配電系統用アクティブフィルタの等価モデルと 高調波拡大現象の抑制効果

正員 赤木 泰文 (岡山大学)

学生員 池田 俊也 (岡山大学)

Modeling and Harmonic Damping Effect of Shunt Active Filters
for Dispersive Installation on Power Distribution Systems

Hirofumi Akagi, Member and Syunya Ikeda, Student-member (Okayama University)

With significant development of power electronics technology, the proliferation of non-linear loads such as static power converters in a range of 50W to 300MW has deteriorated power quality in transmission/distribution systems. Notably, voltage distortion or voltage harmonics may approach or exceed its allowable level in power distribution systems. Individual electric power consumers and end-users are responsible for reducing current harmonics, while electric power companies or utilities are responsible for reducing voltage harmonics at the point of common coupling in distribution systems.

Dispersive installation of shunt active filters on power distribution systems is a viable and effective way of solving "harmonic pollution." The main objective of this paper is to develop a model for the shunt active filters, and to show how well the shunt active filters are effective in damping of harmonic propagation, much attention being paid to site selection. The system analysis concludes that a shunt active filter based on voltage detection has the capability of harmonic damping throughout a feeder, and that a shunt active filter based on supply current detection with differential compensation is suitable, not for harmonic damping, but for harmonic compensation of one or more non-linear loads. This paper discusses two shunt active filters based on voltage detection, which are dispersively installed on both end terminals of two feeders in a distribution system. Computer simulation verifies the validity of the modeling and harmonic damping effect of the shunt active filters for dispersive installation on power distribution systems.

キーワード：配電系統，高調波拡大現象，並列形アクティブフィルタ，電圧検出方式，電源電流検出方式

1. まえがき

近年，パワーエレクトロニクス技術の発展により，電力用半導体素子を用いた電力・電子機器が数多く使用されるようになってきた。一般産業用パワーエレクトロニクス機器やインバータエアコン，テレビ・OA機器などの家電・汎用品が発生する高調波電流が配電系統に流入し，現代社会の新たな“公害”として早期対応が迫られている。

最近発表された文献(1)には，「都市部の6.6kV配電系統では，夜間の軽負荷時には第5次高調波電圧の最大値が7%を超えることがある」という憂慮すべき実測結果が報告されている。これは，受電変圧器の漏れインダクタンスや配電線のインダクタンスと高圧需要家の進相コンデンサとが共振回路を構成し，配電系統に流入した高調波電流や上位系統の高調波電圧が2~6倍に拡大する「高調波拡大現象」がその一因と考えられている。しかしその一方で，「6.6kV配電系統(受電変圧器の二次側)の第5次高調波電圧は夜間の軽

負荷時に増加するが，77kV上位系統(受電変圧器の一次側)では逆に夜間の軽負荷時になるほど第5次高調波電圧が減少する」という実測結果(1)は，高調波拡大現象の抑制が配電系統の高調波対策に有効であることを示唆している(2)。

本論文では，配電系統に分散設置する並列形アクティブフィルタ(配電系統用アクティブフィルタ(3))の等価モデルと高調波拡大現象の抑制効果を，理論とシミュレーションにより詳細に検討する。まず，設置点によらず常に安定に動作する電圧検出方式と微分補償を付加した電源電流検出方式について，これらの高調波検出方式を採用した並列形アクティブフィルタの等価モデルを導出する。さらに，高調波拡大現象の抑制効果の相違を等価モデルを用いて明快に論じる。その結果，電源電流検出方式(微分補償付)の並列形アクティブフィルタは，高調波に対しては設置点の上位側を開放した等価モデルとなり，高調波拡大現象の抑制効果は期待できない。これに対して，電圧検出方式の並列形アクティブフィルタは高調波に対してダンピング抵抗として動

図1 配電系統モデル

Fig.1. Power distribution system model.

作し、配電系統の高調波拡大現象を効果的に抑制できることなどを明らかにする。

本研究の配電系統用アクティブフィルタは、現在実用化が進められている並列形アクティブフィルタ⁽⁴⁾ (特定需要家用アクティブフィルタ⁽³⁾) とは、その目的・用途が大きく異なる。特定需要家用アクティブフィルタは、アーク炉や大容量整流回路・サイクロコンバータなどの高調波発生源の近傍に設置し、これらの電力機器から配電系統に流入する高調波電流を抑制する。配電系統用アクティブフィルタは高調波拡大現象の抑制を目的とし、高調波電圧・電流の低減効果は高調波拡大現象を抑制した結果としての“副産物”にすぎない。配電系統の高調波対策の原則は、あくまでも特定需要家・家電業界が高調波抑制対策ガイドライン⁽⁵⁾ (平成6年10月3日通達) を遵守し、電力・電子機器から配電系統に流入する高調波電流を低減することである。しかし完全に抑制することは難しく、高調波電流の低減と高調波拡大現象の抑制とは高調波対策の両輪を成すものである。

2. 配電系統モデル

図1に、本研究の解析及びシミュレーションに使用した住宅地区6.6kV 50Hz 配電系統モデルを示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾。6.6kV 母線からみた上位系は、解析を簡単化するために系統リアクタンスと配電変電所の受電変圧器 (15MVA) をまとめて短絡容量110MVA のリアクタンスとして扱った。受電変圧器にはフィーダ1～4の6.6kV 配電線が接続されている。フィーダ3と4には進相コンデンサが接続されていないので、これらのフィーダ内では高調波拡大現象は発生しない。そこでフィーダ3と4を開放し、進相コンデンサが接続されているフィーダ1と2を本研究の対象とする。フィーダ1と2は同一の回路定数を有する配電線で、例えばフィーダ1はノード

表1 ノード間の距離

Table 1. Distance between one node and another.

