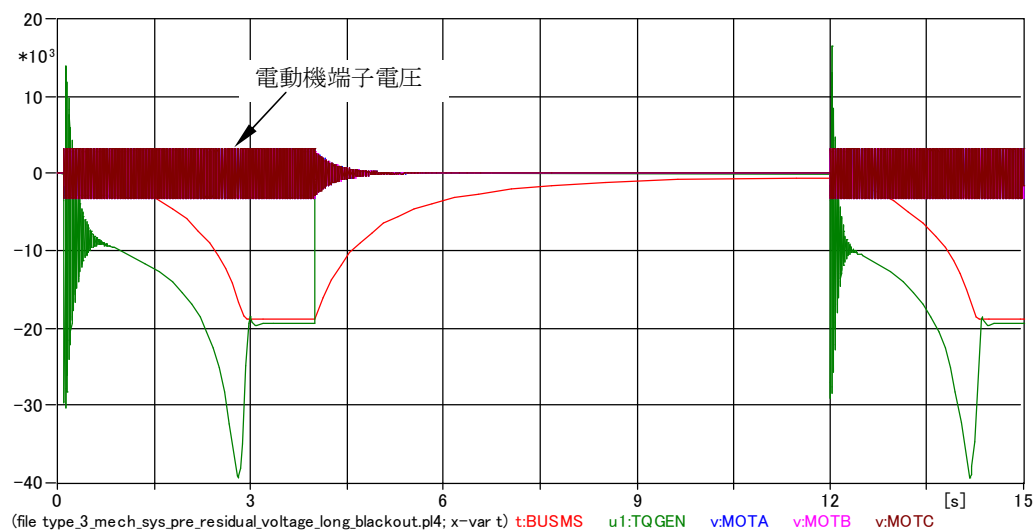


Fig. 10.2.9-3 電動機端子電圧、TQGEN、及び負荷トル BUSMS の関係

11. 例題－7 粘性ダンピングトルク回路を省略したときの過渡トルクへの影響

このシミュレーション例で粘性ダンピングトルクを無視した時と、考慮した時の軸系過渡トルクの大きさにどのような影響が出るか検討します。

粘性ダンピングトルクが考慮されている Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage.acp と粘性ダンピング回路を削除した Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage_no_damp.acp の過渡トルクの大きさをシミュレーションしてみます。

両者の空隙電磁トルクのプロットを Fig. 11-1 に示します。

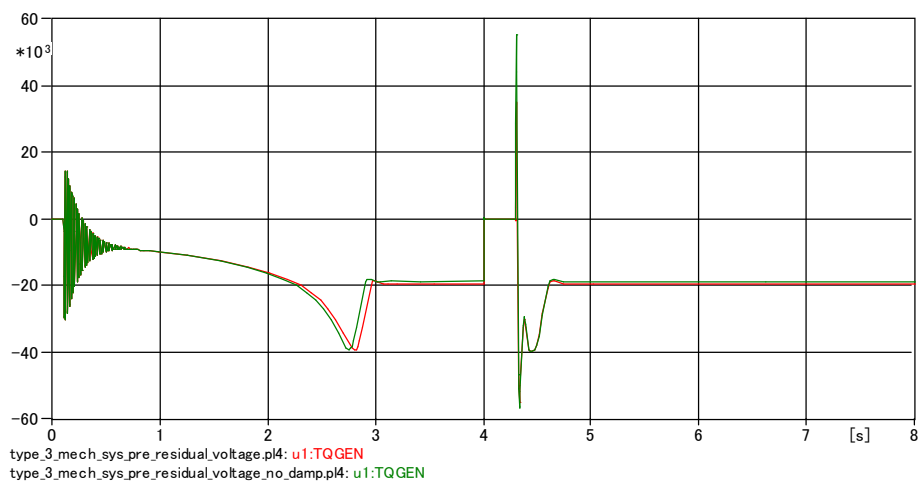


Fig. 11-1 粘性ダンピングを考慮した場合と無視した場合の TQGEN

過渡トルクの最大値は 4.3 sec. の電源 SW 再投入時に発生していてこの部分の拡大を Fig. 11-2 に示します。

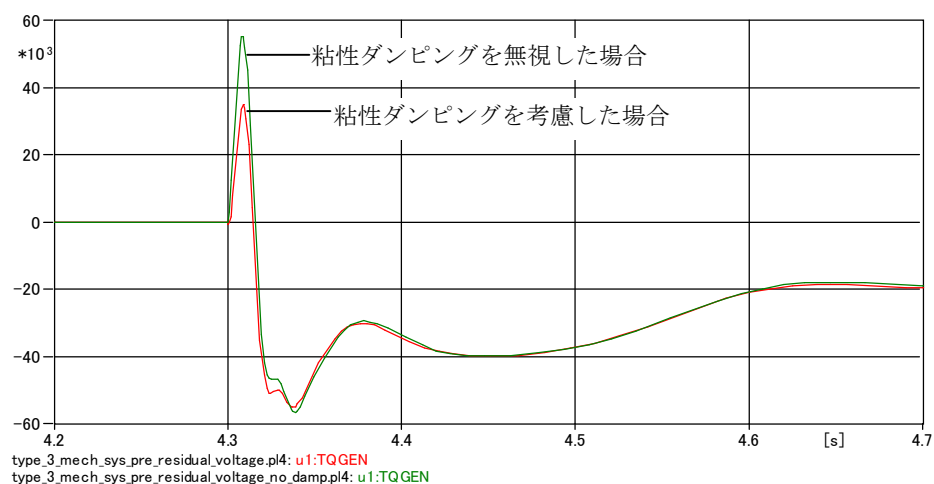


Fig. 11-2 TQGEN の拡大図

この再投入タイミングでは粘性ダンピングを無視した方が厳しい過渡トルクになるのがわかります。但し、いつもこの大小関係になるのでは無く再投入タイミングに依存して変わります。このことを Fig. 11-3 に示します。

