

— EVバッテリー高電圧化に伴う課題と新規試験法 —

パワエレ機器のEMIへ測定設備が及ぼす影響

オムロン株式会社
インダストリアルオートメーションビジネスカンパニー
技術開発本部 第3技術部
藤田 浩志

パワエレ機器は一般機器と比較し電力が大きく、複数の電源線が接続される。このため、EMC評価結果に測定設備が意図しない影響を及ぼす場合がある。本稿ではパワーコンディショナを取り上げ、EMC専門委員会パワーエレクトロニクスEMC規格対応WG活動での検証結果をもとに、パワエレ機器のEMI測定における問題点と対処法について述べる。

1. はじめに

気候変動問題は人類共通の喫緊の課題として重要視されるようになり、脱炭素に向けた動きが世界的に加速している。世界各国・地域は2050年等の年限を区切ったカーボンニュートラルの実現を表明し、日本もこうした世界的な状況をふまえ、2050年カーボンニュートラルを宣言した。カーボンニュートラル実現に向けて、エネルギー消費効率の改善に加えて、脱炭素化された電力による電化を進めることを取り組みの方向性として示している。^[1]

電力の供給サイドでは太陽光発電や風力発電による脱炭素化、需要サイドでは鉄道や自動車、産業機械、家電製品の電化やエネルギー消費効率改善が求められ、このうち自動車では新車販売の電動率100%の実現を目標に掲げている。^[2]

電動化に伴い、電力変換を支えるパワーエレクトロニクス機器(以下、パワエレ機器)の重要性は増してきており、課題となる電磁ノイズへの対処と評価方法への関心が高まっている。

2. パワエレ機器の特徴とEMC評価法

2.1 パワエレ機器の特徴

パワエレ機器とは、電気エネルギーの変換を主目的と

した装置やユニットの総称である。パワエレ機器では、直流と交流の変換、直流同士の変換、交流同士の変換を、主に半導体を用いた制御技術によって実現する。

一般民生機器と比較すると、電力変換が主目的のため、扱う電力は大きくなり、また複数の電力線に接続することが通常である。一般機器の例であるIT機器(パソコン)と、パワエレ機器の例であるパワーコンディショナの特徴の比較を表1に示す。

表1 一般機器とパワエレ機器の特徴

機器	一般機器 例.パソコン	パワエレ機器 例.パワーコンディショナ
電力	小電力 (数十～数百W)	大電力 (数kW～)
電源入出力	AC入力のみ	・AC入出力(系統線) ・複数のDC入出力 (蓄電池、太陽光パネル等の複数接続)

パワエレ機器は電力変換回路から高いレベルのノイズが発生し、複数の入出力へ流出するため、電磁ノイズに対する課題感が大きい。特に、外部へのノイズ妨害であるエミッションが問題となる。

2.2 パワエレ機器のEMC評価法

一般機器と同様に、パワエレ機器においても電磁両立性に関する要件を満たす必要がある。基本となるのはIEC(国際電気標準会議)規格と、IECの特別委員会であるCISPR(国際無線障害特別委員会)規格である。これらの規格等をもとにした各国・地域の法規制やルールに適合することが、パワエレ機器に求められる電磁ノイズの要件である。

規格には大きく分けて基本規格、共通規格、製品群規格、製品規格の4種類があり、後になるほど適用の優先順位が高い。パワエレ機器であるパワーコンディショナの代表的な適用規格を表2に示す。

表2 パワーコンディショナの適用規格

基本規格	CISPR 16, IEC 61000-3, -4など
共通規格	IEC 61000-6など
製品群規格	CISPR 11など
製品規格	IEC 62920など

このうち、パワエレ機器に幅広く適用・参照される製品群規格のCISPR11^[3]は、複数の入出力を持つ場合のエミッションの試験方法についても規定している。CISPR11では、図1のとおり、エミッション測定のため擬似回路網(AN ※1)やコモンモード吸収デバイス(CMAD ※2)を使用することが規定され、規格に準じた評価環境ではノイズ評価の再現性担保のためにフィルタなどが多数接続されることが一般的である。

