

インバータ機器の電源重畳ノイズ発生メカニズム

Mechanism of Noise Generation in Power Lines caused by Inverter-Driven Equipment

森田 智彦* · 白井 久視*
Tomohiko Morita Hisashi Usui

インバータ機器において、電源重畳ノイズが機器自身とシステムのインピーダンスの共振現象により急激に増大するメカニズムを明らかにし、周りの機器が誤動作や破壊に至る危険性を示唆した。とくに駆動周波数が可聴領域に存在する低周波インバータ機器において、インバータ機器自身のインピーダンス、システムインピーダンスのインダクタンス、および並列接続された機器のキャパシタンスによる共振現象の影響により、220 V_{p-p}にも及ぶインバータノイズが発生することを明らかにした。

The mechanism of rapidly increasing power line noise caused by resonance between the impedance of inverter-driven equipment and the system has been clarified, and the danger has been evaluated of malfunction or destruction of peripheral equipment caused by power line noise. Particularly in the case of low-frequency inverter equipment, which operates in the audible frequency range, generation of inverter noise as high as 220 V_{p-p} has been noted when resonance occurs between the impedance of the inverter equipment, the inductance and impedance of the power line, and the capacitance of equipment connected in parallel.

1. ま え が き

近年、家庭用電化製品の高機能化、省エネルギー化に伴い一般家庭へのインバータ機器の普及が進んでいる。インバータ方式とは、50 Hz もしくは 60 Hz の商用電源周波数を数 kHz から数百 kHz 程度に変換することで、電力利用の効率化を図るものである。その際、インバータ周波数に基づくスイッチングに伴う基本波や高調波成分がノイズ（以下、インバータノイズと記す）として放出される。

インバータノイズによる障害を防止するため、CISPR (Comite international Special des Perturbations Radioelectriques：国際無線障害特別委員会) が定める国際規格に準じて家電メーカ各社はノイズ試験を実施している。

これまでのインバータノイズによる電磁障害としては、高調波成分の放射ノイズによる AM ラジオ放送への混入や映像機器への画像の乱れ等が主である。しかし、5 kHz 程度の低周波でスイッチングする機器の一部で、使用される環境によってはごくまれにインバータの基本波ノイズが予想を越える高いレベルで発生し、周りの機器が故障する市場トラブルが確認されている。

一方で CISPR 規格では 2 kHz から 9 kHz のノイズ規制が存在せず、信頼性の高い製品づくりのためには社内独自にノイズ対策に取り組む必要がある。そこで、新たに問題となっている低周波インバータの基本波ノイズが増大する環境の特定と、そのメカニズムの解明が求められている。

本稿では、インバータ機器が接続される系統電源のインピーダンス（以下、システムインピーダンスと記す）に着目し、その機器から発生する電源重畳ノイズの共振メカニズムを解明する。

2. インバータノイズの発生と重畳メカニズム

本章では、市場トラブルの原因となっているインバータ機器の一例としてインバータ式掃除機を取り上げ、インバータノイズの発生について説明する。供試機器には市販のインバータモータを搭載したサイクロン式掃除機を使用する。駆動周波数は 5 kHz、消費電力は 1000 W である。なお、この駆動周波数は可聴周波数 (20 Hz ~ 20 kHz 程度) の領域内である。一般にインバータ機器は、スイッチングに伴ううなりなどの騒音を避けるため 20 kHz 以上の高い周波数で駆動させることが多く、供試機器の駆動周波数である 5 kHz は他のインバータ機器と比較すると低い部類に

* パナソニック電工解析センター (株) Panasonic Electric Works Analysis Center Co., Ltd.

あたる。

2.1 インバータ式掃除機の回路

図1にインバータ式掃除機の回路構成を示す。回路は、モータスイッチングノイズ除去を目的としたコンデンサC1、交流電源平滑用コンデンサC2、整流用のダイオードブリッジBR1、インバータ主回路であるトランジスタTR1～TR4、およびモータで構成されている。

