

# 高調波シミュレーション技術

中西 要祐(なかにし ようすけ)

中森 昭(なかもり あきら)

壹岐 浩幸(いき ひろゆき)

## 1 まえがき

パワーエレクトロニクス機器の普及に伴い電力系統に流出する高調波とその影響が注目されており、高調波抑制対策ガイドラインによる高調波規制が行われるようになってきた。このため、機器の設計や機器の設置において、高調波の高精度な解析がますます要求されている。

本稿では、国内外における高調波解析手法の現状技術を述べ、富士電機の最近の解析事例について紹介する。

## 2 高調波シミュレーション解析技術の現状と動向

高調波シミュレーション解析には、高調波の発生メカニズムをシミュレーションし、その抑制手法の検討を目的としたものと、発生した高調波が電力系統にどのように分布しガイドラインに示された規制値に反するかの判定を目的としたものと、2方面の研究がなされている。

前者の主な研究は、スイッチング動特性を含めた機器回路構成を忠実に模擬し、その動作原理に基づき瞬時値シミュレーションを行い、発生する電圧電流瞬時波形を分析するものである。瞬時現象のシミュレーションには、EMTPやEMTDCなどの計算プログラム<sup>(1),(2)</sup>が広く利用され、発生した波形に対し、スペクトル解析などのデータ解析を用いて高調波あるいは分数調波の解析を行う。

このようなコンピュータシミュレーションに基づいた研究は、モデルの数式化を前提としており、またスイッチング現象の数値的不安定性を考慮した数値解法が課題となる。

一方、後者の研究では、基本的には高調波発生源を電流源として扱い、回路方程式を解くことにより各地点の高調波電圧や高調波潮流を求めるものであり、海外ではHAR MFLOやCYMHARMOなど、高調波潮流計算として著名なプログラムが発表されている。<sup>(3),(4)</sup>

後者のような解析的な手法としては、主に下記のような研究が挙げられ、今後需要家系だけでなく、高圧系統上の高調波探索などの課題にも寄与するものである。

### (1) 高調波発生量と位相の問題

高調波の発生量は、その機器の種類や構成および運転状態に依存する。特に系統上の高調波潮流を求めるため、多数の高調波発生源を設定するときには、それらの高調波発生源同士の位相差により、系統上の高調波分布が異なってくる。このため、まず基本波の潮流状態を算出して、その各点の基本波電圧を基準に高調波発生量や位相を設定する必要がある。また、高調波発生源の内部インピーダンスの設定により、高調波発生源同士からの流入電流が異なる。特に、高圧系からみた負荷側の高調波発生源の適切な内部インピーダンスを求めるには、現実の系統を詳細に調査する必要がある。

### (2) 不平衡状態と高調波

不平衡状態における高調波の発生とその分布を解析的に求める手法については参考文献(5)などに述べられている。系統は必ずしも三相電圧が平衡状態となっているわけではない。このため機器単体に関して、制御角やインダクタンスの不ぞろいによる不平衡高調波電流についてモデル化し、系統との相互作用についての研究が課題とされてきている。

富士電機ではシミュレーション手法として、次章に述べるような汎用ソフトウェアを利用し機器設計やシステム設計に利用しているが、このようなディジタルシミュレーションとともにアナログシミュレーションによる物理モデルにより、現象を究明している。

## 3 高調波シミュレーション手法

本章では、主なディジタルシミュレーションとして、EMTPやEMTDCなどの例を示す。3.1節で述べるようにEMTDCはグラフィックインターフェースに優れており、ユーザーへの負担を軽減してくれる。一方、ドキュメントの整理などのパーソナルコンピュータ（パソコン）上での作業を重視する場合、EMTPに汎用の表・グラフ処理を備えたプログラムを附加して利用する場合がある。

### 3.1 EMTDCによる高調波シミュレーション

EMTDCは、カナダのマニトバ HVDC (High Voltage



中西 要祐

電力系統のシミュレーション・制御・解析に関する研究・開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所電力技術開発研究所系統制御開発グループ主任技師。