※1 AN:Artificial Network

※2 Common-Mode Absorbing Device

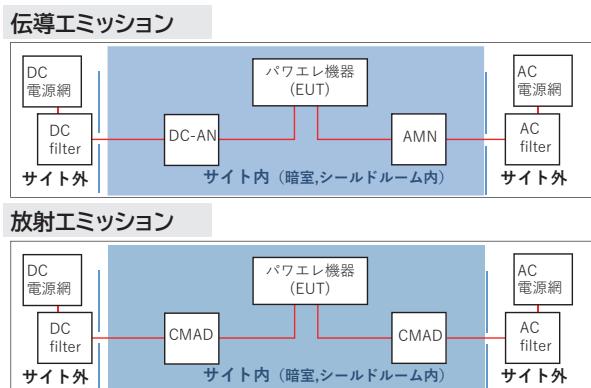


図1 パワエレ機器のエミッション評価環境

2.3 パワエレ機器のEMC評価における課題

パワエレ機器のエミッション評価では複数の擬似回路網やフィルタなどが連続して接続され、これらの測定機器や設備はインダクタンス(L)、キャパシタンス(C)等の成分を含む。L成分やC成分を含む場合、条件によっては意図しないインピーダンスの変化を発生させことがある。

3. 伝導エミッション測定の問題点と対策方法

測定設備の組み合わせによって、伝導エミッションが悪化する原因と対策方法について述べる。

3.1 測定の問題点

パワーコンディショナの伝導エミッションにおいて、CISPR11要求事項であるDC-ANを使用することで伝導エミッションが悪化することがある。実際に、DC-ANを接地させて用いたときに、AC側の伝導エミッションが60dB以上悪化し、ClassAの許容値を大幅にオーバーする事例が報告されている。

3.2 原因

図2のように、測定機器や設備の組み合わせにより、測定環境のアースを通じたコモンモードのノイズ経路が形成される。これをコモンモードループと呼ぶことにする。コモンモードループ上には、DCにDC-ANやサイトフィルタ、AC側にAMNや同じくサイトフィルタが含まれ、これらのL成分やC成分が共振の原因となる。

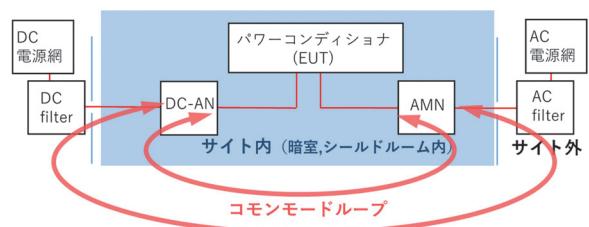


図2 測定環境におけるコモンモードループ

共振によってコモンモードループのインピーダンスが低い周波数が生まれ、これにEUT動作周波数が重なることで大電流がコモンモードループに流れる。大電流に

よってEUT内のフィルタのCMCC(※3)が飽和すると、伝導エミッション値は劇的に悪化する。以降の3.2.1から3.2.3で、検証結果をもとに原因について述べる。

※3 CMCC:Common-Mode Choke Coil

3.2.1 コモンモードループのインピーダンス特性

まず、コモンモードループにおける共振の存在を、経路のインピーダンスを計測することで確認した。計測にはインピーダンスアナライザを用いて、図2のEUTの代わりに接続した。このとき、ポート1をDC側、ポート2をAC側とし、DC電源やAC電源は供給せずに無通電の状態とした。また、DC線やAC線は、複数線を短絡させて一括での計測とした。

上記のようにしてEUTからみたDCとACの間のインピーダンスを計測すると、図3のような特性が得られた。実線はインピーダンスの絶対値、破線はインピーダンスの位相である。

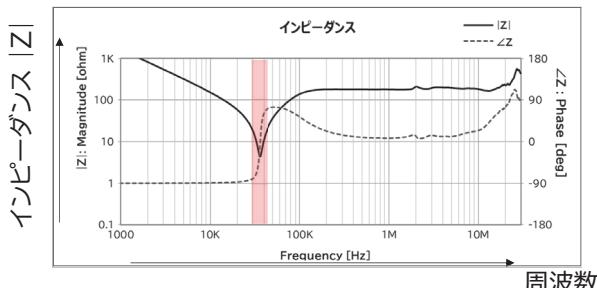


図3 コモンモードループのインピーダンス特性

図3の結果から、EUTからみたDCとACの間のインピーダンスに、値が低い点が存在することが分かる。インピーダンス値は 4.4Ω であり、周波数は 36kHz であった。同時に、位相が負から正へ回転していることから、LCの共振周波数であると推定した。

共振周波数ではDCとAC間のインピーダンスが低くなるため、他の周波数と比べてコモンモードループに電流が流れやすくなる。

3.2.2 パワーコンディショナのスイッチング電流

つぎに、図2の環境において 16kHz のスイッチング動作を行うパワーコンディショナをEUTとして用いて、

EUTとDC-AN間に流れる電流を高周波電流プローブによって測定した。プローブはDCの+線、-線に対して一括で挿入した。これにより、図4のコモンモード電流のスペクトルを得た。ただし、プローブの補正值やdBmから電流値への換算を行っていないため、全体の傾向のみを確認した。

