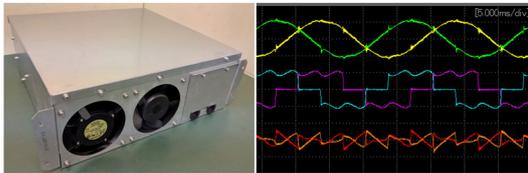


電流予測制御による大容量化対応空調機用アクティブフィルタ

Development of Large Current Capacity Active Filter with Current Prediction Method for Heat Pump Chiller



相場 謙一*1
Kenichi Aiba

渡辺 貴政*2
Takamasa Watanabe

角谷 敦之*3
Atsuyuki Sumiya

空調機などに使用されているインバータは、電源系統に電源周波数以外の高調波成分の電流が流出する。この高調波電流は電源電圧ひずみなどを引き起こし、他の機器へ障害を与えることがあり、高調波電流に関する規制やガイドラインにより規制値を満たすことが求められている。そこで、ヒートポンプチラーMSVにて、インバータの高調波電流を打ち消すように電流を出力することで高調波を低減するアクティブフィルタを開発し、このアクティブフィルタによりMSVの入力電流の歪みが31.3%から3.5%に低減できたことを確認した。

1. はじめに

近年、空調機では省エネのため、インバータが採用されるようになっているが、インバータ入力部では電源電圧を整流して直流化するため、電源系統に高調波電流を流出する。この高調波電流は、電源電圧に歪みを発生させ他の機器に障害を起こすことがあり、“高圧または特定高圧で受電する需要家の高調波抑制ガイドライン”やJISの規制値を満たすことが求められている。

これに対してビルなどで使用されている店舗用の空調機は、空調機以外の他の機器とともに接続されている。高調波を発生する機器が少ない場合、高調波電流の平均が減少するので、全ての空調機で規制値を満たす必要がない。そこで、高調波対策が必要となったインバータのみオプションとして追設できるアクティブフィルタを開発した。本報では、開発したアクティブフィルタの高調波低減技術の概要について述べる。

2. 空調機インバータ

アクティブフィルタをオプションとして搭載する“Mitsubishi Smart Voxcel: MSV”は空冷ヒートポンプチラーで空気から熱をくみ上げ温水を得るもので、60℃までの加熱運転を可能とし、また運転可能な外気温度範囲を大幅に拡大することにより、空調用途だけでなく、工場用ボイラからの置き換え需要にも対応できる。図1にMSV外観及び表1にMSVの仕様概要を示す。

このMSVのインバータは図2のような構成となっており、これを4台搭載して必要能力から運転台数を切り替えることで効率よく運転している。(他の当社空調機インバータも台数は異なるが同じ構成をしている。)

インバータは三相電源から電圧配線を表す系統インピーダンスを介してダイオードブリッジで整流し、後段の直流リアクトルDCLにより電流の平滑を行った後で平滑コンデンサにより直流バスの電圧を平滑している。

平滑された直流電圧はインバータブリッジにより三相交流電圧に変換され、モータを可変速駆動している。

この回路では電源電圧(相電圧)及びインバータ電流は、図3のような形状になる。

*1 総合研究所 電気・応用物理研究部 主席研究員

*2 三菱重工サーマルシステムズ(株) 空調機技術部

*3 インダストリー&社会基盤ドメイン 高速鉄道統括室 主席プロジェクト統括

電源電圧が交差するタイミングで入力電流が切り替える転流が発生し、それ以外の時間はほぼ一定となっている。

このため、電流は正弦波とならず歪みである高調波電流を多く含んでいる。



図1 MSV 製品外観
(三菱重工技報 Vol.54 No.2 P.30 より)

表1 MSV 製品仕様概要

(三菱重工技報 Vol.54 No.2 P.30 より)