中森 昭

コンピュータシミュレーションによる電力系統解析技術の研究に従事。現在、(株)富士電機総合研究所電力技術開発研究所系統制御開発グループ。



壹岐 浩幸

電力系統および産業電源設備を対象としたシミュレーションによる系統診断、現象解析に従事。現在、富士ファコムシステム(株)第三システム部主任。

Direct Current) リサーチセンターで開発された電磁過渡シミュレーションプログラムである。このプログラムは、主に電力系統におけるインバータの電磁過渡現象を解析するために開発されたプログラムであり、かなり複雑な電力系統もモデル化することが可能である。特に、ダイオード、サイリスタ、GTO (Gate Turn-Off Thyristor) などのスイッチングモデルを正確にモデル化するための特別な補間アルゴリズムが採用されており、これにより、高調波を含有するインバータ電圧・電流および電力系統内での電気諸量を正確に模擬することが可能である。さらに、このプログラムは下記のデータ解析機能が備わっており、容易かつ効率的に高調波解析が行える。

- (1) 高調波スペクトル解析
- (2) ひずみ率の計算
- (3) 実効値の計算

EMTDC を用いた高調波解析の一例として、大容量インバータの開発時に実施した高調波解析を紹介する。インバータの主回路構成を図 1 に、インバータ定格運転時のインバータの出力電流とその高調波スペクトル結果を図 2 に示す。この EMTDC は、アイコンを利用してシミュ

レーションモデルのグラフィカル入力が可能なため、モデル作成が容易である。

### 3.2 パソコンを用いた高調波シミュレーション手法

高調波ガイドラインに沿った判定などの解析結果の評価や、ドキュメントの整理などのユーザーに必要な処理を附加したシミュレーションを必要とする場合がある。このためのパソコンをベースとした解析プログラムとして、下記の特長をもつ二つの例を紹介する。

#### ① EMTP-DCG 版と MS-EXCEL グラフ処理

EMTP を利用して多相整流器モデルを作成し、波形処理として MS-EXCEL による後処理を行う。

#### ② MS-EXCEL を用いた回路計算

表計算ソフトウェアとしての MS-EXCEL を、回路計算に利用し、結果の判定などを行なう。

- (1) 過渡現象解析プログラム (EMTP-DCG 版) を使用した多相整流器シミュレーション

EMTP を使用して、高調波発生源の基になる多相整流器モデルを作成し、ダイナミックに高調波現象の検証を行うことができる。

ここでは、受動フィルタを使った解析例として、図 3 に示した大容量多相整流器システム（移相変圧器を使用した12相整流器）の系統構成例を示す。これにより受動フィルタが有・無のときの母線電圧・電流の変化を検討できる。

ここで、高調波発生源として多相化パルスを使用した整流器モデルは、「移相変圧器」+「三相ブリッジ整流器」を組み合わせているために、複雑なモデルとなる。特に、「移相変圧器モデル」は、図 4 に示すように、移相角 ( $\theta$ ) を表現するための移相巻線を持つ変圧器になっている。EMTP には、この種のタイプの変圧器モデルがないために、独自に単相巻線を組み合わせて作成している。これにより多パルス化が可能となり、18, 24, 36, 48相などのパ

