フライホイール発電機による過渡安定度向上の EMTP 瞬時値解析

正員 萩森 英一 (東芝)

EMTP Simulation of Transient Stability Enhancement Phenomena by Inverter Controlled Flywheel Generator
Eiichi Haginomori, member (Toshiba Corporation)

Flywheel generator, consist of a doubly-fed induction machine the secondary coil of which is fed and controlled by an inverter, has a feature of both effective and reactive power outputs in relatively quick response. The application of the machine for the enhancement of system dynamic stability has been discussed by simulations, where most calculations have been done based on phasor solutions. Targeting actual applications of flywheel generators, more accurate and precise calculation method, i.e. instantaneous value based one, has been desired.

Recently Electro-Magnetic Transient Program (EMTP) has been significantly improved and, without special difficulty, instantaneous value based calculation of transient stability involving flywheel generator(s), inverter(s), synchronous machine(s) and actual system parameters has become realistic.

This paper shows EMTP calculations of transient stability enhancement phenomena by flywheel generator, together with items necessary for application of EMTP for such calculations. Some results peculiar to instantaneous value based calculations are also shown.

キーワード：フライホイール発電機 (FWG)、過渡安定度、EMTP、瞬時値解析

1. まえがき

送電システムの過渡 (動態) 安定度をできるだけ向上し、系統を効率的に運用するために、例えば発電機自体の AVR/PSS 等の励磁制御、また系統の無効電力を制御する SVC/ SVG、有効電力をも制御する SMES 等が種々検討・実用化されている。本論文は SMES と同様に有効・無効電力の制御が可能で、現段階では経済性と早期実現性の面でメリットの大きいフライホイール発電機 (FWG) システムを設置した系統の解析に関するものである。なお、本論文では系統の地絡発生・除去から 1～2 秒間程度の短期間の同期発電機の動揺・脱調を FWG によって抑制する現象を主に扱う。

FWG の本体は二重給電交流機と呼ばれるもので、巻線型誘導電動機の二次側をスベリ周波数の交流で励磁し、特徴として可変速で力率を自由に制御出来ること、フライホイール機能を有することに加え、かなりの高速度 (最速 10ms 程度) でこれらの制御が可能であるなどがあげられる⁽¹⁾。また特に SMES と比較してハードの技術は今日ほぼ確立していること、さらに励磁のための変換装置の容量が FWG としての出力の数分の一ですむなど経済的メリットも大きい。今日、多少緩やかな、あるいは定常的な応答・動作を目的とした系統の電圧・周波数変動抑制のための FWG、また若干機能は異なるが可変速揚水の主機としてはすでに実用になっている。

FWG を本論文のように将来過渡安定度向上の目的に使用するための検討も既に行われている^(2～6)が、これらはいずれも実効値解析の範疇のもの、あるいは小規模の実験装置によるモデル実験である。過渡安定度に関する系統現象には非定常で一段と速い時間領域の現象も含まれ、従来の方法の検討ではこれらが見落とされている可能性もある。したがって FWG の高速度応答性を活かした本格的な実用化に向けては、機器の詳細過渡現象および実系統パラメータを考慮した瞬時値解析法によるシミュレーション技術の確立が求められる。

瞬時値解析法として EMTP を使用して、同じ二重給電交流機を適用する可変速揚水発電機の解析の報告^(12,13)もある。ただこの報告では、本論文で扱うようなインバータによる二次側の急速な励磁制御は扱っていない。EMTP は開発されて以来数々の改良が加えられてきており、最新のもの (付録 1 参照) では FWG 本体、同期発電機、FWG 励磁用インバータ等を含む系統の速い現象のシミュレーションも可能になり、また最近のパソコン (PC) の性能向上とも相まって、手軽に短時間に解析が行えるようになった。もちろん解析対象の範囲が EMTP メニューの多岐にわたるため、データ作成上の細かい配慮は必要である。本論文では基本的な一機無限大系モデルの電源の近くに FWG を設置し、その二次側をインバータで励磁するシステムについて EMTP で解析し、同期発電機、FWG 本体、インバータ等の詳細な振る舞いと