形式			MSV1181P1	MSV1501P1	MSV1801P2	
電源			3相 200V 50/60Hz			
能力	冷却能力	kW	118	150	180	
	加熱能力	kW	118	150	180	
電気特性 (5℃差/7℃差) ^{注1}	始動電流	A	10	10	10	
	最大電流	A	157	198	228	
	消費電力	冷却	kW	34.8 / 34.7	46.4 / 45.7	62.1 / 60.8
加熱		kW	33.3 / 32.3	45.5 / 44.0	56.3 / 55.4	
COP (5℃差/7℃差) ^{注1}	冷却		3.39 / 3.40	3.23 / 3.28	2.90 / 2.96	
	加熱		3.54 / 3.65	3.30 / 3.41	3.20 / 3.25	
外形寸法		mm	2350(H)×1080(W)×3600(D)			
製品質量		kg	1348	1348	1408	
運転質量		kg	1381	1381	1443	
圧縮機			3D スクロール圧縮機			
		定格出力×台数	kW×台	8.75×4	11.7×4	15.5×4
送風装置		ファン				
		φ750 プロペラファン×4				
ポンプ	電動機定格出力		kW	1.5	1.5	2.2
	形式		ラインポンプ			
	流量制御方式		インバータ			
冷媒		R410A				
冷媒封入量		kg	9.5×4	9.5×4	10.5×4	
水配管 (5℃差/7℃差)	冷温水入口/出口		65A フランジ接続			
	定格流量		m ³ /h	20.3 / 14.5	25.8 / 18.4	30.9 / 22.1