再投入タイミングを 4.25 sec. に変更し、ダンピング回路有り、と無しの過渡トルクをシミュレーションした結果を Fig. 11-3 に示します。
 この場合、結果は上記と逆転し、粘性ダンピングを考慮した方が過渡トルクは大きくなります。

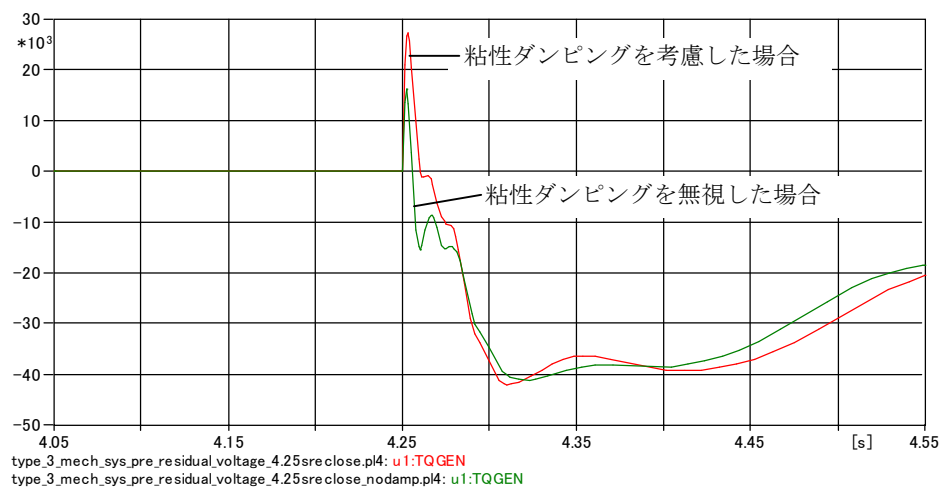


Fig. 11-3 4.25 sec. で再投入したときの過渡トルクの大きさ

このように過渡トルクの大きさは粘性ダンピングトルクの有無ではなく、投入タイミングに依存して変わります。

12. 例題－8 早い段階で定常運転状態を出現させる方法

この例題は起動中のシミュレーションを省略し、早い段階で定常状態にし、過渡シミュレーションに移行したい場合の方法を紹介します。これは10項のバリエーションになります。
この方法を使うと定常状態から何ケースもシミュレーションする場合起動時間を省けるのでシミュレーション時間の短縮になります

このシミュレーションを成功させる要点は次の二点です。

- 1) 電源スイッチは 100%すべりからの起動シミュレーションと同じく計算開始時は開放状態にしておきます。

以下に示す例題では 0.1sec. で始めて閉じるスイッチとしています。

このようにすることで機械系の初期化が TACS 系を含めて同時に行われるので正しいシミュレーションを行わせることができます。もし電源スイッチが計算開始前から閉じられていると13項に示すごとく誤ったシミュレーションになってしまいます。

- 2) U. M. の初期値であるすべりを 100%から定常運転になった時のすべり値に変更します。

12.1 最初に定常運転になった時のすべり値を求めます

Type_3Mech_Sys_pre_residual_voltage.acp を走らせ起動完了後の定常状態になった時のすべり値をプロット波形から調べます。Fig. 12. 1-1 のごとく 1.616%です。このすべり値を U. M. の初期値 100%に変えてセットします。