図1 二重給電交流機のベクトル図

Fig. 1. Vector diagram of doubly-fed induction machine

過渡安定度向上への効果等で新たに得られた内容、考察および課題について述べる。

2. 二重給電交流機のセンサレスベクトル制御

今回のFWGシステムを制御する側面から見て、対象がシステムの過渡安定度に関するものであることを考慮し、系統の短絡・遮断、開閉過電圧現象のような非常に短い過渡現象の時間領域は除外し、その後も数ms以下の時間領域の過渡現象は無視することができる。すなわち過渡安定度現象の主体は周期が1秒程度の同期発電機の世界変動・内部相差角のスイングである。したがって論点が少々飛躍するがFWG本体である二重給電交流機の運転・制御の状態・条件は、対象とする時間領域に対してバランス三相交流をベースとしたフェイズベクトルによって十分に表現できることが期待できる。もちろん速い時間領域の種々の過渡現象も解析の中では考慮され、それらの影響の有無は瞬時値解析故に確認できる。ここでは制御の側から見てバランス三相交流をベースにした以下の方法が過渡安定度の領域にまで有効であることを確かめることも目的とする。この方法の有効性は、過渡安定度現象ほど急激なものではない加・減速や力率の切り替えを行う通常の二重給電交流機の運転の範囲では、シミュレーションおよび実験によって既に確認している⁽⁹⁾。

図1は一次側（固定子側）から見た一相分のベクトル図である。出力は V_1 と I_1 で決まり、図は遅れ力率の電流を外部へ向け供給している発電状態を示している。ベクトルの向きは図中の上部の図に示す方向にとるものとする。回路の抵抗分の影響は十分に小さいのでここでは無視する。磁束 ϕ の向きに励磁電流 I_0 が流れ二次から流入する電流 I_2 との差の I_1 が一次端子から流出する。磁束より90度進んで内部誘起電圧 E_1 があり、一次巻線漏れリアクタンスによる降下分 $jX_1 I_1$ を差し引いたものが一次端子電圧 V_1 である。同様に一次から見た二次側では、スベリによる誘起電圧 sE_1 と二次端子に加えられる電圧 V_2 との差の電圧と、二次漏れリアクタンスによって決まる二次電流 I_2 が端子から流入

∞ : 無限大母線

SG : 同期発電機

FWG : フライホイール発電機

IV : インバータ

F : 母線電圧周波数検出

図2 一機無限大モデル系統

Fig. 2. Single machine to infinite bus model with FWG

している。

運転状態（出力・トルク）は磁束と回転子の電流、すなわち I_2 で決まり、磁束が常に比較的安定している条件下では I_2 を与える制御法は安定な運転状態を実現することになる。一方 V_2 を与えても定常的には間接的に運転条件が定まるはずであるが、この方法は速い変化に対して二次側の電圧過渡現象が大きく影響して I_2 が定まりにくく、安定な運転状態が得にくい⁽¹¹⁾。したがってここでは I_2 を与える制御法を採用する。

図1は一次側から見たもので、実際に供給する I_2 はスリップリングを介して二次巻線に与えるものである。すなわち二次に与える電流は二次巻線の位置をベースにしたものに換算する必要がある。このために回転子の位置の情報が必要である。EMTPは位置センサ出力に相当するものを自動的に計算・出力しているので、シミュレーションには位置センサ出力としてそれをそのまま使うこともできるが、ここでは将来の実機への適用をも指向して、保守の面でのメリットが期待できるセンサレスで位置の情報を得る方法を採用した。方法は前述のように三相バランス状態を前提にした制御であることに着目、一次側端子での電圧・電流情報から図1にもとづいて算出した一次から見た I_2 と、二次端子を流れる実際の I_2 とを比較し、その位相差を位置情報とするものである。各ベクトルの振幅と位相は、各々の三相の瞬時値からクラーク法により直軸および直角方向成分を求め、算出した。本方法はバランス三相条件下で比較的緩やかな現象には正確である⁽¹⁰⁾。一方、過渡安定度解析での電圧・電流過渡現象あるいは場合によっては直流分電流を含むもの、またかなり急激な二次側の制御条件でどの程度実用になるかの見極めも本論文の目的である。

3. 解析対象

<3.1 系統構成>

図2に解析の対象とした系統の全体を示す。一般的に過渡安定度解析に使われるもので、一機無限大系統の電源側高電圧母線に変圧器を介してFWGを接続し、その二次側をインバータで励磁するものである。送電系統は中間開閉所付き275kVの直接接地系で延長150km、

表 1 二重給電交流機諸元

Table 1 Doubly-fed induction machine parameters

定格電圧	kV	11
定格容量	MVA	200
周波数	Hz	50
極数		6
励磁リアクタンス	pu	2.75
一次漏れリアクタンス	pu	0.142
同 抵抗	pu	0.0045
二次漏れリアクタンス	pu	0.142
同 抵抗	pu	0.0045
慣性モーメント	10^6 kg m^2	0.18
機械損(同期速度にて)	MW	3