本製品は JIS B 8613:1994 及び JRA4066:2014 に基づき製造している。

(注1) 能力及び電気特性は、下記条件時の値である。

「5℃差」冷却:冷水入口 12℃/冷水出口 7℃, 外気温度 35℃ DB

加熱:温水入口 40℃/温水出口 45℃, 外気温度 7℃ DB/6℃ WB, 定格電圧

「7℃差」冷却:冷水入口 14℃/冷水出口 7℃, 外気温度 35℃ DB

加熱:温水入口 38℃/温水出口 45℃, 外気温度 7℃ DB/6℃ WB, 定格電圧

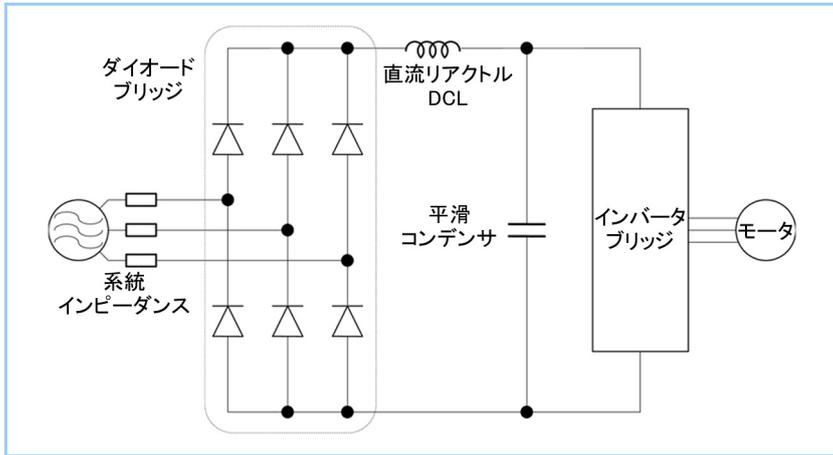


図2 MSV インバータ構成

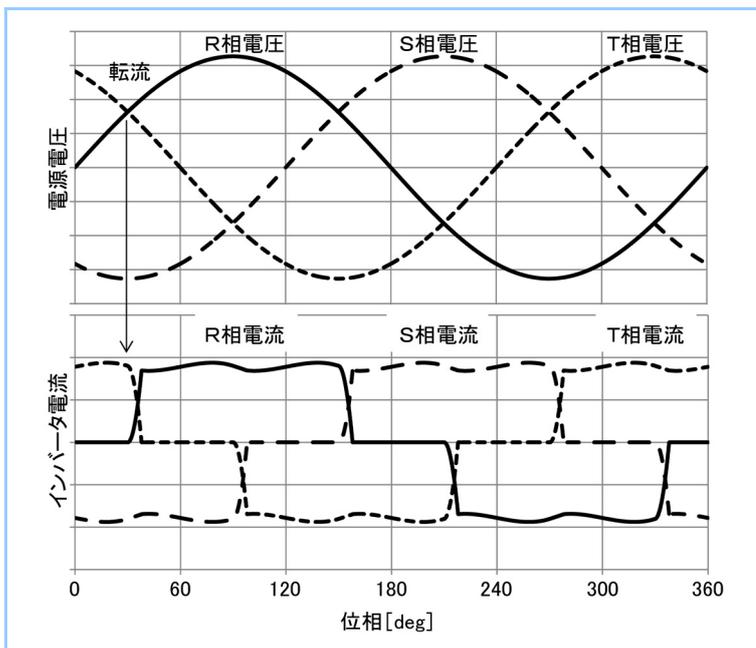


図3 電源電圧, インバータ電流波形

3. アクティブフィルタ

3.1 アクティブフィルタ制御

高調波対策をインバータ電流が小さい小容量機で行う場合は、インバータ自身で高調波を低減するような手段を組み込むことが一般的に行われている。

しかし、インバータが大容量化すると、高調波以外の基本波も流れるため、必要以上にインバータが大型化したり、効率が悪化したりする。(例えば、インバータ電流に高調波が 1/4 含まれる場合、アクティブフィルタの4倍の電流が必要。)

そこで、空調機用インバータの発生する高調波電流を補償する手段として電圧形アクティブフィルタを適用することにした。アクティブフィルタはインバータと並列に接続し、補償対象となるインバータの電流を検出して、この電流に含まれる高調波電流と逆位相の電流を出力することで、系統に流出する高調波電流を低減するものである。⁽¹⁾ 高調波電流のみを出力するので、必要以上に大型化することがない。また、並列に接続するので1台のアクティブフィルタで2台以上のインバータ電流を合わせて検出すれば複数台のインバータにも対応できる。

電圧形アクティブフィルタの構成を図4、その制御ブロックを図5に示す。

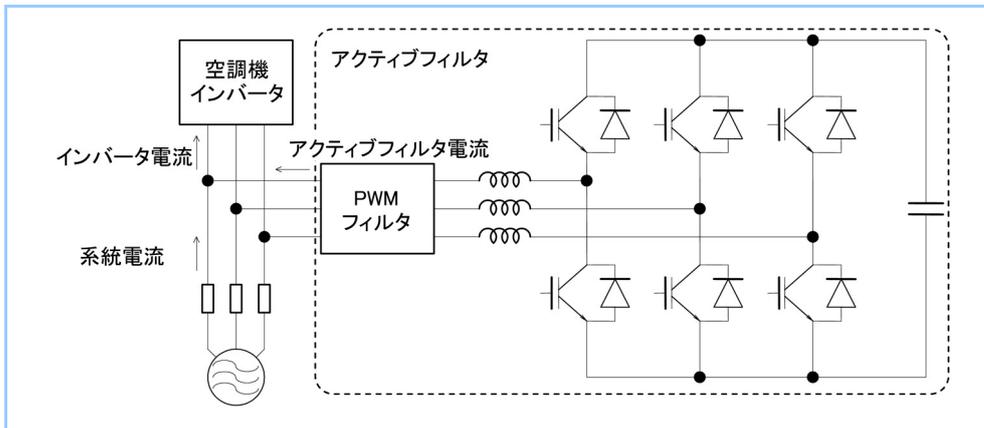


図4 電圧形アクティブフィルタの構成

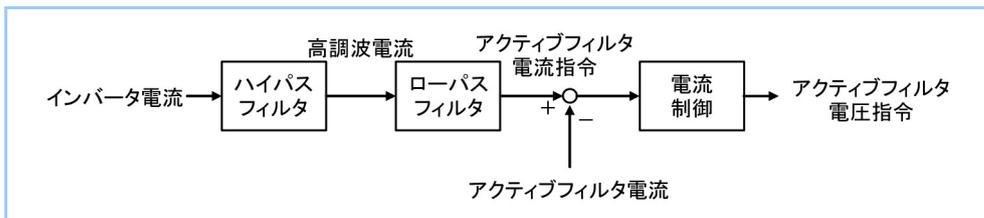


図5 アクティブフィルタ 制御ブロック図

補償対象のインバータ電流を検出し、その検出電流から高周波成分のみを通すハイパスフィルタにより基本波成分を取り除き、補償対象となる高調波電流を求める。この高調波電流に補償対象の周波数帯域より高い成分を除くローパスフィルタを通したものをアクティブフィルタ電流指令とする。ローパスフィルタを通さない高調波電流をアクティブフィルタ電流指令とした場合、アクティブフィルタ自身が発生させ除去しきれないPWMキャリア周波数成分の電流や、系統に接続されている他の機器と共振した高調波電流が補償対象のインバータにも流れ込み、インバータ電流に影響を与えて指令値が発振する場合の対策としてローパスフィルタを通してはいる。

