日立製作所における最近の系統解析技術と その適用例

Technology for Power System Analysis

田中愁佳夫*	Yukao Tanaka	小 西 博 雄***	Hiroo Konishi
束田益男**	Masuo Tsukada	後藤益雄****	Masuo Gotô





電力系統解析用シミュレータ

系統解析用シミュレータにより、発電機、送電線、負荷などの要素モデルを組み合わせて電力ネットワークを模擬し、リアルタイムで系統現 象を解析し、異常現象の解明や電力系統の制御システムの開発を行う。

電力需要の増加に伴い、電力系統は年々拡大し複 雑化してきている。そのため、各種安定度問題の評 価や,新しい制御保護システムの開発,導入効果の 検証も難しくなってきている。さらに, 直流送電や 各種新エネルギー電源を中心として、サイリスタ変 換器を利用した電力機器の導入が、電力系統の需給 対策や広域安定運用のために広く検討されている。 大規模・複雑化する電力系統では、解析によって系 統の特性を正確に把握し,異常現象を予見し,対策 として制御・保護システムを提案・開発することが 重要である。

日立製作所は、このための系統解析ツールとして 実現象と同じ進行速度でディジタル解析ができる電 力系統用リアルタイムシミュレータを導入した。実 装置と組み合わせて解析することができるので,例 えば, 直流送電制御装置の開発や検証試験が簡単か つ短期間で行える。また、電力変換器が発生する高 調波に起因する変換器と交流系統との干渉による高 調波不安定現象を解析する新しい手法を開発した。 これにより、比較的弱い系統に接続された電力用変

換器の高調波安定性の解析評価が容易に行えるよう になった。

57

* 関西電力株式会社 ** 中部電力株式会社 *** 日立製作所 日立研究所 工学博士 **** 日立製作所 電力事業部 工学博士

1 はじめに

電力需要の増加に伴い,電力系統は年々拡大し複雑化 してきている。さらに,直流送電や各種新エネルギー電 源を中心として,サイリスタ変換器を利用した電力機器 の導入が電力系統の需給対策や広域安定運用のために広 く検討されている。大規模複雑化する電力系統では,解 析によって系統の特性を正確に把握し,異常現象を予見 し,対策として制御・保護システムを提案・開発するこ とが重要である。

電力系統解析には数値解析(ディジタルシミュレーション)とアナログシミュレータ解析がある。これらの解析 方法には一長一短があり,解析の目的に応じて使い分け る必要がある。場合によっては,両者の解析が必要とな ることもある。

ここでは、これら電力系統解析技術として、まず解析

表 | 電力系統解析手法

電力系統の系統現象は広範囲の時間領域にわたり,解析には事象 に応じた解析手法の使い分けが必要である。

解 析 手 法						時間域(s)	代表的な解法	
	潮		流	1	解	析		ニュートンラフソン法
数値解析	故		障	障 角		析		対称座標法
	居	ŧ	波	数	解	析		数值積分法
	5	F	定	度	解	析	÷	
	1	過	渡	安	定	度	0 ⁻¹ ∼ 0	数值積分法
		定	態	安	定	度		固有值法
		電	注圧	安	定	度	$ \sim 0^{3}$	多段潮流計算法
		高	調	波	安定	度		固有值法(5章参照)
	瞬時過渡現象解析					7 析	0 ⁻³ ∼	EMTP
シミュレータ	サージシミュレータ					- タ	0 ⁻⁶ ∼ 0 ⁻³	縮小モデル方式
	NA	系系	充シ	ב צ	レ-	- タ	0 ⁻³ ∼ 0 ⁻²	電子モデル方式