すべり値をこのように変更した後の Project file は

Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage_slip1.616.acp です。

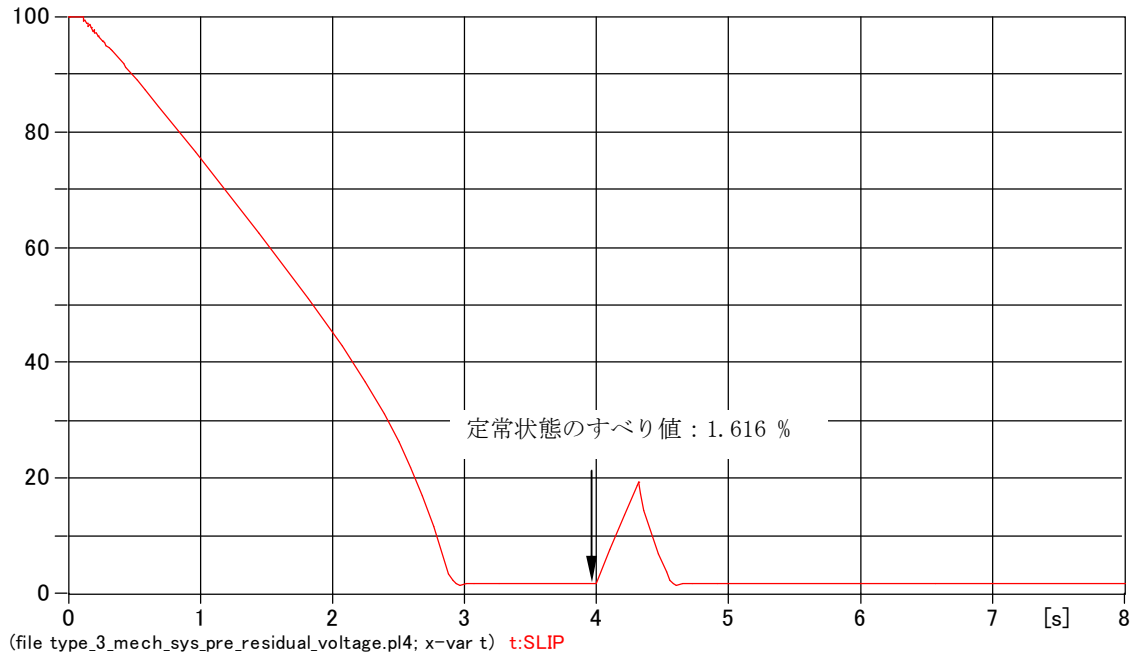


Fig. 12.1-1 定常状態のすべりを調査する

Type_3Mech_Sys_pre_residual_voltage.acp と
Type_3Mech_Sys_pre_residual_voltage_slip1.616.acp のシミュレーション結果を以下に示します。

12.2 電機子電流

A 相電流を代表して示します。電源 SW を 0.1 sec. で投入しているため、0.1 sec. 近傍で過渡振動が発生しますが、約 0.4sec. の早い段階で過渡振動は収束し、定常状態にすることができています。このため定常状態になった状態からの過渡状態シミュレーションを多数回行う場合、シミュレーション時間を短くできます。