ノード2～3 (引出し線)	620 m
ノード3～9 (幹線)	2820 m
ノード3～12 (分岐線)	350 m
ノード9～10 (分岐線)	140 m
ノード10～11 (分岐線)	440 m

3～9の幹線とノード9～11やノード9～19などの分岐線とから構成されている。表1にノード間の距離を示す。ここで、ノード3～12やノード4～17などの分岐線の亘長は等しい。フィーダ1と2の負荷の総容量は2.99 MW, 進相コンデンサの総容量は0.99 Mvar である。

第7次高調波に対しては配電線の静電容量が無視できることから、配電線はLRの分布定数回路とした。フィーダ1と2には第7次高調波付近に共振点⁽³⁾が存在するので、以下のシミュレーションと理論解析で対象とする高調波は第7次高調波に限定する。

3. 配電系統用アクティブフィルタの制御法

配電系統に設置する並列形アクティブフィルタ (配電系統用アクティブフィルタ) の制御法と安定性の解析では、その基礎的な指針を得るため、配電系統はフィーダ2～4を開放しフィーダ1のみを対象とする。図2に一例として、ノード3にアクティブフィルタを設置し、下位系統に高調波発生源 i_h が存在する場合の等価モデルを示す。

<3.1> 検出方式と安定性 アクティブフィルタの高調波検出方式としては、設置点の下位側の高調波電流 i_{Lh} を検出する負荷電流検出方式、上位側の高調波電流 i_{Sh} を検出する電源電流検出方式、設置点の高調波電圧 v_h を検出する

図2 フィーダ1の高調波に対する等価モデル
Fig.2. Equivalent model for feeder 1 with respect to harmonics.

電圧検出方式が発表されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。さらに、高調波電流・電圧の検出・演算遅れを一次遅れ系で近似すると、アクティブフィルタの補償電流 $I_{AF}(s)$ は、周波数領域では、

- 負荷電流検出: $I_{AF}(s) = \frac{1}{1+sT} I_{Lh}(s)$

- 電源電流検出: $I_{AF}(s) = \frac{K_S}{1+sT} I_{Sh}(s)$

- 電源電流検出: $I_{AF}(s) = \frac{s \cdot K_S}{1+sT} I_{Sh}(s)$
(微分補償付)

- 電圧検出: $I_{AF}(s) = \frac{K_V}{1+sT} V_h(s)$

となる。ここで、 K_S と K_V はフィードバックゲインである。負荷電流検出方式は、高調波発生源の近傍に設置する特定需要家用アクティブフィルタには適しているが、設置点によっては不安定となる。しかも、フィードフォワード制御方式のために安定性を向上することが難しく、本研究では対象外とする。電源電流検出方式は、位相余裕が $10^\circ \sim 90^\circ$ であり、設置点によっては位相余裕が小さく、実用的には不安定となる。しかし、フィードバック制御系に微分補償を付加することによって位相余裕を 90° 改善することが可能となり、安定に動作する。電圧検出方式は、設置点によらず常に位相余裕が 90° 以上あるため安定な検出方式である⁽³⁾。

<3.2> 検出方式と高調波拡大現象の抑制効果 ここでは、配電系統の設置点に関係なく安定に動作する微分補償を付加した電源電流検出方式と電圧検出方式の高調波拡大現象の抑制効果を比較検討する。シミュレーションモデルはフィーダ1のみを対象とし、高調波拡大現象が最も顕著に現れる無負荷を想定した。第7次高調波発生源($I_h = 7.8A$)はノード6に存在するものとする⁽¹²⁾。

実際の配電系統では、高調波発生源がどこに存在するかを特定するのは難しく、アクティブフィルタの設置点はノード3(幹線の最上位)、ノード6(幹線の間接点)、ノード9(幹線の最下位)とし、両検出方式の抑制効果をシミュレーションにより検討した。シミュレーションには、アナログ回路シミュレータ(マイクロキャップIV)を使用した。表2(a)に微分補償を付加した電源電流検出方式($K_S=20$)を用いた場

表2 並列形アクティブフィルタの高調波拡大現象の抑制効果—第7次高調波発生源($I_h = 7.8A$)がノード6に存在する場合—

Table 2. Harmonic damping effect of a shunt active filter when a 7th harmonic current source of $I_h = 7.8A$ is on node 6.

(a) 微分補償を付加した電源電流検出方式($K_S = 20$)

高調波 電流 [A]	アクティブフィルタの設置点			
	設置しない	ノード3	ノード6	ノード9
I_{2-3}	109.7	0	0	31.9
I_{3-4}	104.0	14.0	0	30.2
I_{5-6}	79.0	12.8	0	23.0
I_{6-7}	58.3	3.8	0	9.4
I_{8-9}	24.3	1.6	0	0
I_{AF}	—	14.0	7.8	6.4

(b) 電圧検出方式($K_V = 2S$)

高調波 電流 [A]	アクティブフィルタの設置点			
	設置しない	ノード3	ノード6	ノード9
I_{2-3}	109.7	2.1	0.6	3.6
I_{3-4}	104.0	14.5	0.6	3.4
I_{5-6}	79.0	12.0	0.5	2.6
I_{6-7}	58.3	4.3	0.3	5.9
I_{8-9}	24.3	1.8	0.2	6.5
I_{AF}	—	13.7	7.8	6.5