変化を求める過渡現象解析がある。すべての現象に対し 共通に対応できる系統解析プログラムはなく,おのおの

手法の概要について述べ,解析ツールとして日立研究所 にカナダマニトバHVDCリサーチセンタから導入し設 備した数値解析を実時間で解析することのできる装置 (RTDS: Real-Time Digital Simulator)とアナログシ ミュレータとして日立製作所で開発した系統解析用シミ ュレータの概要を紹介する。また,実系統での解析手法 の適用例について紹介する。さらに電力会社間連系とし て適用が検討されている周波数変換設備や,直流送電設 備の交直変換器が発生する高調波に起因する変換器と交 流系統の干渉による高調波不安定現象問題の解析手法を 新たに開発したので5章で述べる。

2 系統解析手法の分類

58

電力系統は50/60 Hzを基本とした三相交流回路に起 因する数ミリ秒から数十ミリ秒までの短時間の過渡現象 から発電機間の安定度問題,さらには電力潮流制御ある いは自動周波数制御などに関する数分から数十分までに わたる長時間現象の広い範囲の現象解析を必要としてい る。これらの現象を解析する電力系統解析手法を分類し て表1に示す¹⁾。

2.1 数値解析(ディジタルシミュレーション)

ディジタルシミュレーションは、電力ネットワークを

の事象に適合した解析手法を選択することによって解析 を行う。

汎(はん)用的な解析プログラムとして,安定度解析の S法,過渡現象解析として実行値ベース解析のY法,PSS/ E(Power System Simulator for Engineering),瞬時値 ベース解析のEMTP(Electro-Magnetic Transients Program), EUROSTAGなどが知られている。

2.2 アナログシミュレータ

アナログシミュレータは、電力ネットワークを構成す る発電機、送電線、変圧器などの縮小モデルを組み合わ せて電力系統をシミュレーションし、各種電気現象の挙 動を解析するアナログ型解析装置である。大きなネット ワークモデルを組むことが難しく、簡略化した小規模モ デルでの検証に限られるため、複雑な系統の解析ができ ないという限界がある。

3 解析ツール

数値解析を実時間で解析する装置をマニトバHVDC リサーチセンタから導入し日立研究所に新設した RTDS²⁾と,日立製作所が開発した系統解析シミュレータ について以下に述べる。

3.1 RTDS

従来,現象解析には実現象の数倍から数十倍の時間が 必要であった。最近,並列計算機応用でEMTPを実時間 で解く解析装置が開発されている。送電線の電圧,電流 の伝搬時間を利用して送電線で電力系統をサブシステム に分割することにより,大規模システムでも実時間解析

 南 放する発電機, 医電線, 貝何なとを数式モデルで表し,
電気現象を数値解析することによって電力系統の応動を
解析するものである。解析には,表1中に示す潮流解析,
周波数解析、および安定度解析のように電気現象の定常
状態での結果を求める定常解析と, 電気現象の時間的な



【特徴および効果】

1.リアルタイム解析→ハードの検証および試験
2.対話型解析→開発期間短縮(3か月→1か月)
注:略語説明 EWS(Engineering Workstation)

図 I RTDSによる装置の動作検証

実装置をRTDSと組み合わせて機能確認,動作試験・検証が行 える。 表2 系統解析用シミュレータ

系統解析用シミュレータは,実際の電力系統と同じく発電機,負荷,送電線などを模擬した要素モデルの集合体で構成される。

要素	長 モ う	デル	特	徴
発	電	機	 パーク方程式を実時間深 (同期機特性演算部,自 軸特性,プラント特性,係) 	寅算処理 1動電圧調整器-ガバナ, R護リレーを含む。)
負		荷	● 負荷をマクロな電圧-周 (周波数リレーによる負 時の部分負荷脱落の模	波数特性で模擬 荷遮断模擬や電圧低下 擬も可能)
ΗV	DC/S	V C	 ●実際の回路と等価な回 (損失補償あり, ディジタ) 	路モデル使用 ル制御装置を含む。)
送	電	線	 π形等価モデルで表現 (送電線定数はEMTPで) 	*計算)