EMTP の計算効率と精度のよい分布定数モデル(正相抵抗： $0.019 \Omega/\text{km}$ 、同サージインピーダンス： 276Ω 、伝播速度： 291000 km/s 、零相は $1.41 \Omega/\text{km}$ 、 955Ω 、 204000 km/s 、2 回線併架)とし、逆相電流で発電機の現象が煩雑になるのを避けるためねん架線路とした。発電機および FWG は通常的方式である変圧器を介して低圧側のデルタ巻線に接続するものとし、発電機・FWG には零相成分は生じない。

<3.2 FWG> 表 1 に FWG 本体の二重給電交流機のパラメータを示す。定格容量は、ここでは同期発電機容量の 17% 程である。EMTP では二重給電交流機の一次二次巻線の巻数比を 1 に固定しているので、表の二次のパラメータは一次に換算した値に相当する。一次、二次ともに円筒巻線であり、 d 、 q 軸とも等しいパラメータを使用できる。またパラメータは EMTP の入力方式に合わせ T 型等価回路に基づくものである。解析は瞬時最高出力を FWG 定格の 150% 程度の過負荷まで行った。

<3.3 インバータ> FWG の二次側の励磁電源として、前述のように過渡期間の瞬時瞬時に所要の振幅・位相の三相交流電流を発生させるものが必要である。ここでは、電流制御性のよいヒステリシスコンパレータと呼ばれる電流制御式電圧型インバータを用いた⁽¹⁵⁾。このインバータの出力電流波形は細かい鋸歯状波になるが、励磁の交流周波数はスベリに相当して数 Hz 以下であり、また電流波形精度の FWG 動作への影響に関しては制約が比較的緩やかであることをシミュレーションで十分に確認してある⁽⁹⁾。また上記インバータに課するスイッチング周波数の制約は発生させる電流の周波数が数 Hz 以下故に比較的緩やかにできることも考慮して、ここに示すタイプを決めた。後述のようにインバータの直流電源電圧はあまり低いと所要の電流波形を発生させることができない。ここでは試行錯誤により各種解析した中で最も高い値を必要としたケースでの最低値に固定した。

<3.4 同期発電機> 表 2 に今回採用した同期発電機のパラメータを示す。山側の複数台の突極機をまとめたものを想定し、EMTP の入力方式に沿って示す。EMTP の中では Park 領域のパラメータに換算されて計算が行われる(付録 1 参照)。今回の解析では表中に示すように励磁飽和特性を考慮した⁽¹⁶⁾。付録 2 に概略を述べるが、励磁飽和特性を考慮し、系統短絡電流に直流成分が大きい条件での過渡安定

表 2 同期発電機諸元

(突極機、開放時時定数、 q 軸渦電流巻線無視)

Table 2 Synchronous generator parameters

Salient poles, open-circuit parameters, without g-winding

定格電圧	kV	24
定格容量	MVA	1200
周波数	Hz	50
極数		6
X_d	pu	1.048
X_q	pu	0.64
X_d'	pu	0.299
X_d''	pu	0.214
X_q''	pu	0.278
$T_{d o'}$	s	6.4
$T_{d o''}$	s	0.033
$T_{q o''}$	s	0.04
T_a	s	0.214
慣性モーメント	10^6 kg m^2	1.045
界磁励磁電流特性	A	
無負荷誘導電圧	1.0pu にて	550
	1.2pu にて	900
非飽和時特性	1.0pu にて	500

度解析を瞬時値解析法で行った際に、過渡安定度上不利な条件となる特異な現象が現れることがある。今回の解析ではこのような条件下で、FWG を適用した際の効果を見ることも目的にした。今回は FWG の基本機能の検討を主眼におき、発電機に AVR/PSS 等の励磁制御は設けていない。

<3.5 FWG の制御、解析条件> 初期の潮流状態を定める初期値として発電機と FWG の端子電圧をそれぞれ 1.05p.u.、1.03p.u.、無限大母線電圧を 1.0p.u.、FWG の出力は 0 (同期速度で運転)、発電機の出力はケース毎に表 3 に示す初期潮流値を与えた。系統に動揺を与える条件としては、図 2 に示す電源至近端での線路三相地絡を 100ms 後に両端の遮断器で除去し、中間開閉所までの 1 回線を開放するものである。故障電流の直流分の大小は故障発生のタイミングで決まり、商用周波の電圧零瞬時に短絡したときに最大、波高値での短絡で最小になる⁽¹⁴⁾。また、三相回路では各相それぞれの電圧零、あるいは波高値のときの短絡で全体の直流分が最も大きく、あるいは小さくなる。ここでは各相の故障発生タイミングに 1/6 サイクルの時間差を導入して各相とも電圧零あるいは波高値での故障発生となるようにした。これにより前述の同期発電機の特異現象の影響およびこのような条件下での 2 章のセンサレスベクトル制御の有効性をみた。