合、表2(b)に電圧検出方式($K_V = 2S$)を用いた場合の高調波電流の抑制効果の結果を示す。

アクティブフィルタをノード3に設置した場合には、微分補償を付加した電源電流検出方式と電圧検出方式ともに設置点の上位側に流出する高調波電流は十分に抑制できているが、ノード3からノード6の高調波電流については拡大を抑制することができない。ノード6に設置した場合は高調波発生源の近傍に設置したことになるので、両検出方式は高調波電流を完全に抑制することができる。ノード9に設置した場合、微分補償を付加した電源電流検出方式は検出点の I_{8-9} は抑制できるが、ノード7から上位側に流出する高調波電流($I_{2-3} \sim I_{6-7}$)の拡大現象を抑制することはできない。これに対して電圧検出方式は、フィーダ1内の高調波電流の拡大現象を十分に抑制することができる。

以上のシミュレーション結果から、アクティブフィルタを高調波発生源の上位側に設置した場合、微分補償を付加した電源電流検出方式と電圧検出方式は、設置点の上位側へ流出する高調波電流を抑制することができる。しかし、高調波発生源の下位側に設置した場合、電源電流検出方式(微分補償付)は検出点の高調波電流は抑制できるが、フィーダ内の高調波電流の拡大現象を抑制できない。これに対して

表3 並列形アクティブフィルタの設置点からみた
第7次高調波に対する系統インピーダンス

Table 3. 7th harmonic system impedances upstream
and downstream of a shunt active filter at point of in-
stallation.

設置点	インピーダンス [Ω]	
	上位側	下位側
ノード3	$0.13 + j3.52$	$0.32 - j3.57$
ノード4	$0.27 + j4.82$	$0.28 - j5.25$
ノード5	$0.43 + j6.30$	$0.19 - j7.00$
ノード6	$0.76 + j8.81$	$0.15 - j10.2$
ノード7	$1.50 + j12.9$	$0.13 - j16.2$
ノード8	$4.00 + j21.6$	$0.18 - j33.2$
ノード9	$8.46 + j31.8$	$0.25 - j68.2$

電圧検出方式は、フィード内の高調波電流の拡大現象を抑制できることがわかる。

4. 配電系統用アクティブフィルタの理論的考察

配電系統はシミュレーションと同様に、フィード1のみを対象とし、無負荷とした。

<4.1> 高調波発生源の上位側にアクティブフィルタを設置した場合 一例として図2の等価モデルを用いて、ノード3にアクティブフィルタを設置し、その下位側に高調波発生源が存在する場合に対して考察を行なう。図2では考察を簡単に行なうため、ノード3の上位側は抵抗 R_S を無視してインダクタンス L_S のみとする。

微分補償を付加した電源電流検出方式と電圧検出方式の補償電流 I_{AF} を再記すると、

$$I_{AF} = \frac{s \cdot K_S}{1 + sT} I_{Sh} \quad (1)$$

$$I_{AF} = \frac{K_V}{1 + sT} V_h \quad (2)$$

となる。また、 V_h と I_{Sh} には次式のような関係が成立する。

$$V_h = sL_S \cdot I_{Sh} \quad (3)$$

(3)式を(2)式に代入すると、

$$I_{AF} = \frac{s \cdot K_V L_S}{1 + sT} I_{Sh} \quad (4)$$

となる。(4)式より、電圧検出方式はゲインが $K_V \cdot L_S$ の微分補償を付加した電源電流検出方式と等しくなる。つまり、ノード3にアクティブフィルタを設置した場合、微分補償を付加した電源電流検出方式と電圧検出方式は、設置点の上位側へ流出する高調波電流を抑制するように動作する。従って、設置点の上位側へ流出する高調波電流の補償特性は同一となる。他のノードに設置した場合でも、設置点からみた上位側の系統インピーダンスが誘導性であれば、同様の結論が得られる。表3に、アクティブフィルタの設置点からみた上位側及び下位側の系統インピーダンスを示す。

表3から明らかなように、各ノードともアクティブフィルタの設置点の上位側は誘導性である。

表2のシミュレーション結果では、微分補償を付加した電源電流検出方式は電圧検出方式に比べてより優れた抑制効果が得られている。これは、ノード3に設置した場合では、 $K_S = 20$ の電源電流検出方式は $K_V = 13 \times 10^3 S$ という高いフィードバックゲインを有する電圧検出方式と等価になるためである⁽¹²⁾。

<4.2> 高調波発生源の下位側にアクティブフィルタを設置した場合 電源電流検出方式(微分補償付)と電圧検出方式とで高調波拡大現象の抑制効果はまったく異なる。

(i) 電源電流検出方式(微分補償付) 表2(a)のシミュレーション結果から明らかなように、電源電流検出方式(微分補償付)は高調波拡大に対するダンピング効果がない。これは、アクティブフィルタが検出した高調波電流 I_{Sh} を抑制するように補償電流を注入する電流源として動作するためであると考えられる。従って、電源電流検出方式(微分補償付)を用いた場合、系統内の高調波電流は高調波発生源の高調波電流 I_h とアクティブフィルタの補償電流 I_{AF} の重ね合わせとなる。以下では、電源電流検出方式は高調波の検出遅れを無視($T=0$)し、ゲイン無限大($K_S=\infty$)の理想状態を仮定して考察を行う。