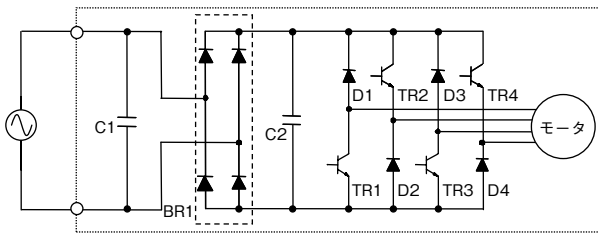


図1 インバータ式掃除機の回路構成

2.2 インバータノイズ波形

図2に供試機器から電源線に重畳されたインバータノイズの電流・電圧波形の一例を示す。電圧は機器の電源線の線間を差動電圧プローブで測定し、電流は機器の電源線の片線を電流プローブで把持して測定する。商用電源60 Hzの正弦波のピークに、さらに周波数の高い5 kHzの波が重畳している。

60 Hzの電源は電圧実効値98 Vrms、電流実効値11.5 Armsであり、重畳している5 kHzの高周波成分を交流の最大値と最小値の差で表すと、ノイズ電圧値は70 Vp-p、ノイズ電流値は8 Ap-pである。

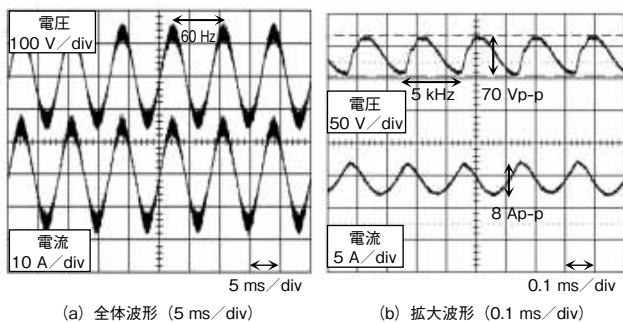


図2 インバータノイズ波形

2.3 系統電源へのノイズ重畳

本節では、系統電源へのインバータノイズの重畳メカニズムについて説明する。

ノイズ電圧の電源への重畳は、インバータ機器内部で発生したノイズ電流による電源系統での電圧降下として以下のように説明できる。

図1の回路構成において、トランジスタTR1～TR4からモータに流れるインバータ電流値に対してコンデンサ

C2の容量が小さく、これだけではモータ電流を賄いきれないため、モータ電流の一部が電源側から供給される。したがって、インバータ式掃除機の入力電流には図2に示したようにモータの駆動周波数(5 kHz)のノイズ電流が流れ、系統のインピーダンスの影響を受けて電源側に図2(b)のようなノイズ電圧が発生する。

インバータノイズの重畳メカニズムをまとめると以下のようになる。

- (1) モータは駆動周波数5 kHzで動作する。
- (2) C2の容量が小さく、5 kHzの電流が供給不足となる。
- (3) 系統電源から5 kHzの電流を供給する。
- (4) 系統インピーダンスの影響で、電圧降下が発生する。
- (5) 系統電源にモータ駆動周波数のノイズ電圧が重畳される。

3. インバータノイズの増大メカニズム

各家庭の電源環境によって、電源に重畳されるノイズレベルは異なる。そこで、一般家庭の系統インピーダンスの統計値を示し、系統インピーダンスがノイズレベルに及ぼす影響を検討する。

3.1 系統インピーダンス

系統インピーダンスとは、電力会社が保有する商用の配線網がもつインピーダンスであり、図3に示すように柱上トランス・低压配電線・引込線・屋内電気配線のインピーダンスの総和となる。なお柱上トランスの一次側である高压配電線のインピーダンスは、柱上トランスのインピーダンスと比べて無視できる。

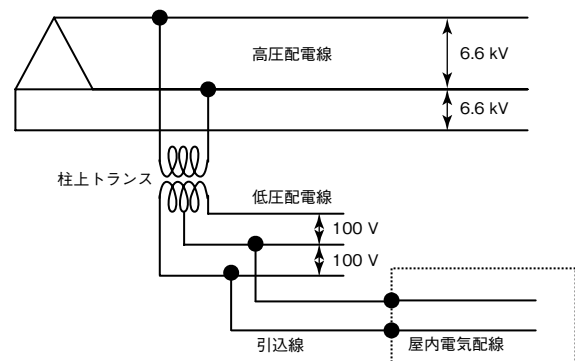


図3 系統インピーダンス構成図

柱上トランスのインピーダンスはトランス容量に依存し、容量が大きいほどその値は低くなる。また、低压配電線・引込線・屋内電気配線のインピーダンスは線径と線長に依存し、一般に線径が太くて短いほど低くなる。これらのインピーダンスの抵抗成分(以下、Rと記す)、インダクタンス成分(以下、Lと記す)の一例を表1に示す。