アクティブフィルタは、電流指令に従ってアクティブフィルタの出力電流を制御するように電圧指令を出力し、その電圧指令に従ってスイッチング素子を制御することで系統に流れる電流の高調波電流を低減させる。

ところが、インバータが大容量化しているため電流が大きく、更に図3の転流部分ではインバータの電流の変化が大きくなり、そのままではローパスフィルタや電流制御の遅れにより高調波低減性能が低下していた。

そこで、転流時の電流変化を予測する予測制御を開発し、検出電流から得られる電流指令に対して補正を行うことで、高調波低減性能を向上させた。⁽²⁾

開発した予測制御の制御ブロックを図6に示す。

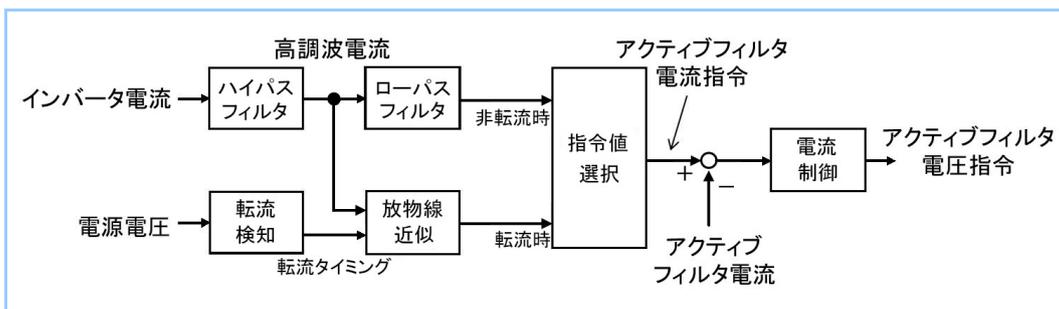


図6 アクティブフィルタ 予測制御 制御ブロック図

予測制御は、転流が起きる時に系統インピーダンスのみで電源が短絡されることから、転流時の電流が放物線状に近似できることを利用して電流波形を予測する。検出した電源電圧から転流タイミングを計り、放物線状に近似した波形を転流時に選択して電流指令とすることで、インバータが大容量化しても遅れなくアクティブフィルタの電流を制御することができる。これにより高調波低減性能が向上できる。

このように遅れが生じる部分のみ電流波形を近似して電流制御の制御遅れを補償することで、組込み CPU でも対応可能な計算量に抑制し当該機能を実現することができた。

3.2 解析と実測結果

転流時の入力電流を近似する電流予測制御の効果を、同一の負荷条件で行ったシミュレーションにより示す。図7にシミュレーション結果を示す。

予測制御なし(a)の場合、インバータ電流に含まれる総合歪率 THD:28.1%の高調波をアクティブフィルタ電流により補償したところ系統電流の総合歪率 THD は 6.7%まで減少しているが、転流時に系統電流に歪みが残っている。

これに対して、予測制御あり(b)の場合、転流時には放物線状に近似した予測電流を用いているので遅れがない。このため、転流時の歪みがほとんどなくなっており、系統電流の総合歪み THD が 2.2%まで小さくなっている。