一例として、ノード3, 4, 6, 7に高調波発生源が存在し、ノード9にアクティブフィルタを設置した場合の各ノード間を流れる高調波電流は、

$$\begin{bmatrix} I_{2-3} \\ I_{3-4} \\ I_{5-6} \\ I_{6-7} \\ I_{8-9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{15} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{25} \\ G_{31} & G_{32} & \dots & G_{35} \\ G_{41} & G_{42} & \dots & G_{45} \\ G_{51} & G_{52} & \dots & G_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{h3} \\ I_{h4} \\ I_{h6} \\ I_{h7} \\ I_{AF9} \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。(5)式のパラメータ G_{mn} は各高調波発生源に対する各ノード間を流れる高調波電流の分流比を示している。例えば、 G_{11} はノード3に存在する高調波発生源 I_{h3} とノード2-3間を流れる高調波電流の分流比(I_{2-3}/I_{h3})を表している。以下では、シミュレーションと同様にノード6のみに高調波発生源が存在し($I_{h3}=I_{h4}=I_{h7}=0$)、ノード9にアクティブフィルタを設置した場合について検討する。

まず、(5)式の各パラメータをシミュレーションにより求める。図3には計算に用いたフィード1の概略図を示す。図3では、高調波発生源、及びアクティブフィルタを実効値1Aの電流源(350Hz)とした。高調波発生源から各ノード間を流れる高調波電流の計算を行う場合は、図3(a)に示すようにアクティブフィルタを開放する。アクティブフィルタから各ノード間を流れる補償電流の計算を行う場合は、図3(b)に示すように高調波発生源を開放する。表4にフィード1内の高調波電流、補償電流の計算結果を示す。

表4(a)の値は、実効値1Aの高調波発生源がノード6に存在する場合の高調波電流を示しているの、高調波発生源の実効値が I_{h6} [A]の場合には各ノード間を流れる高調波

(a) ノード9のアクティブフィルタを開放

(b) ノード6の高調波発生源を開放

図3 理論解析に用いた等価モデル

Fig.3. Equivalent circuit models used for theoretical analysis.

電流は表中の値を I_{h6} 倍すればよい。従って、表中の値がそれぞれ行列の各パラメータに対応することになる(例えば、 $I_{2-3} = G_{13} \cdot I_{h6}$)。このことは、アクティブフィルタの補償電流に対しても同様である。

次に、ノード9に電源電流検出方式($K_S = \infty$)を設置した場合のアクティブフィルタの補償電流 I_{AF9} と高調波電流 I_{2-3} を計算する。 I_{8-9} 、 I_{2-3} は(5)式より、それぞれ次式で表される。

$$I_{8-9} = G_{53} \cdot I_{h6} + G_{55} \cdot I_{AF9} \quad (6)$$

$$I_{2-3} = G_{13} \cdot I_{h6} + G_{15} \cdot I_{AF9} \quad (7)$$

ノード6の高調波発生源($I_{h6} = 7.8\text{A}$)に対して、ノード9に設置したアクティブフィルタは I_{8-9} を零に抑制するように動作するので、アクティブフィルタの補償電流 I_{AF9} は(6)式より、

$$I_{AF9} = -\frac{G_{53}}{G_{55}} I_{h6} = 6.07 - j1.71 [\text{A}] \quad (8)$$

となる。(8)式を(7)式に代入すると、 I_{2-3} は、

$$I_{2-3} = G_{13} I_{h6} - \frac{G_{15} G_{53}}{G_{55}} I_{h6} \\ = 31.17 - j6.46 [\text{A}] \quad (9)$$

$$|I_{2-3}| \approx 32 [\text{A}] \quad (10)$$

となる。次に、電源電流検出方式(微分補償付)の補償特性を理論解析と同一条件($K_S = 1000$, $T = 0$)でシミュレーションにより計算した。その結果、 $I_{2-3} \approx 32\text{A}$ となり、当然のことながら(10)式の理論解析と一致した⁽¹²⁾。さらに、ノード

表4 高調波発生源および並列形アクティブフィルタを第7次高調波電流源(実効値 1A)と仮定した場合

Table 4. Assuming both harmonic-producing load and shunt active filter to be a 7th harmonic current source with effective value of 1A.

(a) ノード6に高調波発生源が存在する場合

高調波電流	[A]
$I_{2-3} (= G_{13})$	$1.11 - j14.0$
$I_{3-4} (= G_{23})$	$1.08 - j13.3$
$I_{5-6} (= G_{33})$	$1.02 - j10.0$
$I_{6-7} (= G_{43})$	$-0.01 - j7.47$
$I_{8-9} (= G_{53})$	$-0.02 - j3.11$

(b) ノード9にアクティブフィルタを設置した場合

補償電流	[A]
$I_{2-3} (= G_{15})$	$-0.99 + j16.7$
$I_{3-4} (= G_{25})$	$-0.98 + j15.8$
$I_{5-6} (= G_{35})$	$-0.98 + j12.0$
$I_{6-7} (= G_{45})$	$-1.00 + j8.89$
$I_{8-9} (= G_{55})$	$-1.02 + j3.71$

表5 電源電流検出方式(微分補償付)の並列形アクティブフィルタをノード9に設置した場合の第7次高調波電流の解析結果

Table 5. Analytical results of 7th harmonic currents when a shunt active filter based on supply current detection with differential compensation is installed on node 9.