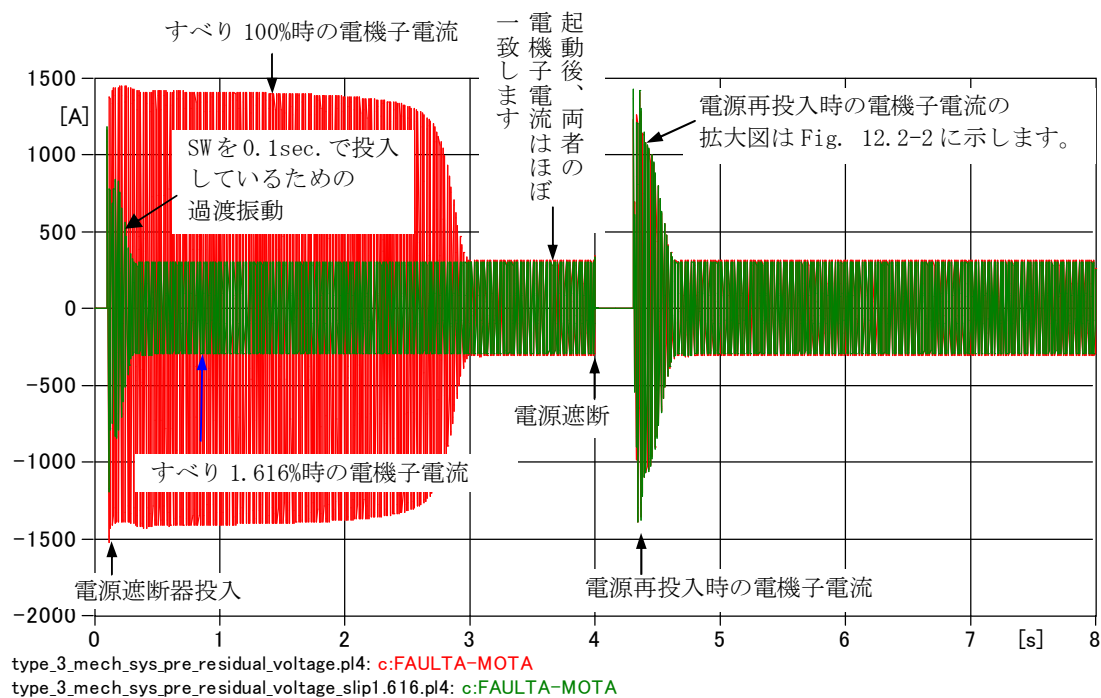


Fig. 12.2-1 電機子電流の比較

電源再投入時の電機子電流の拡大図を Fig. 12.2-2 に示します。
この時の電機子電流も次に示すようにほぼ一致します。

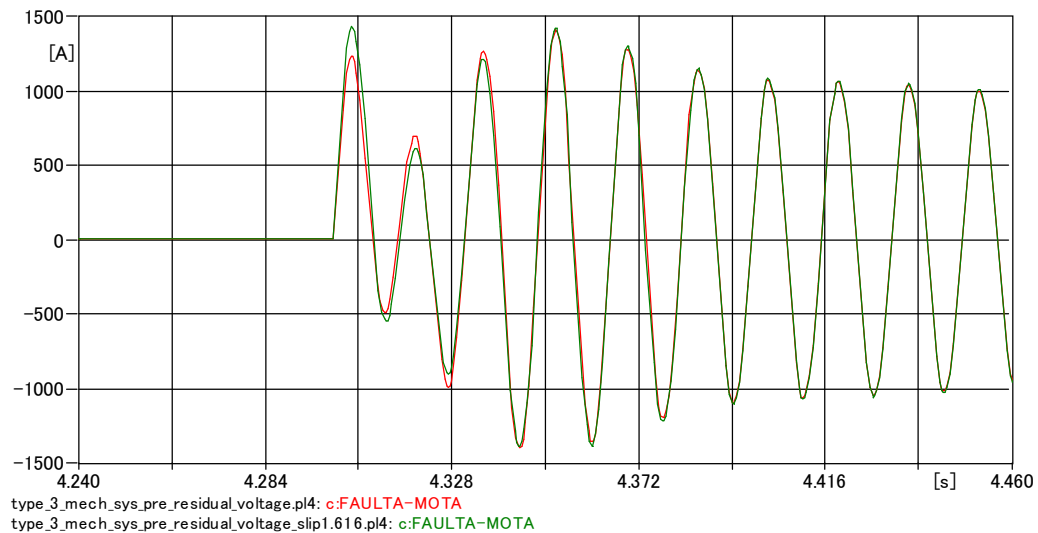


Fig. 12.2-2 電機子電流比較

以下にすべり値 t_{SLIP} 、負荷トルク t_{TL} 、空隙電磁トルク T_{QGEN}

12.3 すべり値のシミュレーション結果

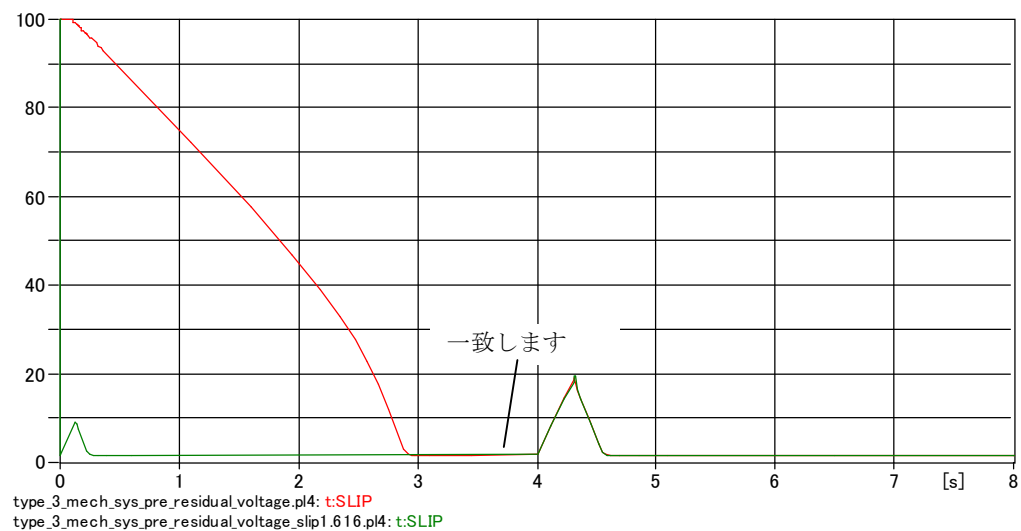


Fig. 12.3-1 すべり値比較

12.4 角速度の二乗に比例する負荷トルク tTL

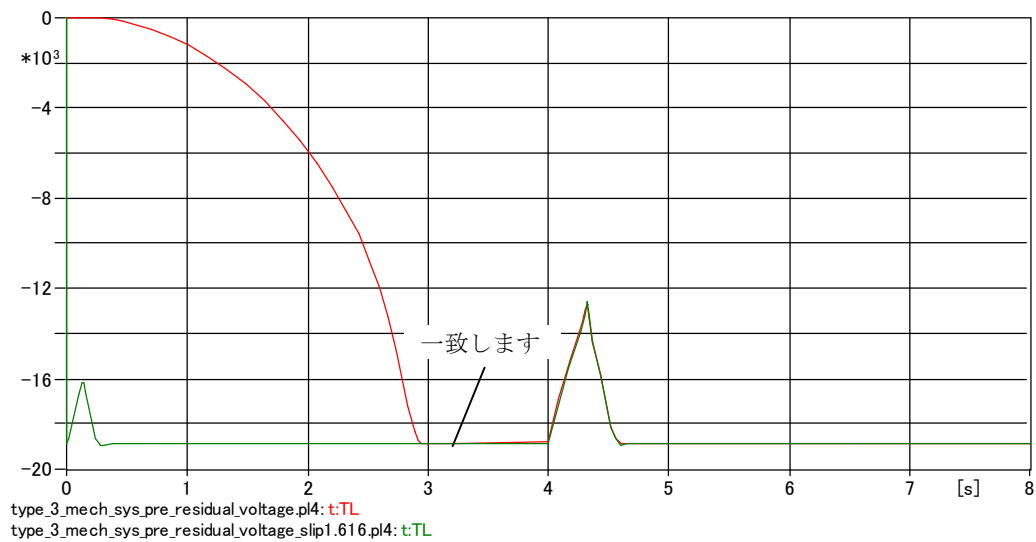


Fig. 12.4-1 tTL の比較

12.5 空隙電磁トルク TQGEN

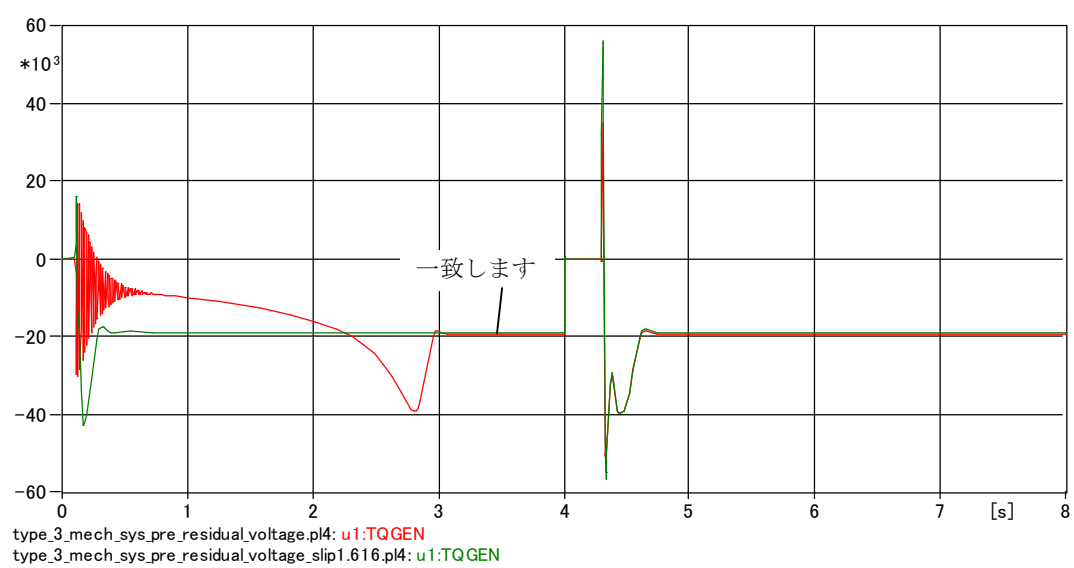


Fig. 12.5-1 TQGEN の比較

13. 例題－9 正しく無いシミュレーション例

機械系統に TACS 系が存在する場合で、定常運転状態からのシミュレーションをしようとして、ノード FAULT-PS 間の電源スイッチを最初から閉じた状態にした場合のシミュレーション例です。このシミュレーション結果は正しくない結果になります。正しいシミュレーションをするには 10 項、12 項のごとく電源スイッチを最初開放しておき、計算開始後閉じる必要があります。

13. 項の Project File 名は Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage_slip1.616_sw_closed.acp としています。

Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage_slip1.616.acp からの変更点はこの SW の T-close を 0.1 sec. から-1.0 に変更しているだけです。