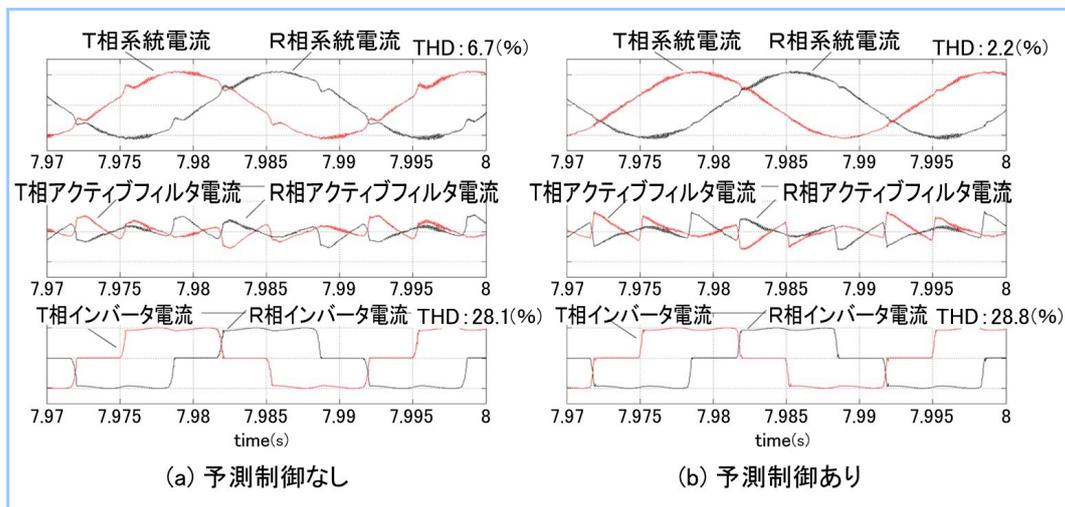


図7 シミュレーション波形

この予測制御を適用したアクティブフィルタによる実測電流波形を図8に示す。

補償対象のインバータ電流に対して、アクティブフィルタ電流を出力することで、系統電流の高調波歪みを低減している。

実機においても、インバータ電流に対してアクティブフィルタの電流に遅れが生じないので、転流時に生じる系統電流の歪みが小さく、インバータ入力電流の総合歪率 31.3%から系統電流の総合歪率 3.5%まで低減できていることが分かる。

MSV では、インバータを4台内蔵していることから、必要な高調波低減量にあわせてアクティブフィルタを1台～4台搭載することができるため、高調波対策の仕様として2台を搭載したものをラインナップしてコスト低減を可能にした。また、必要に応じて他の搭載数にも対応できる。

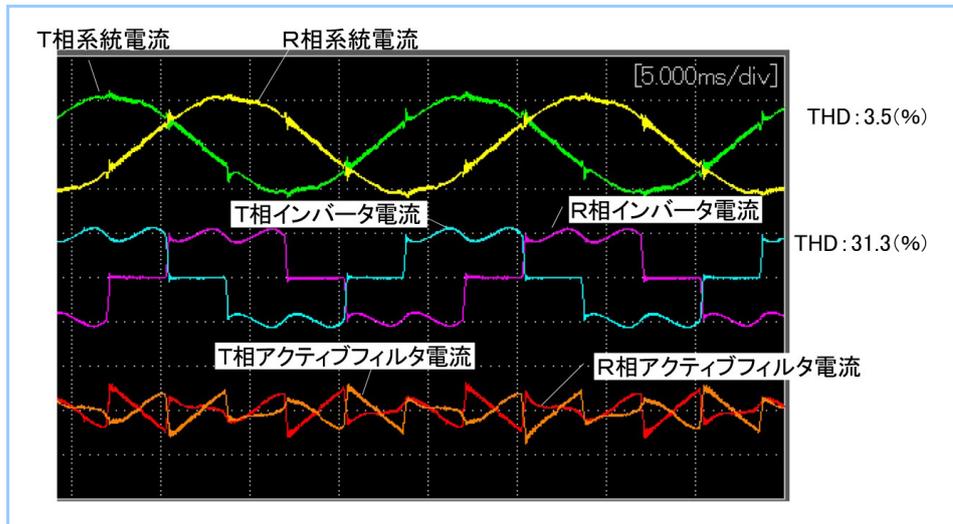


図8 実測波形

4. まとめ

省エネのため、ほとんどの空調機は高効率となるインバータを使用している。一方で、インバータは高調波電流を電源系統に流出するので対策が必要となる。

この対策の1つとして、本報では MSV に採用した高調波電流を補償するアクティブフィルタについて述べた。このアクティブフィルタでは、補償対象のインバータが特定されていることを利用して電流波形を予測する方法を示し、組込み CPU でも可能な計算量で高調波低減効果が得られた。

このアクティブフィルタは、同じ形式のインバータであれば高調波低減対策として適用でき、他の当社空調機にも適用することができ、オプションとして製品化している。

参考文献

- (1) 一番ヶ瀬幸男, インバータと動力設備3 インバータの選定, 電設技術, Vol.63 No.2, (2017), P.61~66
- (2) 相場謙一ほか, 空調機用アクティブフィルタの電流予測制御, 計測自動制御学会 中部支部シンポジウム 2018, P.9~12