FWG の有効電力出力 (P) と無効電力出力 (Q) の制御は、図 1 および 2 章に示す方法で V_1 に対して所要の P/Q に相当する I_1 から、対応した I_2 をベクトル演算で求め、その位相を回転子の前述の方法による位置情報で二次ベースのものに変換して、インバータ制御部へ電流制御の基準値として与える方法によった。EMTP では TACS 内の演算で行う。なおここでの制御は、 I_2 の指令値をインバータに与えるのみのフィードフォワード制御である。過渡安定度向上のための動揺抑制制御として、発電機の回転速度あるいは内

表 3 FWGによる過渡安定度向上解析結果
(各初期潮流での安定度維持可能条件、 k_p, k_q は制御係数の相対値)

Fig. 3 Calculation results of transient stability enhancement by FWG

Nos.	短絡電流 直流分	初期潮流 MW	FWG 有効電力 最大出力 MW	FWG 無効電力 最大出力 MVA	FWG 皮相電力 最大出力 MVA	インバータ 最大出力 MVA	制御係数 k_p, k_q
00	最小	1150	-----	-----	-----	-----	-----
01	最小	1157	5	6	8	6.75	0.0 0.0
02	最小	1268	79	427	432	44	0.4 2.6
03	最小	1268	84	564	570	56	0.0 3.3
04	最小	1268	230	197	303	38	2.1 2.1
05	最小	1268	304	118	326	38	3.0 1.5
06	最小	1268	356	157	389	47	4.2 1.7
10	最大	1000	-----	-----	-----	-----	-----
11	最大	1140	≒ 0	28	28	22	0.0 0.0
12	最大	1213	21	606	607	56	0.0 5.5
13	最大	1213	94	385	396	47	1.0 4.0
14	最大	1213	199	228	303	37	2.5 2.5
15	最大	1213	230	175	289	38	3.0 2.0
16	最大	1213	283	105	302	40	4.2 1.3

図 3 安定度限界潮流の向上と FWG 短時間最大出力
Fig. 3. FWG maximum outputs necessary for the enhancements of the critical power flows

部相角に直接関連するものを適用することが有効であることは論を待たない。今回は将来の実用面も考え、高電圧側母線電圧の周波数の変化 (ΔF) を用いた⁽⁷⁾。ここでは最も単純に ΔF (同期発電機加速、内部相角増加方向) に比例して、 $-P$ (有効電力吸収) および $-Q$ (進み電流の吸収すなわちコンデンサ状態) を単独あるいは同時に発生させるように FWG を制御した。表 3 の k_p, k_q は有効・無効電力を発生させる制御関数の中で使用した係数の相対値である (解析計算で実際に使用した係数はこれらの 10^8 倍の値)。FWG の制御は地絡除去後の母線電圧が回復・安定してから

(故障遮断後約 30ms 以後) とした。母線電圧の周波数は TACS 内のデバイス (周波数メータ) で求めた。

4. 解析結果

表 3 に解析結果の一覧を示す。解析はいずれも前述の故障電流直流分が最大 (No. 10~16) と最小 (No. 00~06) になる条件で行った。手順としてまず FWG を設置しない状態での過渡安定度維持可能な初期潮流 (発電機出力) 上限を約 2.5% のギザミ幅 (以下いずれも) で上昇させつつ求めた (No. 00, 10)。次に FWG を設置し、有効電力出力、無効電力出力の制御係数 k_p, k_q を共に 0 として FWG 出力をほとんど出させない条件で同様に初期潮流上限を求めた (No. 01, 11)。さらに制御係数 k_p, k_q を同じ値でかつ FWG の出力 (短時間の最大値) が定格の約 150% となるものを求め、この状態で過渡安定度維持可能な潮流上限を求めた (No. 04, 14)。ただし潮流 (発電機出力) は定格を若干上回った条件まで解析した。最後に同じ初期潮流条件で k_p, k_q それぞれを約 10% 幅で適宜変え、試行錯誤的にその値より k_p, k_q のいずれを減じても安定度が維持できない下側の組み合わせを求めた (No. 02, 03, 05, 06, 12, 13, 15, 16)。表中には各条件下での初期潮流、 k_p, k_q 、FWG の短時間の最大出力を示す。