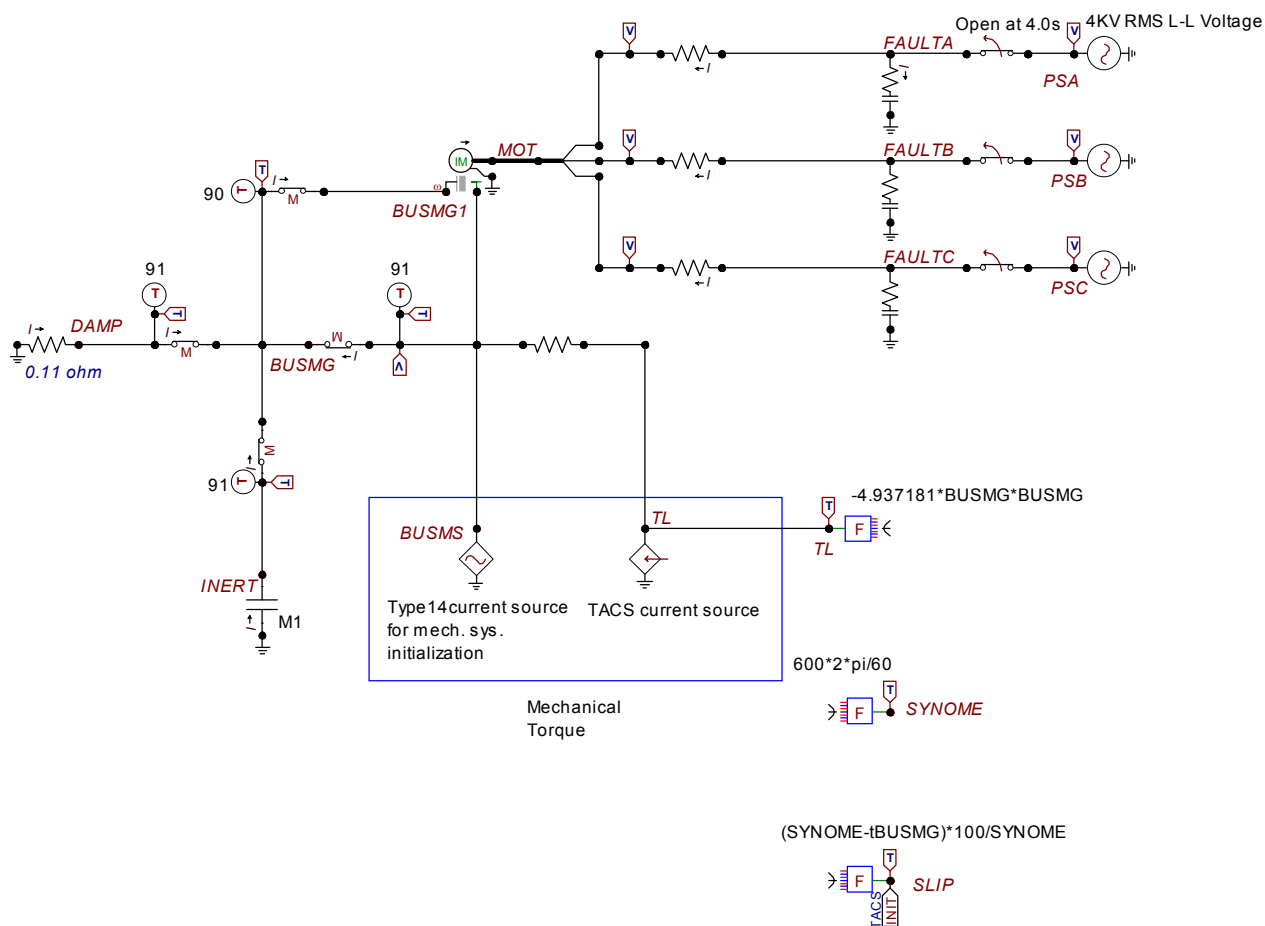


Fig. 13-1 電源 SW が最初から閉じられているケース

13.1 シミュレーション結果

Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage_slip1.616.acp と

Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage_slip1.616_Sw_closed.acp (正しくないシミュレーション例) の違いがわかるように両者のシミュレーション結果のプロットを掲載します。

下記のようにシミュレーション結果に差が出ます。

13.1.1 すべり

4 sec. 前のすべり値は

Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage_slip1.616.acp では 1.5634 % で U.M. に入力した初期条件 1.616% に近い値になっており、妥当な結果になっています。

一方、Type_3_Mech_Sys_pre_residual_voltage_slip1.616_Sw_closed.acp では U.M. に 1.616% と入力したにも関わらず 4.1205 % の値になっています。さらに t=4.0 sec. で SW が開放されるとすべりは急増して行きます。

電源 SW の再投入も行われません。

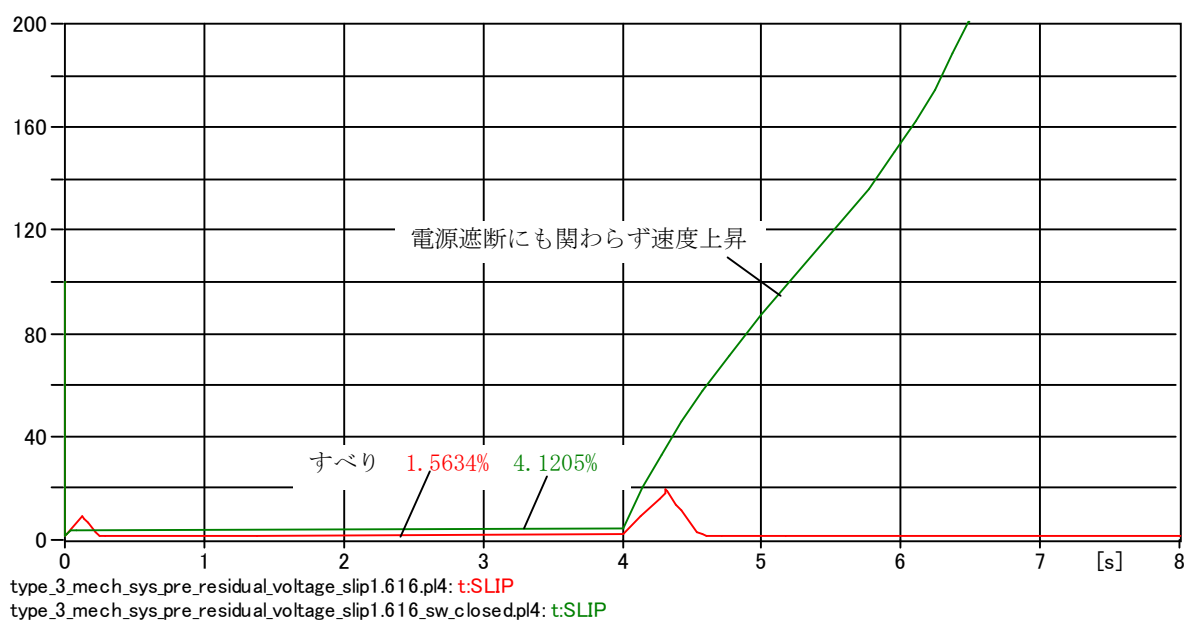


Fig. 13.1.1-1 すべり値比較

13.1.2 角速度 OMEGAM(=tBUSMG)