注:略語説明 HVDC(High Voltage Direct Current Transmission) SVC(Static Var Compensator)

大および等価性実現に大きな制約となっていた発電機,

が行える。実際の現象と同時刻で解析が進行することか ら,解析結果をD-A変換することにより,実装置の現象 をシンクロスコープで観測すると同様に解析波形を観測 できる。また,実装置と解析装置を組み合わせて動かす ことができるので,試作装置などの機能検証を行うこと ができる。

直流送電制御装置と解析装置を組み合わせた装置検証 システムの構成を図1に示す。ワークステーション上で 対象とする系統を組み,系統の電圧と電流を解析装置で 解く。直流送電制御に必要なデータを解析装置からもら い,逆に制御装置からは変換器制御パルスを解析装置に 与えて,解析装置内の直流送電変換器モデルを動作させ ることによって制御装置の検証が行える。従来,装置の 検証にはアナログシミュレータや試験設備を用いて行っ ていたが,リアルタイムシミュレータを用いることによ って開発装置の動作検証が簡単に行え,試験・検証の時 間を短縮できるようになった。

系統解析データの作成は,要素モデルがモジュール化 されており,モジュールを組み合わせることによって系 統が容易に組める特徴がある。しかし,現装置の解析の 時間刻みは最小50 µsなので,時間刻みが短く速い現象は リアルタイムでは解析できない。また,扱える要素モデ ルに制限があり,すべての電力機器や系統制御装置がリ 負荷モデル部をマイコン(マイクロコンピュータ)技術を 適用しディジタル化することによって,小型かつ高精度 の大規模系統解析用シミュレータを開発した。この系統 解析用シミュレータの概要について以下に述べる。

系統解析用シミュレータは、実際の電力系統と同じく 発電機、負荷、送電線などの要素モデルの集合体となっ ている。代表的な要素モデルの模擬方法を**表2**に示す。 このほかに変圧器、調相用コンデンサ、リアクトル、直 列コンデンサ、制動抵抗、遮断器などの要素モデルがあ る。さらに、保護リレー、系統安定化システム、自動周 波数調整装置などの系統制御保護システムの機能も組み 込むことによって、単なる電力系統の回路現象を模擬す るだけでなく、より現実的かつシステム的な系統シミュ レーションが可能である。

関西電力株式会社総合技術研究所に納入した大規模系 統解析用シミュレータの全体構成を図2に示す。解析者 がワークステーションから必要なデータを入力すると, 単位系,定数変換などがホスト計算機で自動的に行われ, 伝送回路を介してモデル内のマイコンに設定される。シ ミュレーション時の操作は,高速処理が可能なシステム 制御装置によってワークステーションからあらかじめ設 定された手順に従って自動的に行われる

アルタイムで解析できるわけではない。これらについては、改良や新しいモデルの開発が予定されている。
3.2 系統解析用シミュレータ³⁾
日立製作所は、従来のアナログシミュレータで規模拡

系統解析例 4

4.1 北海道-本州間電力連系設備 I 期振動現象

北海道-本州間電力連系設備 I 期300MWで、本州から 北海道への電力融通時に直流電力に低周波の振動が発生



注:略語説明 SC,ShR (調相用コンデンサ,リアクトル), FEP (Front End Processor),

図2 系統解析用シミュレータの全体構成(関西電力株式会社総合技術研究所および中部電力株式会社納めの例) ホストコンピュータに接続されたワークステーションから、ほとんどのシミュレータ操作を行うことができる。

した。現象は本州からの融通電力を徐々に上げていき 280 MW送電となったときに発生した。交流系統特性を 含めた直流制御系のボード線図,過渡安定度解析プログ ラムなどを使って検討した結果,北海道側交流系統の電 Eに対する交直変換器が必要とする無効電力のゲインが 高いことが明らかとなり,交流電圧に対する直流制御系 のゲインを下げることによって解決した。