図 3 は同じ結果をインバータの有効・無効電力最大出力に関して図示したものである。

図 4 に No. 04, 06, 14 の解析で得られた波形を示す。FWG の最大出力 (トルクから判断できる。) の継続時間は 0.5 秒間程度である。

なお、EMTP の正味の計算時間 (Time-step loop) は 1 ケースあたり、FWG システムのないケース (00, 10) で約 5 秒、その他のもので約 30 秒であった (Pentium 133MHz PC 使用)。因みに入力データは TACS 150 行を含め合計約 350 行である。

a) 短絡電流直流分ナシの場合(No. 04)

b) 短絡電流直流分最大の場合(No. 14)

図4 発電機、FWG、インバータの動作

Fig. 4. Responses of the generator, FWG and inverter

5. 考察および今後の課題

FWG に関する EMTP 瞬時値解析で明らかになった内容、考察ならびに今後の課題について述べる。

<5.1 今回明らかになった内容と考察>

(a) 表3のNo. 00と10はFWGを設置しない通常の過渡安定度解析の結果であるが、両者の比較で、短絡電流に直流分が多く含まれる、いわゆる逆動揺条件下⁽⁸⁾で一般に言われるのと逆に加速方向に発電機内部角度が大きく振れ、安定度限界潮流が約15%低い結果が得られた。定性的に概略を付録2で説明するが、詳細・定量的な検討には、励磁の非線型飽和特性と過渡的な直流分を含む電流を考慮する必要があり、EMTPのような瞬時値をベースにした数値解析によるのが適当と考えられる。今回のFWGの解析

にも現象としてそのまま導入したが、この現象のみの詳細は別途検討する所存である。No.01と11はFWGを設置し、制御は行わない空回し状態であるが、特に11の短絡電流の直流分が大きい条件で、前述10の不利な現象は自動的に抑制され、安程度限界潮流は直流分最小の場合(No.01)とほぼ同じ値にまで増加する現象が見られ、この時に直流分が故障除去後にFWGと同期機で間で還流している。直流分のない場合のNo.00とNo.01の比較ではこのような増加現象はなく、No.11の現象が単に見掛けの短絡容量の増加によるものではなく、同期機とFWGの組み合わせによる現象と考えることができる。

(b) 図4 a)はNo. 04の短絡電流直流分最小の場合で、故障除去後発電機の加速、すなわち ΔF 増大につれFWGのトルクすなわち有効電力が吸収方向に現れ、発電機のス

c) 直流分ナシ、FWG-P感度最大、Q感度中(No. 06)

図4 (つづき)
Fig. 4. (continued)

イングを抑制している。短期間には三相のアンバランス等の非定常な現象は当然生じているものの、今回採用した定常状態をベースとしたセンサレスベクトル制御法でFWGが有効に機能していることがわかる。FWGの速度は有効電力を吸収して若干加速している。また二次電流の周波数がスベリに相当する。インバータ電流は一相分の正・負の直流電圧源に接続されているバルブの電流の和を示している。縦線が切り替えを表し、空白部分が長いことは、直流電源電圧が下限に近く、インバータの電流制御基準値のヒステリシス幅の下限または上限に電流が達せず、正負バルブの切り替えがある時間行われないことを示し、電流波形が基準値から多少偏移している可能性を示している。よってインバータの直流電圧を変えながらのインバータ電流波形の解析で、直流電圧の下限、すなわち必要なインバ

ータ容量を解析により求めることができる。

(c) 図4-b)はNo. 14の短絡電流直流分最大の場合で、過渡安定度限界潮流の向上に対するFWGの効果は、同程度のFWGの出力に対して直流分最小の場合(No. 04)とはほぼ同等である。FWGを設置した場合には前述の励磁の飽和と直流分による限界潮流低下は極少ない(No. 11~16とNo. 01~06の比較)。直流分最小と大きく異なる現象として、地絡除去後にもFWGの電流に大きな直流分が残っており、トルクに商用周波の脈動を生じている(図4b))。また二次巻線に商用周波の電圧が誘起され、インバータの容量(直流電圧・内部抵抗)が有限であり、電流を制御し切れずにFWG二次電流にも脈動が残っている。一方で三相に直流分の存在する条件下でも今回採用したセンサレスベクトル制御法の二次制御電流ベクトルおよび回転子位置の算出は適切な結果を導出し、FWGは発電機のスイング抑制に有効に機能している。二次に誘起される電圧に関して今回の条件は同期速度付近での回転中に一次巻線に直流分が流れる状態である。これは、停止状態に一次側から交流電圧を印加したものとほぼ同条件となる。したがって巻数比に比例して一次電圧が変圧された電圧に漏れインピーダンスによる低下を考慮したものが二次に現れることになる。前述のように巻数比1でのこの解析では一次電圧約9kV(対地波高値)に対して約7kVが発生している(図示省略)。二次側に比較的高い内部インピーダンスの電源が接続されることも影響し、巻線の絶縁設計上この電圧を配慮する必要がある。