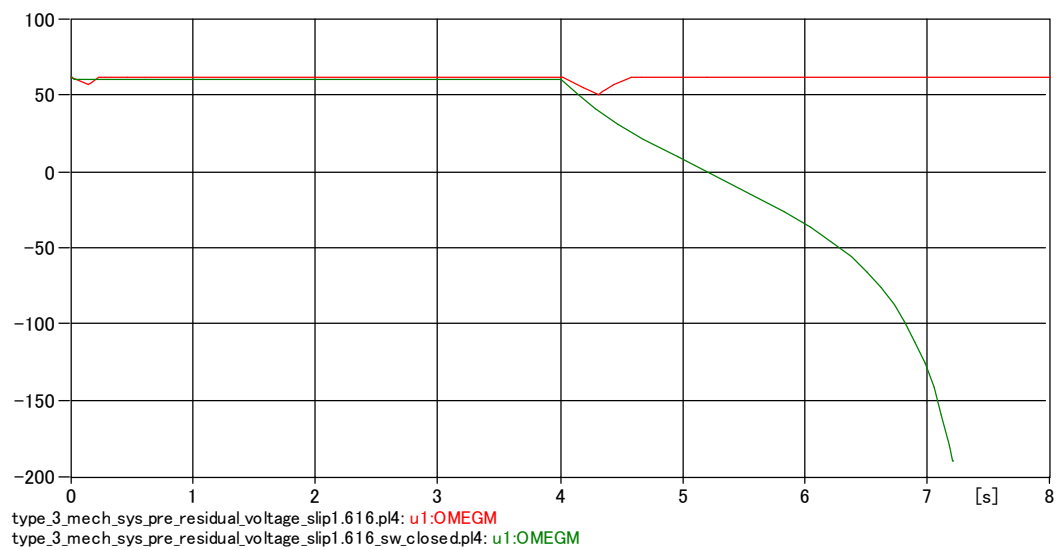


Fig. 13.1.2-1 角速度比較

13.1.3 空隙電磁トルク TQGEN

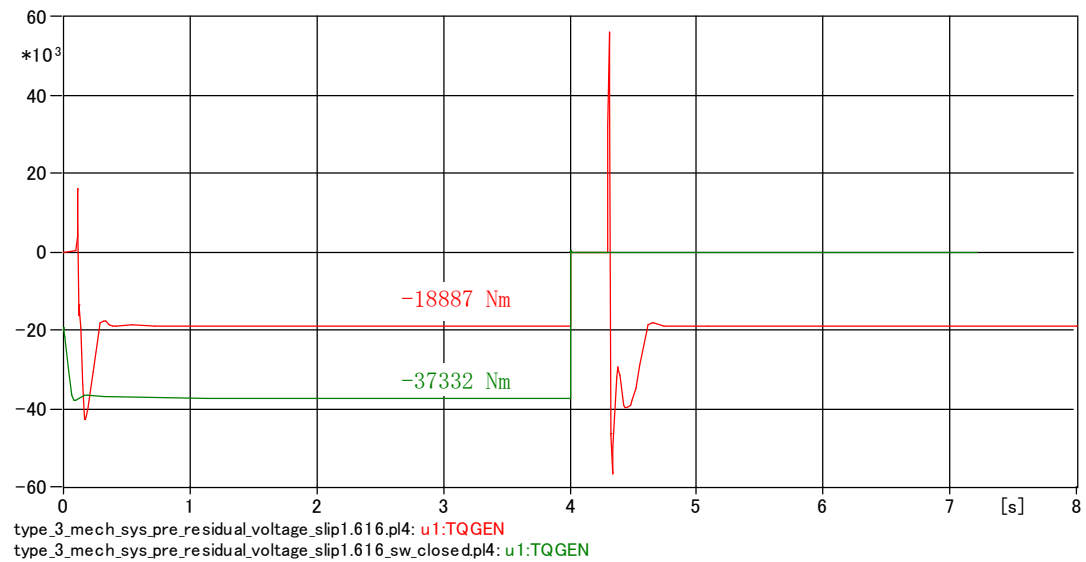


Fig. 13.1.3-1 空隙電磁トルク TQGEN 比較

14. 例題 10ー多機系統シミュレーション

ここでは多機系の例題として 8 機の誘導電動機シミュレーション例を紹介します。

それぞれ 4 台ずつ誘導電動機が接続されて運転中の A 母線、B 母線から成る系統で、B 母線の受電遮断器が計算開始後 1.0 sec. で Trip した時、B 母線電動機の運転を継続させるため A, B 母線間の Tie 遮断器を B 母線遮断器が trip 後 0.5 sec. で投入し A 母線から B 母線を救援する場合のシミュレーション例を紹介します。このシミュレーションにより救援時の母線電圧低下、tie 遮断器回路の突入電流、各誘導電動機の過渡時の諸量の把握が可能になります。救援時間を変えて諸量の検討も行えます。