注 1 MS-EXCEL : 米国マイクロソフト社の登録商標

図 1 インバータの主回路構成

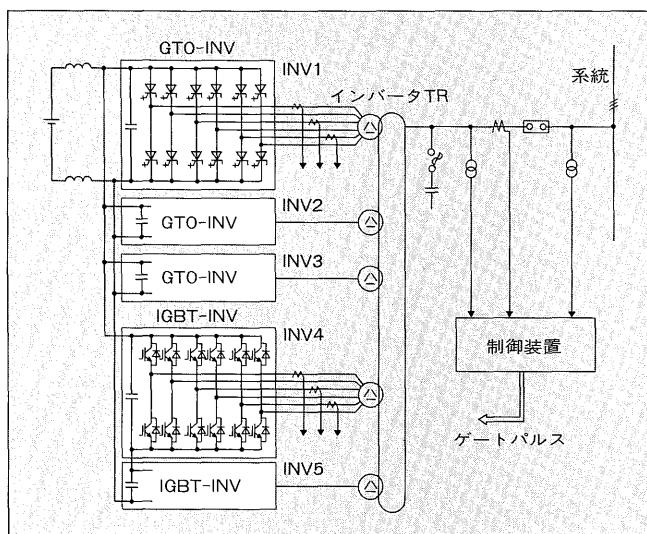


図 2 インバータの出力電流と高調波スペクトル

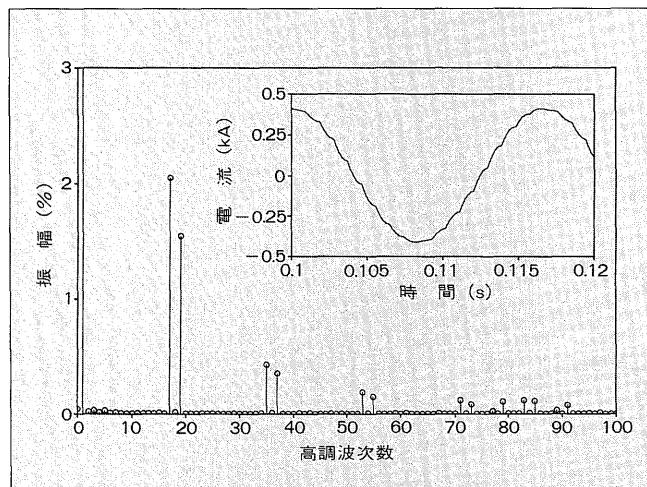


図 3 系統構成図

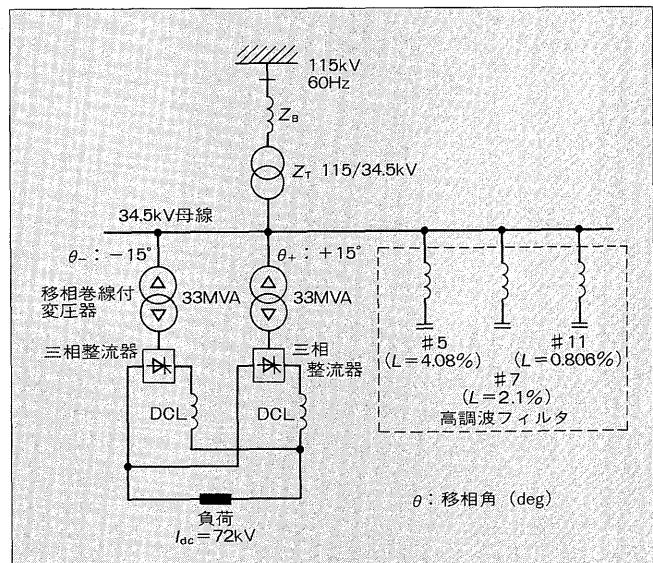


図4 移相変圧器モデルの電圧ベクトル図

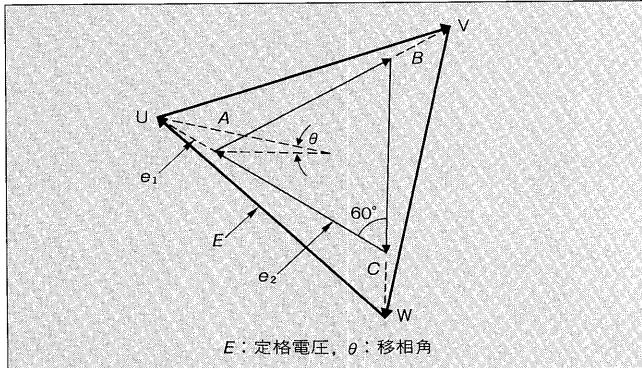
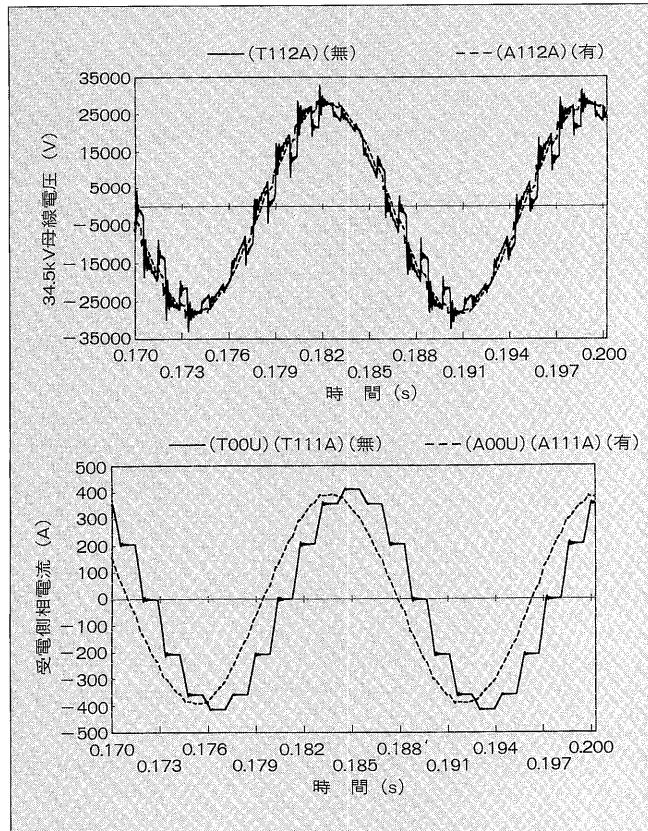