(d) 図4c)(No. 06)は直流分ナシで有効電力の制御係数 k_p のみを極端に大きく、一方 k_q は小さくしたケースで、FWGのトルクはNo. 04の場合の150%程度と相当に大きく発生している。すなわち大きな有効電力を吸収している。しかし発電機のスイングの抑制効果は大きくない。図4a)(No. 04の条件)と本条件である図4c)の発電機端子電圧をFWGの作用が最も大きい計算開始後約1秒のところで比較すると、本条件での低下がより多く、ともなって高電圧母線電圧(図示省略)もさらに多く低下しており、一方で発電機トルクはほぼ等しい。これにより潮流・発電機出力が制限されるためFWGが無限大母線側からもエネルギーを吸収していることが理由である。なお、FWGの二次の電流・皮相電力も大きく、過渡安定度向上のための制御法として効率が良くないことが示されている。また前述のインバータの切り替えの行われない時間も長く、所要の電流波形を発生させるためにはインバータ容量(直流電圧)がやや不足している。一方で無効電力を主体とする制御(No. 03、12)はさらに効率が悪い。

(e) 図3で明らかなように、FWGの過渡安定度向上に対する効果・効率は有効電力(P)と無効電力(Q)出力が同程度のときに最も高い。すなわちこの条件にあるNo. 04、14、15の場合、FWGの出力(この図では原点からの距離)が小さいにもかかわらず他の条件のものと同じ効果を得ている。串型系統にSMESを設置した場合の同様の

検討⁽⁷⁾で、P による制御が Q によるものよりはるかに有効であるとの報告があるが、今回のケースでは P だけあるいは Q だけによる制御は効率が悪い。

(f) 今回の解析では前述のように同期発電機の AVR/PSS などの励磁制御を考慮していない。これら励磁制御は電圧の制御、すなわち Q 制御に相当し、これを採用する場合は(但し図 4 に示すここでの FWG のトルク出力の速さに見合った時定数 0.1 秒程度の高速度制御が可能な場合) FWG の Q 制御条件が緩和されることになる。また FWG の設置箇所が電源から遠いか近いかも影響を及ぼす。系統の形、設置箇所、潮流条件等により経済的最適条件は異なり、個々のケース毎に検討する必要がある。

(g) 表 3 に示すインバータの出力は、いずれのケースも FWG 出力の数分の一以下である。今回の結果で同程度の容量・機能を有するものとして SMES との経済性比較をするとすれば、SMES 本体に対して二重給電交流機本体を、またインバータ・変換装置に関しては SMES 出力の 100% 容量のものに対して、容量が数分の一のもので済むことになる。FWG システムは今日の技術で既に十分実用化可能であり、当面は有利なものと考えられる。なお、今回示したように、必要な機器の容量の精密な算定など、経済性の検討の基準としても EMTP 瞬時値解析は有効と考えられる。

<5.2 今後の課題>

特に主要と思われるものを列記する。

(a)5.1(a)および付録 2 に示すように、発電機の励磁飽和特性と短絡電流直流分により、過渡安定度の面で限界潮流が今回の解析では 15% 程度低い不利な条件があること、さらに FWG を設置することによりこれが緩和されるとの結果が得られた。限界潮流の低下には励磁飽和の程度、系統定数、また直流分含有率(今回は理論的最大値と最小値のみ扱った。)が影響を及ぼすことを(別途) EMTP 解析により得ている。前述のように本現象の定量的検討は、非線型要素での過渡現象であり、EMTP 等の数値解析によるのが適当と考える。一般的な傾向を知る上でさらに数多くの解析と検討が必要である。また直流分の大きさについても、単にここでのように理論的な最大値を採用するのではなく、統計・確率的に実際の値を採用することも検討すべきであろう。また EMTP が妥当な結果を算出しているかについてもさらに十分検討する必要がある。