高調波電流 [A]	高調波発生源の接続点		
	ノード4	ノード6	ノード8
I_{2-3}	25.6	32.0	34.1
I_{3-4}	24.2	30.1	32.3
I_{5-6}	11.0	22.9	24.5
I_{6-7}	6.7	9.4	18.2
I_{8-9}	0	0	0
I_{AF9}	4.5	6.3	7.3

4とノード8に高調波発生源が存在する場合についても同様な検討を行った。表5に解析結果を示す。

以上より、「高調波発生源の下位側に電源電流検出方式(微分補償付)のアクティブフィルタを設置しても高調波拡大現象を抑制できない」と結論できる。

(ii) 電圧検出方式 (2)式から次式を得る。

$$\frac{V_h}{I_{AF}} = \frac{1}{K_V} \cdot (1 + sT) \quad (11)$$

ここで、次式のように R_{AF} と L_{AF} を導入する。

図4 並列形アクティブフィルタの高調波に対する等価モデル

Fig.4. Equivalent circuit models for both shunt active filters with respect to harmonics.

$$R_{AF} = 1/K_V [\Omega] \quad L_{AF} = T/K_V [H] \quad \dots\dots\dots (12)$$

(12)式は、電圧検出方式の並列形アクティブフィルタが高調波に対して $R_{AF} - L_{AF}$ 直列回路として動作することを意味している。このような特性を有する並列形アクティブフィルタを配電系統の末端に設置すると、高調波発生源からみた下位側の系統インピーダンスは容量性から誘導性に変化する⁽³⁾。その結果、表2(b)からも明らかなように、アクティブフィルタをノード9に設置した場合には高調波電流をすべてのノード間で高調波発生源 ($I_h = 7.8A$) 以下に抑制できる。さらに、高調波発生源 (ノード6) から上位側と下位側に分流する高調波電流 I_{5-6} と I_{6-7} には次式の関係が成立する。

$$I_{5-6} + I_{6-7} = 8.5 \simeq 7.8 [A] \quad \dots\dots\dots (13)$$

表2(b)と(13)式は、ノード9に設置した電圧検出方式の並列形アクティブフィルタが高調波拡大現象を抑制していることを示している。

5. 配電系統用アクティブフィルタの等価モデル

ここでは、幹線の最下位 (ノード9) に並列形アクティブフィルタを設置し、その上位側に高調波発生源が存在する場合の微分補償を付加した電源電流検出方式と電圧検出方式の等価モデルを検討する。

<5.1> 電源電流検出方式 (微分補償付) ゲインが無限大の理想状態を想定すると、電源電流検出方式の場合には検出点であるノード8-9間の高調波電流を零に抑制するよう設置点に補償電流を注入する。このことは、図4(a)

に示すようにノード8の下位側を開放したことに等価である。その結果、ノード8の上位系統では高調波の拡大現象が起こる可能性が依然として残されていることになる。さらに、ノード8の下位側を開放したことによってフィーダ1の共振点に変化し、ノード8の上位系に存在する高調波発生源の周波数と共振点とが一致すると、ノード9にアクティブフィルタを設置したことが逆に過大な高調波拡大を引き起こす。4章の解析結果と図4(a)の等価モデルから、電源電流検出方式 (微分補償付) の並列形アクティブフィルタは配電系統の最上位、あるいは配電変電所に設置して上位系統へ流出する高調波電流の抑制に適している。

<5.2> 電圧検出方式 (11)式と(12)式から、電圧検出方式の並列形アクティブフィルタの高調波に対する等価モデルは、図4(b)に示すように $R_{AF} - L_{AF}$ 直列回路で表すことができる。高調波電圧の検出・演算に伴う位相遅れを無視できる場合には、電圧検出方式の並列形アクティブフィルタは高調波に対してダンピング抵抗として動作するので、高調波拡大現象を効果的に抑制できる。しかも、配電系統に分散設置したとしても逆に高調波電圧・高調波電流の拡大を引き起こす恐れはない。以上のことから、配電系統に分散設置し、高調波拡大現象の抑制を目的とした並列形アクティブフィルタに最も適している高調波検出方式は、「電圧検出方式」であると結論できる。しかし、実際の高調波電圧の検出・演算回路には位相遅れが存在するので、 $R_{AF} \gg \omega_h L_{AF}$ となるように検出・演算回路を設計しなければならない。

6. 分散設置による高調波拡大現象の抑制効果

電圧検出方式の並列形アクティブフィルタを配電系統に分散設置し、その高調波拡大現象の抑制効果をシミュレーションにより検討する⁽¹³⁾。以下では、電圧検出方式の並列形アクティブフィルタを「アクティブフィルタ」と呼ぶことにする。シミュレーションでは、図1に示す6.6kV配電系統のフィーダ3と4を開放し、フィーダ1と2を対象とする。フィーダ1には各ノードに高調波発生源が存在し、フィーダ2は無負荷で高調波発生源が存在しないものとする。表6に、フィーダ1の各ノードに接続した負荷と第7次高調波電流源の実効値を示す。これらの高調波電流源の位相は同相とした。

<6.1> フィーダ1のみを対象した場合 フィーダ2を開放し、フィーダ1のみに注目して不特定多数の高調波源が存在する場合について、アクティブフィルタの設置点と抑制効果、所要容量などを明らかにする。またアクティブフィルタには電圧検出方式を用いているので、ゲイン K_V はアクティブフィルタの等価抵抗の逆数を表している ($K_V = 1/R_{AF}$ [S])。アクティブフィルタの設置点は、ノード3, 6, 9とし、ゲイン K_V を0~1.0 [S] まで変化させた。フィーダ1の負荷の総容量は6.6kV, 2.99 MW であるので、等価負荷抵抗は14.6Ωとなる。従ってアクティブフィルタのゲインは、 $1/K_V \ll 14.6\Omega$ となるように設定した。表7に、高調波電流・高調波電圧

表6 第7次高調波発生源の接続点と実効値

Table 6. Location and effective current of each 7th harmonic-producing load.