4.2 直流送電変換所の交流側過電圧解析⁴⁾

交流系統事故時に交流フィルタや調相設備の電力用コ ンデンサが接続されたまま直流送電の変換器を停止する と、交流系統に高い過電圧が発生する場合がある。過電 圧の発生状況把握は変換所の絶縁設計するうえで必要で あり、変換器の制御動作を含めた瞬時過電圧解析のため にEMTPを用いて解析した。

過電圧は系統の周波数-インピーダンス特性で,反共振 点の周波数が商用周波数の低次の整数倍に近い値とな り,かつそこでのインピーダンスの値が大きくなると, 低次の高調波電圧が基本波電圧に重畳されて過電圧値は 大きくなる。対策の一つとして,反共振点を高次に移す ため電力用コンデンサを系統から高速に切り離す方法が 考えられる。系統事故時の過電圧の発生状況とコンデン サを切り離したときの解析結果を図3に示す。この対策

60

により、問題のない過電圧とすることができた。

5 高調波安定性解析手法

開発した高調波安定性解析手法について以下に述べる。 高調波不安定現象とは,変換器の制御角のばらつきや 交流電圧のひずみによって発生する非理論高調波が,交

図3 交流系統三相地絡時の変換所母線電圧解析結果 電力用コンデンサの高速遮断により,地絡事故による変換器停止 時の過電圧発生を抑制できる。 流系統のインピーダンスが大きい場合に電圧高調波となって交流電圧のひずみを増大させ,さらに非理論高調波 を拡大していく現象である。直流送電などの変換器から 発生する高調波は交流フィルタによって大部分吸収され るが,非理論高調波は交流フィルタによって拡大される こともある。一般に交流系統の短絡容量比(交流系統の短 絡容量/変換器容量)が小さいほど,高調波不安定現象は 発生しやすいと言われている。

5.1 不安定現象発生メカニズムと解析手法^{5)~7)}

高調波不安定現象の発生メカニズムを図4に示す。交 直連系系統で,系統事故などによって変換器から高調波 電流が発生したとすると,以下に述べる三つのループに よってこれが帰還される。

(1) 高調波電流発生→高調波電圧発生→交流電圧波形のひずみ→重なり角変動→高調波電流発生

(2) 高調波電流発生→高調波電圧発生→交流電圧波形の

である。高調波の安定・不安定は(2)式[S]の固有値を調 べることによって求まり,固有値の絶対値が1よりも小 さければ安定,1よりも大きいときは不安定となる。

5.2 解析結果と検討

対象とした交流系統の概略構成を図5(a)に示す。変換 器はインバータ運転とし,容量は300 MWとする。交流 フィルタは5次,11次,13次およびHP(ハイパス)分路か ら成り,容量60 MVA,調相設備はトランスを介して40 MVAの電力用コンデンサが3台並列接続されて構成し ている。交流系統は短絡容量相当のインピーダンスで 表す。

交流系統の短絡容量比に対する基本波と二次モードの [S]行列の固有値解析結果を図5(b)に示す。基本波の固 有値は短絡容量比が大きくなるに従って小さくなってい る。基本波モードの固有値は系統短絡容量比2.2以下で 1よりも大きくなり,系統は不安定(基本波の不安定現

ひずみ→直流電圧変動→直流電流変動→高調波電流発生 (3) 高調波電流発生→高調波電圧発生→交流電圧波形の ひずみ→直流電圧変動→重なり角変動→高調波電流発生 このうち(2)と(3)については,非理論高調波が直流系統 側電圧の直流分にあまり影響を与えないことから,高調 波不安定現象の発生メカニズムとしては考えなくてよい。

今, 微小外乱などによって高調波電流が発生してから,
 上述の(1)のループをm回通った後の交流電流の変化を
 Δ Iac(*m*)と表すと, (1)式の関係が成立する。