(b)今回採用しているセンサレスベクトル制御はバランス三相の定常状態を前提にしたものであるが、ここでの解析の範囲では系統の過渡安定度解析の領域まで正常に機能した。実際の広範囲の系統条件でロバスト性がどこまで保証できるかについては、具体的に多くのケースについてのシミュレーションにより確かめることが必要である。

(c)前述のように今回の解析では同期発電機の AVR/PSS は省いてある。実際の系統計画の際には高速度応答 AVR の可否、他の例えば SVC のような調相設備との併用等も考慮し、系統全体として最も経済的な FWG の P/Q の制御

条件を求める必要がある。

(d)FWG の二次回路、特に二次巻線の電流・電圧ストレスは従来の用途の二重給電交流機よりかなり厳しいものとなり、絶縁・機械強度の十分な巻線の開発が必要である。この点に関する仕様の決定にも EMTP 解析は有用である。

6. むすび

系統の過渡安定度向上を目的とする FWG システムを設置した一機無限大系統で、主機をインバータで励磁・制御するものの EMTP による瞬時値解析を行い、解析が十分可能であることを示した。また FWG のセンサレスベクトル制御の過渡安定度領域での有効性、今回の系統構成では FWG の制御法として有効電力、無効電力をほぼ同等に出力するものが効率が良いこと、制御電源のインバータ出力は FWG 出力の数分の一で済むこと、短絡電流直流分有無による発電機・FWG 主機の二重給電交流機・インバータの振る舞い等が得られた。また、今後検討すべき課題として、発電機の励磁飽和特性と短絡電流直流分を考慮した場合の短絡現象の詳細、FWG のセンサレスベクトル制御の実系統でのロバスト性、発電機の AVR/PSS 採用時の制御最適化、主機二重給電交流機の電圧・電流・機械的ストレス等の解明の必要性を明らかにした。今回は省略するが、ここでの EMTP 瞬時値解析法は 10 機程度までの多機系統にも十分適用可能であることも確かめており、実際のケースでの FWG システムの設計・エンジニアリングツールとしての活用が期待できる。

今回使用した EMTP の改良にあたり、Scott Meyer 氏(米国 BPA)、村井氏(岐阜大)および菅氏(東芝)の大きなご尽力があったことを感謝して報告する。また、筆者の東京工業大学寄附講座に在任中の卒業・修士論文研究として本研究の一部に従事した丸橋勲、島津正毅、田中孝佳、萩野進也の諸氏および長峯規之助手に謝意を表す。

(平成 8 年 9 月 5 日 受付、同 9 年 5 月 22 日 再受付)

文 献

- (1) 高橋、西島羽「回転機二次励磁方式を用いた万能障害電力保証装置」電学論 B Vol.107 No.2 (昭 62) p73
- (2) 佐々木、阿部、炭谷、菅田「過変速調相機とその電圧制御特性について」電力技術研究会資料 PE-92-55
- (3) 古矢、松本、野原、小柳、高梨「過変速調相機による系統安定化について」同上 PE-92-56
- (4) 金城、宮城、野原、山本、高梨「フライホイール発電システムによる系統周波数変動抑制について」同上 PE-92-114
- (5) 西尾、他「SRSS (高速応回転型系統安定化システム)ー」平成 8 年電学電エネ部大予稿 376、377、378
- (6) 道上、他「過変速揚水発電機の安定度解析、その 1、その 2」昭 62 電学全大予稿 983、984
- (7) 藤田、後藤、鬼頭「母線電圧の周波数偏差に着目した

付図1 短絡電流直流分有無での発電機応答
Fig. A1. Generator responses under with and without DC components in short-circuit currents

超電導エネルギー貯蔵装置による多機系統の動態安定度向上制御」電学論B Vol 114 No.2 (平6) p137

- (8) 田村、武田、高瀬、長谷川、小島、鈴木「同期機の電機子過渡現象を考慮した電力系統シミュレーション手法」電学論B Vol 116 No.2 (平8) p225
- (9) 田中、島津、萩森「二重給電交流機の実験と検討」平7電学全大予稿 976 (平7-3)
- (10) 萩野、萩森「位置センサを必要としない二重給電交流機の有効・無効電力制御」平8電学電・エネ部大予稿 628 (平8-8)
- (11) 島津、丸橋、萩森「二重給電交流機の基本特性の検討」平6電学全大予稿 831 (平6-3)