負荷	コンデンサ	接続点(ノード)	電流実効値
50 kW	—	10, 11	0.13 A
100 kW	—	3	0.26 A
130 kW	—	14, 17, 19	0.34 A
200 kW	90 kvar	4, 5, 6, 7, 8, 9	0.52 A
240 kW	90 kvar	12, 13, 15, 16, 18	0.63 A
高調波発生源の総電流			7.80 A

のシミュレーション結果を示す。ここで、例えば K_{V3} はノード3に設置したアクティブフィルタのゲイン K_V を表している。

(i) アクティブフィルタを設置しない場合 ($K_V = 0S$) フィーダ1内で高調波電流の拡大を生じ、ノード3より上位系へ流出する高調波電流は40.2Aとなり、高調波発生源の総電流7.8A(総容量89kVA)の約5倍となっている。高調波電圧はノード9で最大となり、約8%($=303V/(6600V/\sqrt{3})$)の第7次高調波電圧が生じている。

(ii) ノード3に設置した場合 ゲインの増加とともに、ノード3より上位系へ流出する高調波電流は抑制できているが、ノード3からノード5を流れる高調波電流は、高調波発生源の総電流よりも大きい。高調波電圧もノード6やノード9に設置したアクティブフィルタと比較すると十分な抑制効果が得られていない。アクティブフィルタの所要容量はゲインとともに増加し、ゲイン $K_{V3} = 1.0S$ で127kVA($=\sqrt{3} \times 6.6kV \times 11.1A$)となり、高調波発生源の総容量の約1.4倍の所要容量が必要となる。

(iii) ノード6に設置した場合 ゲインを増加するとフィーダ1内の高調波電流・高調波電圧は十分に抑制され、上位系へ流出する高調波電流は高調波発生源の総電流の約23%にまで補償されている。アクティブフィルタの所要容量は $K_{V6} = 1.0S$ で81kVAとなり高調波発生源の総容量とほぼ等しい。

(iv) ノード9に設置した場合 ノード6にアクティブフィルタを設置した場合と同等の抑制効果が得られているが、アクティブフィルタの所要容量は $K_{V9} = 1.0S$ で67kVAとなり、三カ所の設置点のなかで最小となっている。

配電系統用アクティブフィルタは高調波拡大現象の抑制を目的とし、高調波電圧・電流の低減効果は高調波拡大現象を抑制した結果としての“副産物”にすぎない。従って、配電系統用アクティブフィルタの最適設置点の判定基準は、

- 配電系統の高調波電圧あるいは高調波電流を最小にすることではなく、フィーダ内の高調波拡大現象を効果的に抑制できること。
- アクティブフィルタの所要容量を最小にできること。

表7 電圧検出方式の並列形アクティブフィルタの設置点と高調波拡大現象の抑制効果

Table 7. Location and harmonic damping effect of a single shunt active filter based on voltage detection.

(a) ノード3に設置した場合

[A]	$K_{V3}=0$	$K_{V3}=0.1$	$K_{V3}=0.5$	$K_{V3}=1.0$
I_{2-3}	40.2	19.6	6.2	3.3
I_{5-6}	28.4	16.1	9.7	8.9
I_{8-9}	8.7	4.9	3.0	2.7
I_{AF3}	—	6.5	10.3	11.1

[V]	$K_{V3}=0$	$K_{V3}=0.1$	$K_{V3}=0.5$	$K_{V3}=1.0$
V_3	142	69	22	12
V_6	255	133	57	44
V_9	303	160	73	59

(b) ノード6に設置した場合

[A]	$K_{V6}=0$	$K_{V6}=0.1$	$K_{V6}=0.5$	$K_{V6}=1.0$
I_{2-3}	40.2	9.8	2.8	1.8
I_{5-6}	28.4	6.3	2.0	1.9
I_{8-9}	8.7	2.8	1.8	1.7
I_{AF6}	—	5.7	6.9	7.1

[V]	$K_{V6}=0$	$K_{V6}=0.1$	$K_{V6}=0.5$	$K_{V6}=1.0$
V_3	142	34.6	9.9	6.3
V_6	255	60.0	14.6	7.5
V_9	303	74.4	22.3	14.8

(c) ノード9に設置した場合

[A]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
I_{2-3}	40.2	8.4	3.8	3.2
I_{5-6}	28.4	4.9	1.1	0.7
I_{8-9}	8.7	3.6	4.4	4.5
I_{AF9}	—	5.1	5.8	5.9

[V]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
V_3	142	29.7	13.2	11.4
V_6	255	50.3	18.8	15.1
V_9	303	53.5	12.4	6.3

である。図4と表7から、最適設置点は配電線の幹線の最下位(ノード9)であると結論できる。

<6.2> フィーダ1と2を対象とした場合 本節では、不特定多数の高調波発生源が存在するフィーダ1から上位系やフィーダ2に分流する高調波電流の拡大現象などを明

表8 電圧検出方式の並列形アクティブフィルタを
ノード9にのみ設置した場合

Table 8. Installation of a single shunt active filter based
on voltage detection on node 9.