表1 系統のインピーダンス例

項目	条件	R	L
柱上トランス	20 kVA	15 mΩ	50 μH
低圧配電線	60 mm ²	0.3 mΩ/m	0.42 μH/m
引込線	38 mm ²	0.3 mΩ/m	0.48 μH/m
屋内電気配線	3 mm ²	0.3 mΩ/m	0.64 μH/m

この値はあくまで一例であり、系統インピーダンスは線路の種類や環境ごとに異なるので、一概に決定することはできない。そのため、累積百分率を用いて表2のように記述される¹⁾。たとえば、累積百分率が90%とは、一般家庭の90%は系統インピーダンスがR = 397 mΩ, L = 370 μH以下に収まることを意味している。

表2 系統インピーダンスの累積百分率

累積百分率	統計値	
	R (mΩ)	L (μH)
平均	135	180
80%	304	310
90%	397	370
95%	506	470

3.2 実験方法

インバータノイズが増大するメカニズムを解明するため、系統インピーダンスとノイズレベルの相関性を調べる。ノイズレベルの測定は、専用に作製した系統インピーダンス模擬装置で系統インピーダンスを変更しながら行う。このときの系統インピーダンス模擬装置のパラメータを表3に示す。

表3 系統インピーダンス模擬装置の回路定数

累積百分率	系統インピーダンス模擬装置	
	R (mΩ)	L (μH)
平均	200	180
80%	333	310
90%	400	370
95%	500	470

また、他の機器が同一系統に並列接続される場合を考慮し、電源線の線間にコンデンサを挿入した影響も評価する。その評価系の構成を図4に示す。

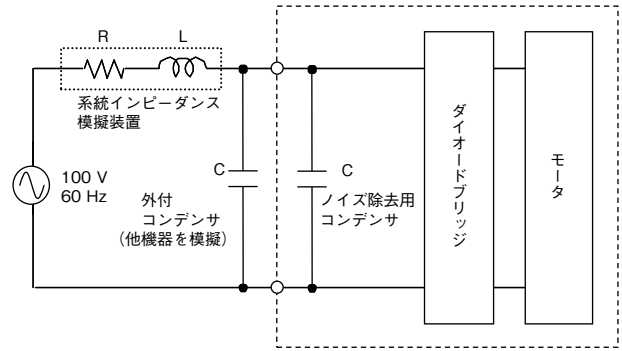


図4 インバータ式掃除機の評価系構成

なお、実験には出力インピーダンスがきわめて低い電源装置を使用しているため、インピーダンスは系統インピーダンス模擬装置の設定値のみで決まる。電源電圧は100Vを基本とし、電源周波数は60Hzとする。

3.3 系統電圧の影響

系統電圧とノイズレベルの相関性を確認するため、系統電圧を変化させてインバータノイズへの影響を評価する。家庭環境における電圧値の変動を考慮し、95V、100V、107Vの3条件で評価を行い、系統インピーダンスは系統インピーダンス模擬装置によって累積百分率のとおりに変化させる。これらの条件でノイズ特性を測定した結果を図5に示す。インピーダンスは、5kHzにおける系統インピーダンス模擬装置のR成分とL成分の合成から算出している。