- (12) 柳澤、田口、阿部、金子、影山、岡村、楠「可変速揚水発電システムの故障時過渡特性解析 (その1)、(その2)」電学論B Vol 115, No.2 (平7)、p117, p125
- (13) 柳澤、田口、阿部、金子、影山、岡村、楠「可変速揚水発電システムの故障時過渡特性解析 —一回転速度変化の影響—」電学論B Vol 115, No.12 (平7)、p1406
- (14) 電気学会大学講座「過渡現象論」昭46 (57版)、第3章、3.2、p68
- (15) 電気工学ハンドブック(1988)、16編、5.2.3 PWM制御、(d)PWMによる電流制御
- (16) W.Scott Meyer, Tsu-hei Liu, "EMTP Theory Book," p8-57, July 1995, BPA, Portland, Oregon, USA

付 録

1. 使用した EMTP および入力データの作成

今回使用した EMTP は ATP グループによる PC 用の版 (96-7-8 付) である。使用して見て、今回の解析内容に関連しての最近改良されたと思われる内容は、：

＊入力可能なデータの大きさを決める DIMENSION が可変になった。

＊多数のスイッチを使用する場合の誤動作が少なくなり、これによりインバータと二重給電交流機を一つの回路内に置くことが可能になった。

＊同期機の Park 領域パラメータの算出が適切に行われるようになり、界磁電流の評価がより正しく行えるようになった。また開放時・短絡時データの適用、機械定数の METRIC 数値の使用が可能となった。

＊同期機、Universal Machine で励磁飽和特性を考慮した計算の安定性が増し、多機系統解析にも適用が可能になった。

しかしながら EMTP 入力データ作成に関し、今日なおもテキストにない使用上の制約が多々ある。今回の解析で配慮した主な点は、：

＊同期機は同期機専用のものと Universal Machine のメニューで計算できるが、筆者の経験では計算精度、安定性、自由度、計算時間などほぼ全ての点で前者が有利であった。

＊二重給電交流機は Universal Machine により計算するが、Compensation 法と Prediction 法が可能である。励磁飽和特性を考慮した多機の場合は後者によらざるをえないが、機能・安定性は前者が優れていて、計算時間も大差ない。

＊同期機、Universal Machine とともに励磁飽和特性を考慮した計算が十分安定に行われる。ただ巻線漏れリアクタンス部へは非線型は導入されていない。

＊今回の解析対象での自動初期潮流設定は、同期機は端子電圧振幅・位相、二重給電交流機はスベリと二次電流振幅・位相を与える方法が有効であった。ただし双方同時の設定はうまく行かず、事前に同期機の条件を別途算出しておき、シミュレーション計算では二重給電交流機のみ自動設定とする必要があった。二次励磁電源は計算スタート時は一般の交流電源とし、ステップ計算に入ってからインバータに切り替える方法が計算の効率がよい。

*EMTP 計算データ(例)ご希望の際は文末 E-Mail まで連絡されたい。

2. 励磁飽和特性を考慮した過渡安定度解析

付図 1 に本文の解析ケース No.00 (短絡電流直流分ナシ) と 10 (同最大) での発電機の相差角度、電気トルク、端子電圧、フィールド (界磁) およびダンパー電流を重ね描きで示す。但し初期潮流は双方とも 1000MW に揃えた。また、励磁飽和特性は表 2 に示す。直流分アリでの結果をナシと対比すると、相差角は一般に言われるように当初若干の逆動揺が見られるが、その後大きく逆転して振れはむしろ大きくなる。呼応してトルクは脈動の平均値でやや小さい。端子電圧も脈動の平均値で 10%程度低い。よってこの間の潮流・トルクの小さいことと一致する。これらの原因になっていると思われるが、界磁電流が短絡中から短絡除去後にかけて小さい。

筆者のこれまでの EMTP 解析による経験は以下のようである。:

*ここでの現象は程度の差はあるものの突極・非突極、あるいは発電機定数にかかわらず励磁飽和特性と短絡電流の直流分を考慮した解析で現れる。

*短絡電流の直流分が大きいほど、また励磁の飽和特性が深いほど現象が顕著である。

*解析結果緒量をさらに詳細に見ると、短絡前は飽和領域にあり、短絡中に飽和領域と非飽和領域を行き来する際に現象が顕著になって行く。

これらをもとに本現象のさらに詳細な検討を進めたい。

萩森 英一 (正員) 1940 年 1 月 2 日生まれ。62 年 3 月東京工業大学電気工学科卒業。同年(株)東芝入社。空気遮断器・ガス遮断器開発設計に従事。76 年以降 IEC-SC17A-WG10 および WG21 で IEC の主として遮断試験規格立案。91-96 年東京工業大学寄附講座客員教授。工博。IEEE 会員。

E-Mail : hgnomori@pts.hby.toshiba.co.jp