(a) フィーダ1の高調波電流・電圧 ($K_{V9} = 0S$)

[A]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
I_{1-2}	21.7	16.8	11.6	10.7
I_{2-3}	4.1	3.2	2.2	2.0
I_{5-6}	2.9	0.6	1.7	2.2
I_{8-9}	0.9	2.6	5.6	6.2
I_{AF9}	—	3.8	6.9	7.5

[V]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
V_2	50.2	38.8	26.9	24.8
V_3	52.2	40.3	28.0	25.7
V_6	58.8	43.3	25.9	22.4
V_9	61.9	40.3	14.5	7.9

(b) フィーダ2の高調波電流・電圧 ($K_{V26} = 0S$)

[A]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
I_{1-2}	21.7	16.8	11.6	10.7
I_{2-20}	21.1	16.3	11.3	10.4
I_{22-23}	15.2	11.7	8.1	7.5
I_{25-26}	4.7	3.6	2.5	2.3

[V]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
V_2	50.2	38.8	26.9	24.8
V_{20}	75.2	58.1	40.4	37.2
V_{23}	135.0	104.1	72.3	66.5
V_{26}	160.2	123.7	85.9	79.1

らかにし、アクティブフィルタを設置した場合の抑制効果について検討する。

(i) ノード9にアクティブフィルタを設置した場合 表8にノード9にアクティブフィルタを設置した場合のフィーダ1及びフィーダ2の高調波電流・高調波電圧を示す。アクティブフィルタを設置しない場合 ($K_{V9} = 0S$)、ノード2から上位系へ流出する高調波電流 I_{1-2} は約2.7倍の拡大を起こしている。これは、ノード2からみたフィーダ2が容量性であるためである。フィーダ2には高調波発生源の総電流の約2.6倍の高調波電流がフィーダ1から流入し、しかもフィーダ2には高調波発生源が存在しないにも拘らず高調波電圧はノード26で最大となり約4%の第7次高調波電圧が生じている。ノード9にアクティブフィルタを設置すると、高調波電圧を抑制することはできるが、 $K_{V9} = 1.0S$ でも上位系へ流出する高調波電流 I_{1-2} は10.7A、フィーダ2内へ流入する高調波電流 I_{2-20} は10.4Aとなり、高調波発生源の総電流

表9 電圧検出方式の並列形アクティブフィルタを
ノード9と26に分散設置した場合

Table 9. Dispersive installation of two shunt active
filters based on voltage detection on nodes 9 and 26.

(a) フィーダ1の高調波電流・電圧 ($K_{V26} = 1S$)

[A]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
I_{1-2}	27.5	7.1	3.3	2.8
I_{2-3}	32.1	8.3	3.8	3.3
I_{5-6}	22.7	4.8	1.1	0.6
I_{8-9}	6.9	3.3	4.2	4.4
I_{AF9}	—	4.7	5.7	5.8

[V]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
V_2	63.4	16.3	7.5	6.5
V_3	102.8	26.5	12.2	10.5
V_6	193.0	46.9	18.0	14.5
V_9	231.0	50.3	12.0	6.1

(b) フィーダ2の高調波電流・電圧 ($K_{V26} = 1S$)

[A]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
I_{1-2}	27.5	7.1	3.3	2.8
I_{2-20}	5.1	1.3	0.6	0.5
I_{22-23}	7.7	2.0	0.9	0.8
I_{25-26}	9.6	2.5	1.1	1.0
I_{AF26}	9.7	2.5	1.2	1.0

[V]	$K_{V9}=0$	$K_{V9}=0.1$	$K_{V9}=0.5$	$K_{V9}=1.0$
V_2	63.4	16.3	7.5	6.5
V_{20}	57.6	14.8	6.8	5.9
V_{23}	36.2	9.3	4.3	3.7
V_{26}	10.3	2.6	1.2	1.1

(7.8A) 以下に抑制することはできない。アクティブフィルタの所要容量は、 $K_{V9} = 1.0S$ で86kVAとなり、高調波発生源の総容量と等しい。

(ii) ノード9とノード26に分散設置した場合 ノード9のみにアクティブフィルタを設置した場合では、上位系に流出する高調波電流及びフィーダ2内の高調波電流を十分に抑制できなかった。そこで、フィーダ2の幹線の最下位(ノード26)にもアクティブフィルタを設置し、フィーダ1と2にアクティブフィルタを分散配置した場合について検討する。表9に、ノード26のアクティブフィルタのゲインは一定($K_{V26} = 1.0S$)、ノード9のアクティブフィルタのゲイン K_{V9} を変化させた場合の高調波電流・高調波電圧の計算結果を示す。ノード26にアクティブフィルタを設置すると、ノード2からみたフィーダ2は誘導性になるため、ノード9にアクティブフィルタを設置しない場合 ($K_{V9} = 0S$) には、フィー

ダ1内及び上位系に流出する高調波電流には拡大が生じている。また、高調波電圧はノード9で最大となり、約6%の第7次高調波電圧が生じている。フィーダ2は幹線の最下位にアクティブフィルタを設置しているため、ノード2からフィーダ2に流入する高調波電流 I_{2-20} は高調波発生源の総電流以下に抑制されている。しかし、フィーダ2では徐々に拡大し続け、 I_{25-26} (=9.6A)は高調波発生源の総電流以下に抑制することはできない。フィーダ2内の第7次高調波電圧は、フィーダ1と比較すると十分に抑制されており、最大でも約1.5%(ノード26)に抑えられている。