系統電圧を高く設定するに従い、系統インピーダンスにかかわらず、つねに高いノイズレベルが観測され、その値は最大で88 Vp-pに達している。

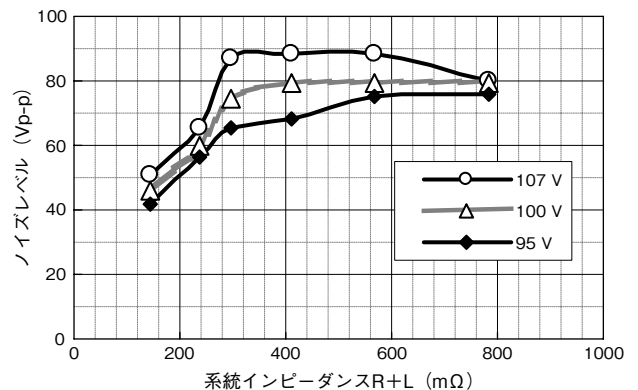


図5 系統電圧の影響（インバータ式掃除機）

3.4 系統インピーダンスの影響

系統インピーダンスのR成分とL成分がそれぞれノイズレベルに及ぼす影響を検討する。

3.4.1 R成分の影響

系統インピーダンス模擬装置を使って系統インピーダン

スの R 成分の影響を調査する。R 成分は累積百分率の値を中心に 0 ~ 1000 mΩ までの値を設定し、L 成分は 0 H とする。

結果を図 6 に示す。R 成分の増加に従って若干のノイズレベルの増加はみられるものの、急激な変化はない。したがって、ノイズレベルに対する R 成分の影響は少ないといえる。

ノイズレベルの若干の増加は、系統インピーダンスの増加による電源側での電圧降下の幅が大きくなるためと考えられる。

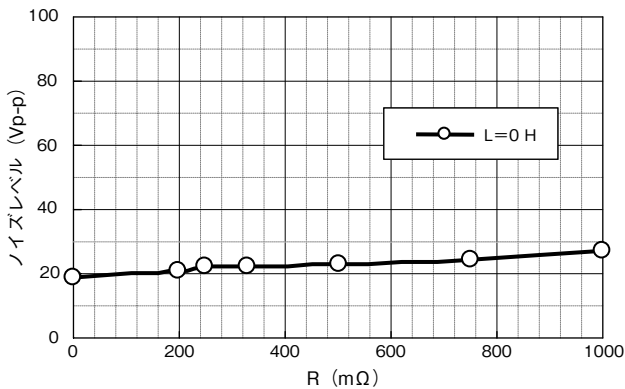


図 6 R 成分の影響 (インバータ式掃除機)

3.4.2 L 成分の影響

系統インピーダンス模擬装置を使って系統インピーダンスの L 成分の影響を調べる。系統インピーダンスの累積百分率を参考にして、L 成分は 90 ~ 700 μH の範囲で設定する。R 成分は 0 Ω 固定、333 mΩ 固定、L 成分に応じて累積百分率どおりに変更の 3 条件で実験を行う。

結果を図 7 に示す。図 6 に示した R 成分の影響に比べて L 成分の影響は大きく、L = 370 μH 付近で 80 Vp-p 以上に達している。

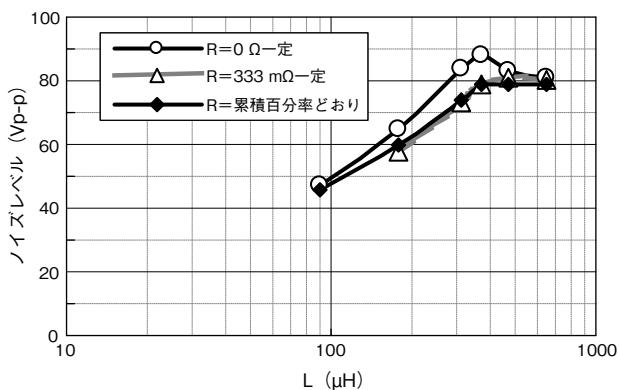


図 7 L 成分の影響 (駆動周波数 5 kHz)

3.5 並列接続された機器の影響

これまで系統電圧や系統インピーダンスの影響をインバータ機器単体の条件で調査したが、実環境では同一系統

に他の機器が並列接続されることが考えられる。一般的な機器の電源側にはノイズ除去用コンデンサが実装されており、このキャパシタンス成分 (以下、C と記す) が系統インピーダンスとともに並列共振を引き起こすことが予想される。そこで、並列接続された C 成分がインバータノイズに及ぼす影響を検討する。一般的なノイズ除去用コンデンサの値を参考に、並列接続機器の C 成分を 0.2 ~ 38 μF の範囲で変化させてノイズレベルを測定し、その結果を図 8 に示す。C 成分の影響が非常に大きく、インバータ式掃除機のノイズレベルは C = 10 μF 付近で 220 Vp-p に達している。