この例題は本稿の第 12 項の内容を反映させ早い段階から定常状態を出現させるようにしています。

14.1 検討対象回路

次ページに示すとおりです。

この Project file 名は Multi_Machine_Bus_Transfer.acp で、解説書とともに Upload しておきます。

粘性ダンピングは無視しています。

14.2 シミュレーション結果

代表して救援時の突入電流と B 母線電圧を示します。

14.2.1 救援時の突入電流

母線 A から母線 B に流れる突入電流は Fig. 14. 1. 1-1 に示すとおりです。

A 相電流を代表して示します。

約 7 倍の突入電流が流れています。

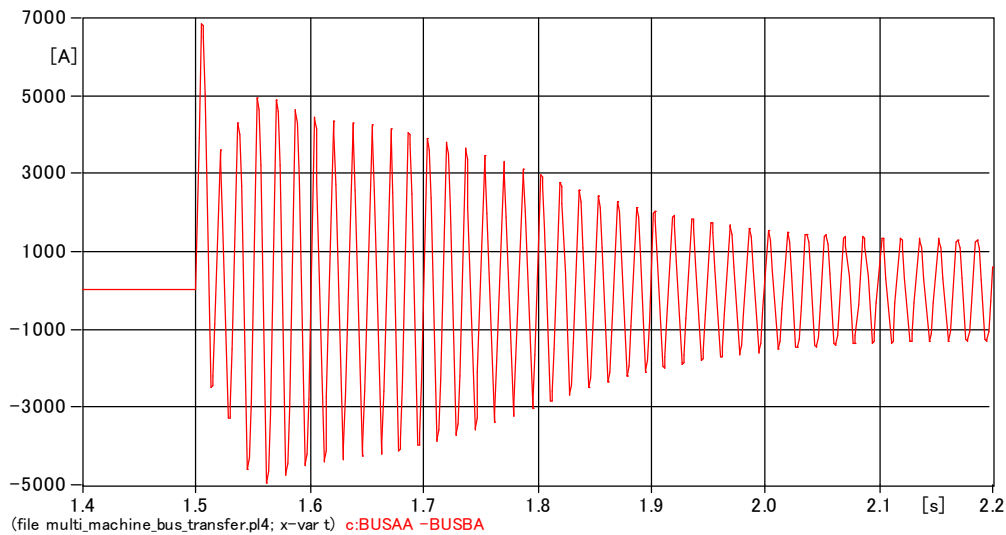
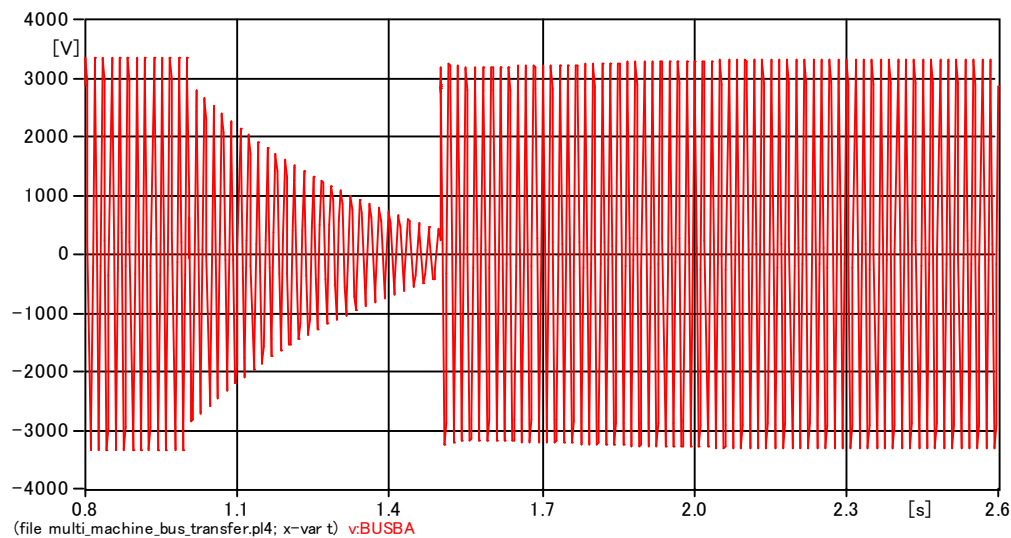


Fig. 14. 2. 1-1 A 相突入電流

14.2.2 B 母線残留電圧と救援時の電圧低下

これらの救援時の B 母線電圧は Fig. 14. 1. 2-1 に示すとおりになります。

救援直後の母線電圧は約 95% 電圧に低下しています。



14. 2. 2 B 母線残留電圧と救援時の電圧低下

14.3. ABSOLUTE U.M. DIMENSIONS について

多機系のシミュレーションで留意すべき点として ABSOLUTE U.M. DIMENSION に関するものがあります。

(ABSOLUTE U.M. DIMENSIONS については Rule book Rb-020.pdf 中の II-A-2 項及び Rb-090 中の E. 1. 「全体のファイル構成」、和訳版 Rule book の E. 2. 3. a 項をご参照願います)

プラント電気設備のように誘導電動機の台数が多いと、Default の ABSOLUTE U.M. DIMENSION を越える場合があり、その場合はエラーメッセージが出るので新しい DIMENSIONS に上書きする必要があります。

Default の ABSOLUTE U.M. DIMENSION を新しい ABSOLUTE U.M. DIMENSIONS に上書きするには ATPDraw で作成された ATP File にユーザが Fig. 14.3-1 の矢印個所で示すようにデータケースを走らせるのに十分な Dimension を宣言することにより Default の DIMENSIONS が上書きされます。

上書きの例

BEGIN NEW DATA CASE

→ ABSOLUTE U.M. DIMENSIONS, 165, 15, 90, 90

C DEL-T | T-MAX | XOPT | COPT | EPSILN | TOLMAT | TSTART |

C -----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

25.E-6 0.2

1.E-12 1.E-12

Fig. 14.3-1 新しい ABSOLUTE U.M. DIMENSION の宣言方法

以上