図5 受動フィルタ（有・無）のシミュレーション波形



ルス数を持つ整流器モデルを表現できる。

シミュレーション結果として、受動フィルタ（有・無）時の波形例を図5に示す。波形処理には、MS-EXCELのVB(Visual Basic)を使ってプロット出力しており、ここでは、34.5kV母線A相の電圧と電流を示す。波形結果から、相電流の高調波成分低減、相電圧の転流振動による系統への影響など、受動フィルタの効果が検討できる。

#### (2) MS-EXCELを用いた簡易形受動フィルタ計算

MS-EXCELは、表計算ソフトウェアとして開発されているために、数値データが容易に入力でき、出力も分かりやすく印刷できる。このため、高調波問題に対応した受動フィルタの機器容量の検討が可能である。

ここでは、受動フィルタとしてLC直列共振回路を構成し、受動フィルタの機器容量と電源系統の電圧ひずみの検討を行った例を示す。

図6 高調波分析結果出力

高調波分析計算(单一分路使用) 4分路用 1/2相整流器のためのLCフィルタ計算									
入力データ		計算結果							
基準3相容量 (VA)	10,0	高準域電圧 (V)	34.5	高調波次数	8				
定格容量 (VA)	5281	電圧 (V)	10.0	もれ抵抗 - j インダクタ (Ω)	1.7				
#1 7.03~10.0 (VA)	10.0	共振次数 n	4.951	選択度 Q	100.0				
#2 7.03~10.0 (VA)	10.0	共振次数 n	8.901	選択度 Q	100.0				
#3 7.03~10.0 (VA)	2.0	共振次数 n	11.003	選択度 Q	100.0				
#4 7.03~10.0 (VA)	0.5	共振次数 n	0.000	選択度 Q	0.0				
共振周波数割合 (%) (共振数)	1.000	等価周波数割合 (%) (共振数)	1.000						
		総合電圧ひずみ (%)	0.715	総合電流ひずみ (%)	0.032				

前項と同じ系統構成上で、任意の高調波電流を発生した場合の定常状態の各母線電圧・電流の高調波ひずみの計算をMS-EXCELを使用して計算させる。このときの高調波分析結果出力を図6に示す。

受動フィルタ計算のアルゴリズムは、VBを使ってインピーダンス計算を行っているが、VBには、複素数の関数演算がないために、独自に関数を作成している。

#### 4 あとがき

高調波に関するシミュレーション技術について、解析例を含め紹介した。今回紹介したモデルにおいては、多パルス化された整流器モデルのダイナミックス表現が可能であることから、多相整流器にかかる解析例として、

- (1) 受動フィルタ、ならびに変圧器の開閉時に伴う多相整流器への影響
- (2) 多相整流器に伴う転流振動の影響
- (3) 高調波抑制効果の検証

など、理論的に検証しにくい現象も、明確に検討ができる。

一方、シミュレーションモデルの完成度が高くなればなるほど、実際の系統上の各種パラメータ精度が重要となり、今後、観測データとの比較がさらに必要となろう。

#### 参考文献

- (1) EMTP Revised Rule Book Version 2.0, EPRI EL-6421-L, Vol.1 (1989)
- (2) EMTDC User's Manual, Manitoba HVDC Research Center (1988)
- (3) Heydt, G. T. et al.: Harmonic Power Flow Studies Part 1 Formulation and Solution, Part 2 Implementation and Practical Application, IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-101, p.1257-1270 (1982)
- (4) CYMHARMO, Harmonic Analysis by Cyme International Inc.,
- (5) Xu, W. et al.: A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique, IEEE Trans. on Power System, Vol.6, No.1, p.174-182 (1991)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。