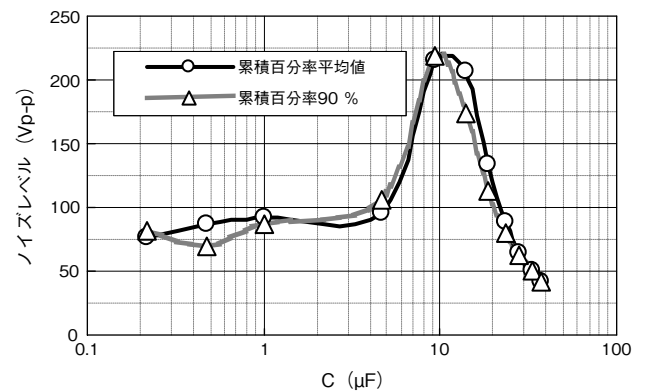


図 8 C 成分の影響 (インバータ式掃除機)

3.6 インバータノイズ増大のメカニズム

評価に用いたインバータ機器の場合、最大のインバータノイズが観測される条件は、系統インピーダンスが累積百分率 90 % (R = 400 mΩ, L = 370 μH)、並列 C 値が 10 μF である。その際の波形を図 9 に示す。駆動周波数である 5 kHz の基本波ノイズが共振し、220 Vp-p という高いノイズ電圧が商用電源に重畳されている。商用電源 100 V の最大電圧は 141 V であるが、ノイズが重畳した場合には 251 V に達しており、周りの機器のノイズ対策が不十分であれば故障を引き起こす可能性がある。

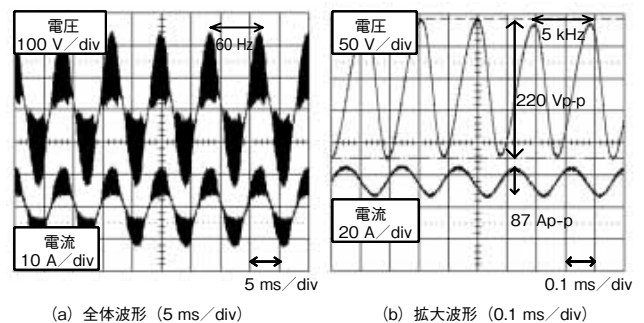


図 9 インバータ式掃除機ノイズの最大波形

インバータ式掃除機におけるインバータノイズ増大メカニズムについて得られた知見をまとめると以下のとおりで

ある。

- (1) 駆動周波数 5 kHz であるインバータ掃除機は一般の電源環境で基本波ノイズの共振を引き起こす。
- (2) 共振条件は $R = 400 \text{ m}\Omega$, $L = 370 \text{ }\mu\text{H}$, $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ である。
- (3) 系統インピーダンスの累積百分率が平均値から 90 % の範囲においてノイズレベルがとくに大きい。
- (4) 並列接続機器の C 成分がもっとも支配的で, $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ 付近で急激にノイズレベルが増加する。
- (5) 系統電圧が 100 V から 107 V に上昇することで, 累積百分率が 90 % の場合, ノイズレベルは 68 Vp-p から 88 Vp-p に上昇する。

4. 20kHzインバータ機器のノイズレベル調査

これまでに得られた知見から, インバータノイズによる障害が懸念される他の機器においても同様に, 系統インピーダンスの影響を考慮したうえでノイズレベルを測定する。

ここでは IH (Induction Heating : 電磁誘導加熱) 方式の卓上調理器を取り上げる。その理由は, これらがきわめて安価であるが十分な EMI 対策が行われていないものも多く, 一方では通信販売や量販店で広く入手可能であることから, ノイズによる市場トラブルの可能性が存在するためである。なお, 一般的な卓上 IH 調理器の駆動周波数は約 20 kHz, 消費電力は 1400 W 程度である。

21 機種種のノイズレベルを測定した結果, 5 機種で明らかな共振が認められる。その他は系統インピーダンスおよび並列コンデンサを変化させても明らかな共振は認められない。ここでは, とくにノイズレベルが高い 3 機種種の共振現象について述べる。