象)となる。この結果は、直流送電設備の安定運転には 2~3倍以上の交流系統短絡容量が必要であるとの従来 の定説^{8),9)}と一致している。一方、二次モードでは交流系 統短絡容量比3.56~4.47に対して、系統インピーダンス

図 4 高調波不安定現象発生メカニズム 高調波不安定現象の解析ではループ(2), (3)の寄与は小さく, ルー プ(1)だけを考える。 2 3 4 5
 短絡容量比
 (b)短絡容量比に対する固有値

図5 高調波安定性解析モデルと固有値解析結果 基本波モードは交流系統短絡容量比2.2以下で,二次モードでは 3.56~4.47で不安定となる。

61

3.97としたときの解析波形を図6に示す。波形はインバ ータ側の交流電圧,インバータの直流電圧,直流系統の 電流およびインバータU相のAK間電圧である。解析は 300 msでインバータ側の交直連系点で3LG(三線地絡 事故)を70 ms間発生させた場合について行った。3LG によって系統電圧が約20%に低下するため,インバータ は転流失敗を生じている。事故除去によって交流電圧は 回復するが事故時の波形ひずみや交流電圧位相の変化に より,インバータは断続的に転流失敗を生じている。こ のため直流電流が大きく振動し,結果として交流電圧の 振幅が増加しており系統は不安定となっている。この結 果は先の図5の固有値による短絡容量比3.97で二次の高 調波不安定となる解析結果と一致している。

対策としては, 交流系統の二次のインピーダンスを下 げることが必要であり, 同期調相機や二次の交流フィル タを設置することがあげられる。また, 変換器制御によ

図 6 三線地絡事故時の動作波形(短絡容量比3.97) 高調波の発生によって変換器が転流失敗を繰り返し,交流電圧の 波形ひずみが拡大する。系統は高調波不安定の様相を示す。

の反共振点が二次に近づくため,固有値は1よりも大き くなり系統は不安定(二次モードの高調波不安定現象)と なる。

二次モードの不安定現象解析結果の検証のため, EMTPを用いて動作解析した。交流系統の短絡容量比を る高調波安定化も有効との報告8)もある。

6 おわりに

日立製作所が開発を行ってきた最近の電力系統解析技術について紹介した。解析技術については,解析プログラムの開発・整備,解析ツールの開発などを行うことによって,さらに高度化を図っていく。それと同時に,今後より効率的な解析を目指してデータ作成チェック支援システム,解析結果評価支援システムなどの周辺支援技術の開発¹¹も進めていく予定である。

参考文献

62

- 1) 電力システム高機能化研究会資料,東京工業大学(平4-3)
- 2) Manitoba HVDC Research Centre : The Digital TNA Has Arrived, CENTRE JOURNAL Vol.6, No.1, July 1993
- 3) 河合,外:実時間シミュレーションを可能とする電力系 統解析シミュレータ,日立評論,74,2,195~200(平4-2)
- 松野,外:HVDC送電における交流系事故時の過渡過電圧 様相,平6年電気学会B部門大会予稿No.236(1994-7)
- 5) Y.Yamagata, et al. : Lower Harmonic Resonances

- 6) 大浦,外:高調波不安定現象の検討,電気学会電力技術 研究会資料, PE-90-91,1990.7
- 7) 福山,外:直流単独送電系統の高調波安定度解析,電気学 会論文誌B, 107巻, 6号(昭62年)
- J.D.Ainsworth : The Phase Locked Oscillator A New Control System for Controlled Static Converters, IEEE Trans., Vol.PAS-87, No.3, pp.859~865
- 9) P.S.Bodger, et al. Controlling Harmonic Instability of HVDC Links Connected to Weak AC Systems,

Which Occurred at SHIN-SHINANO Frequency Converting Station, 2nd HVDC Operating Conference, Winnipeg, Manitoba, Canada, Sep. 18-21 1989 IEEE Trans. on Power Delivery Vol.5, No.4, Nov. 1990