そこで、ノード9に設置したアクティブフィルタのゲインを増加すると、拡大現象が問題となっていたフィーダ1の高調波電流・高調波電圧及び上位系に流出する高調波電流は十分に抑制されている。さらに、フィーダ2の高調波電流・高調波電圧についても、優れた抑制効果が得られる。ノード26のみにアクティブフィルタを設置している場合($K_{V9}=0S$)は、フィーダ1から流入した高調波電流がフィーダ2内で拡大し、アクティブフィルタの所要容量は高調波発生源の総容量よりも1.2倍(110kVA)となる。ノード9に設置したアクティブフィルタのゲインを増加することによって、フィーダ2に流入する高調波電流を抑制することができるので、ノード26に設置したアクティブフィルタの所要容量は著しく減少する。その結果、2台のアクティブフィルタの合計容量も減少し、 $K_{V9}=1.0S$ で78kVAとなり、高調波発生源の総容量の約87%になる⁽¹²⁾。

7. むすび

本論文では、配電系統に分散設置する並列形アクティブフィルタ(配電系統用アクティブフィルタ)の制御法と高調波拡大現象の抑制効果を検討し、その基本的な指針を明らかにした。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- 電源電流検出方式(微分補償付)の並列形アクティブフィルタは、検出した高調波電流 i_{sh} を抑制する電流源として動作し、高調波に対しては設置点の上位側を開放した等価モデルとなる。従って、電源電流検出方式(微分補償付)は配電系統の最上位に設置して上位系に流出する高調波電流の抑制に適しているが、設置点の上位系統や下位系統に不特定多数の高調波発生源や進相コンデンサが存在する系統(フィーダ)内の高調波拡大現象を抑制することはできない。
- 電圧検出方式の並列形アクティブフィルタは、ダンピング抵抗として動作するので、系統内の高調波拡大現象を効果的に抑制できる。従って、電圧検出方式は配電系統用アクティブフィルタに最も適した高調波検出方式である。
- フィーダ内およびフィーダ間の高調波拡大現象を同時に抑制するには、各フィーダの幹線の最下位に電圧検出方式の並列形アクティブフィルタを分散設置するのが有効である。

最後に、本論文は文献(12)(13)を加筆修正したものであることを付記し、貴重な助言を賜りました関係各位に厚くお礼申し上げます。

(平成7年11月24日受付, 同8年4月26日再受付)

文 献

- (1) 奥, 中村, 上村:「配電系統高調波の測定解析と高調波拡大現象の抑制手法」, 電気学会論文誌B 114巻3号 234, 平成6年3月
- (2) 奥, 中村, 井上, 木幡:「アクティブフィルタによる配電系統高調波の抑制実験結果」, 電気学会論文誌B 115巻9号 1023, 平成7年9月
- (3) 赤木:「配電系統に設置する並列形アクティブフィルタの制御法と設置点について」, 電気学会論文誌D 116巻3号 285, 平成8年3月
- (4) 「電力用アクティブフィルタ技術」, 電気学会技術報告(II部)第425号, 平成4年6月
- (5) 雪平:「電源高調波抑制ガイドラインの概要」, 電気学会論文誌D 115巻9号 1086, 平成7年9月
- (6) 「配電系統の高調波障害防止対策」, 電気共同研究会 第37巻3号, 昭和56年10月
- (7) 「電力系統における高調波とその対策」, 電気協同研究会 第46巻第2号, 平成2年6月
- (8) H. Kawahira, T. Nakamura, S. Nakazawa and M. Nomura, "Active power filters," IPEC-Tokyo, pp.981-992, 1983.4
- (9) 濱田, 奥, 白石, 荻原, 水本:「系統の高調波電圧検出制御方式を用いた注入回路付きアクティブフィルタ」, 電気学会電力技術研究会 PE-89-56, 平成元年7月
- (10) 川端, 中村, 荻原, 水本:「アクティブフィルタ制御方式の検討と高調波抑制検証」, 電気学会産業応用部門全国大会 No.189, 平成7年8月
- (11) 赤木:「電源高調波規制に対応するパワーエレクトロニクス技術」, 電気学会論文誌D 115巻9号 1089, 平成7年9月
- (12) 池田, 赤木:「配電系統用アクティブフィルタの制御法と不特定高調波の抑制効果」, 電気学会半導体電力変換研究会 SPC-95-91, 平成7年10月
- (13) 池田, 赤木:「配電系統用アクティブフィルタの設置点と不特定高調波の抑制効果」, 電気学会産業応用部門全国大会 No.188, 平成7年8月

赤 木 泰 文

(正員) 昭和26年8月19日生。54年3月東京工業大学大学院博士課程電気工学専攻修了, 工学博士。同年4月長岡技術科学大学工学部電気系助手, 59年10月同助教授。62年3月~12月MIT客員研究員。平成3年8月岡山大学工学部電気電子工学科教授。パワーエレクトロニクス, 特にモータドライブ, 電力用アクティブフィルタ, 高周波インバータなどの研究に従事。昭和60年, 平成3年電気学会論文賞。1991年IEEE/IAS the best transactions paper award. 80, 83, 90, 95年IEEE/IAS conference paper awards. 96年IEEE/IAS Fellow.

池 田 俊 也

(学生員) 昭和47年10月9日生。平成7年3月岡山大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程入学, 現在に至る。主として, 電力用アクティブフィルタに関する研究に従事。