卓上 IH 調理器と系統インピーダンス模擬装置を使用した評価系構成を図 10 に示す。

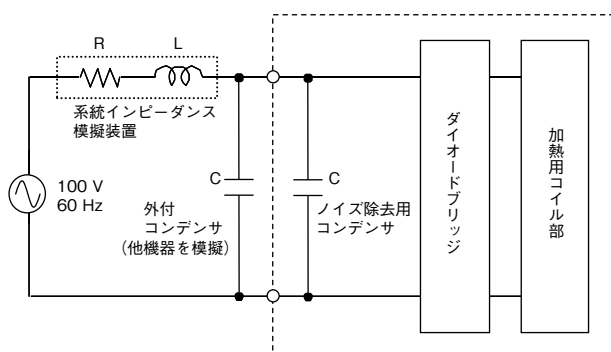


図 10 卓上 IH 調理器の評価系構成

4.1 系統インピーダンスの R 成分の影響

系統インピーダンスの L 成分を累積百分率の平均値である $180 \text{ }\mu\text{H}$ で固定し, ノイズレベルを測定した結果を図 11 に示す。インバータ式掃除機と同様, ノイズ電圧は R 成分

を変化させても有意差が認められない。

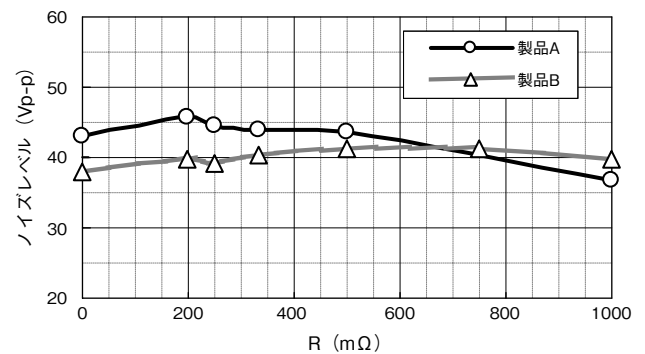


図 11 R 成分の影響 (卓上 IH 調理器)

4.2 系統インピーダンスの L 成分の影響

L 成分を $10 \sim 470 \text{ }\mu\text{H}$ の間で変更し, ノイズレベルを測定する。系統インピーダンスの R 成分については, 累積百分率の平均値である $200 \text{ m}\Omega$ で固定している。

ノイズレベルを測定した結果を図 12 に示す。系統の L 成分が $22.5 \sim 30 \text{ }\mu\text{H}$ の範囲において 3 機種種の卓上 IH 調理器で共振がみられる。観測された最大のインバータノイズは製品 A の 92 Vp-p である。

しかし, 一般的な柱上トランスの L 成分が $50 \text{ }\mu\text{H}$ 程度であることから, 一般家庭において $22.5 \text{ }\mu\text{H}$ という L 成分の低い系統インピーダンスは考えにくい。したがって, 駆動周波数が 20 kHz 程度の卓上 IH 調理器については, L 成分による共振は実際の環境で起こらないものと推察される。

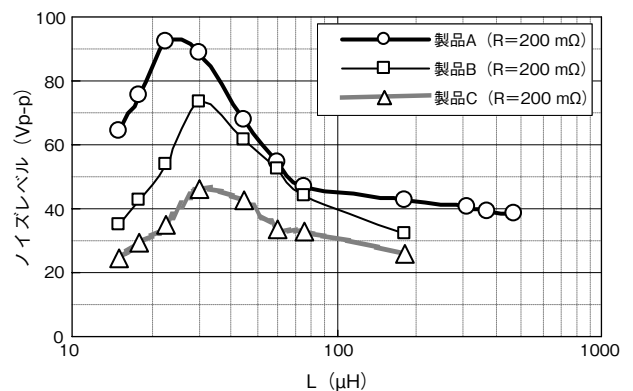


図 12 L 成分の影響 (卓上 IH 調理器)

4.3 並列接続機器の C 成分の影響

ノイズレベルに対する C 成分の影響を確認する。接続する C 値は, 一般的な家電機器のノイズ除去用コンデンサの $0.2 \sim 38 \text{ }\mu\text{F}$ 程度を中心に設定する。

なお前節の検討から, ノイズレベルに対して影響が大きい系統インピーダンスの L 成分は, 柱上トランスのもつ L 成分 ($50 \text{ }\mu\text{H}$), 累積百分率の平均値 ($180 \text{ }\mu\text{H}$) の 2 条件に固定する。

製品 A の測定結果を図 13 に示す。並列コンデンサの容量の増加に伴い、ノイズレベルは単調に減少している。機器内部の C 値が十分大きいため、外部に小容量の C 成分を挿入してもノイズレベルは変化しない。また、L 成分が小さいほどノイズレベルは高く、これは図 12 の結果とも一致する。製品 B と製品 C は、ともに製品 A と同様の傾向を示すと考えられる。

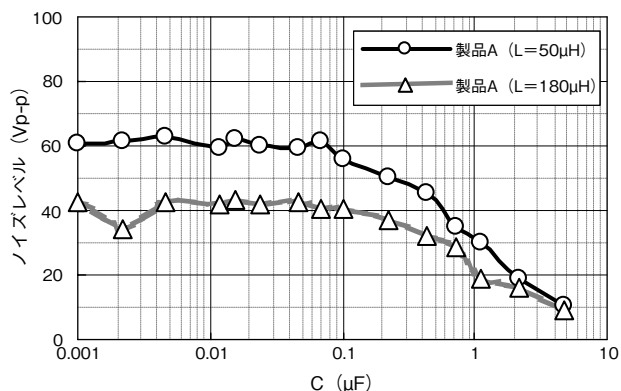


図 13 C 成分の影響 (卓上 IH 調理器)

以上の結果から、20 kHz で駆動する卓上 IH 調理器についてはコンデンサ並列挿入による共振は発生しないと見える。これは、系統の L 成分が十分大きく、共振条件から外れているためである。したがって、C 成分を挿入した場合に共振の極大値からずれてノイズレベルが減少するという結果となる。

4.4 考察

卓上 IH 調理器の共振現象について、共振周波数 f は式 (1) のように表される。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{in}+C_{ex})}} \quad (1)$$

ここで、 L は系統インピーダンスの L 成分、 C_{in} は回路内部のノイズ除去用コンデンサの容量、 C_{ex} は並列接続機器の容量である。

図 12 の共振条件から系統インピーダンスの L 成分は 22.5 μ H であり、外部の並列コンデンサは 0 F、実測した調理器内部のコンデンサ成分は 3.5 μ F であることから、 f は式 (2) から約 18 kHz となり、駆動周波数の 20 kHz とほぼ一致する。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{22.5 \times 10^{-6} \times 3.5 \times 10^{-6}}} = 18(\text{kHz}) \quad (2)$$

仮に、この共振条件に対してさらに並列機器のコンデンサを挿入すると、共振周波数は 18 kHz よりも低周波数域

に移動する。したがって、共振は発生しにくくなり、4.3 節の結果とも一致することがわかる。つまり、卓上 IH 調理器の基本波ノイズの共振は、一般家庭の電源環境では発生しない。

卓上 IH 調理器において観測されたノイズレベルが最大の波形を図 14 に示す。スイッチング周波数である 20 kHz の基本波ノイズが共振し、92 Vp-p という高いノイズ電圧が商用電源に重畳されている。

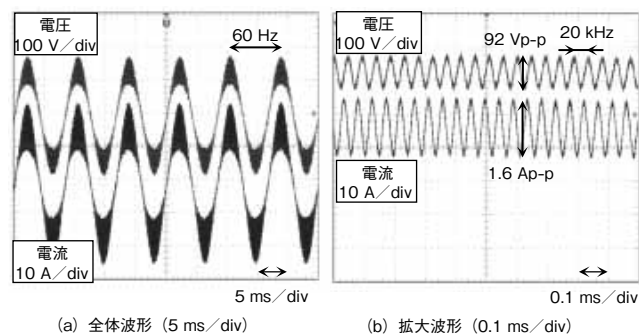


図 14 卓上 IH 調理器ノイズの最大波形

5. あとがき

インバータ機器において、電源重畳ノイズが機器自身と系統のインピーダンスの共振現象により急激に増大するメカニズムを明らかにし、周りの機器が誤動作や破壊に至る危険性を示唆した。

とくに、基本波ノイズの共振は低周波インバータ機器特有の現象であり、共振条件に合致する C 値をもった機器が挿入されるとインバータノイズは 220 Vp-p にも及ぶことを明らかにした。

また、共振に着目したインバータノイズの増大メカニズムを解明することにより、信頼性の高い製品づくりを実現できる。

*参考文献

- 1) 電気安全環境研究所：高調波技術マニュアル，高調波問題検討委員会，p.45（1983）

◆執筆者紹介



森田 智彦

パナソニック電工解析センター(株)



臼井 久視

パナソニック電工解析センター(株)