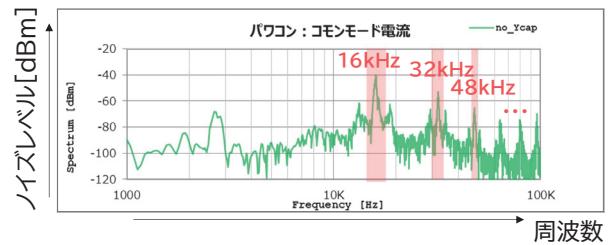


図4 EUTを動作させたときの電流スペクトル

図4より、コモンモードループにはEUTのスイッチング動作周波数(16kHz)とその高調波(32kHz , 48kHz , ...)が流れることが確認できた。

3.2.3 コモンモードループにおける電流の増加

3.2.1、3.2.2より、コモンモードループにおいて経路の共振周波数の存在とEUTの動作周波数をもつ電流が確認できた。

コモンモードループにおいて両者の周波数が一致したとき、流れる電流は増加する。図2の測定環境において、コモンモードループの共振周波数とEUTの動作周波数を一致させたときの検証結果を図5に示す。ただし、動作周波数を調整するためにEUTにはコムジェネ(基準発振器)を用いて、3.2.2と同じ電流プローブによる方法で測定を実施した。

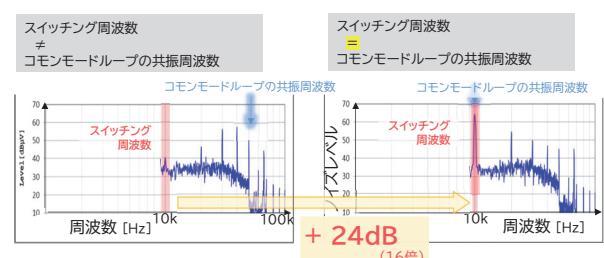


図5 コモンモードループにおける電流の増加

のことから、コモンモードループの共振周波数と

EUTの動作周波数を一致させたとき、動作周波数におけるノイズが大きく悪化することが確認できた。

コモンモードループに流れる動作周波数の電流は、経路であるEUT内にも流れ。電流が増加すると、EUT内のフィルタによっては、飽和によってその効果が減少することがある。測定環境によって発生するこれまでの一連の現象を、以下の図6に示す。

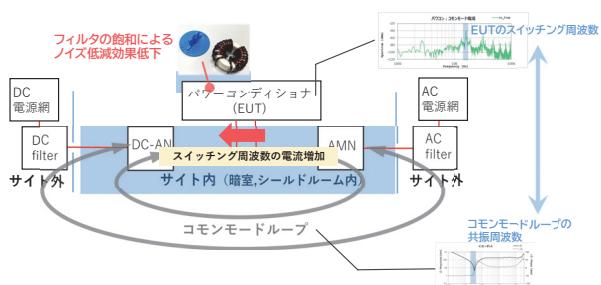


図6 電流増加によるEUT内フィルタ効果の減少

パワエレ機器内におけるEMCフィルタには、CMCCと呼ばれる、コモンモードに高インピーダンスを持たせるこ^とによってコモンモードノイズの流出を抑制する部品が通常用いられる。CMCCは磁性材料を使用したコアを使用しているため、大きな電流が加わると磁気飽和を起こし、インダクタンス(L)値は部品定格値から著しく低下する。^[4]

実際のパワーコンディショナで使われているCMCCが飽和する例を示す。図7はCMCCのコモンモードインダクタンスの周波数特性をインピーダンスアナライザで測定した結果である。CMCCのコアに流す電流を0A、0.1A、

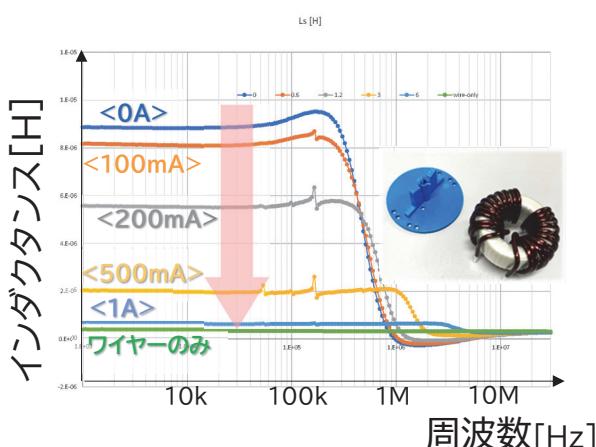


図7 CMCCに電流を重畠したときのインダクタンス

0.2A…と増加させていくと、インダクタンス値が低下する結果が得られた。このCMCCでは、コアに流れる電流(=コモンモード電流)が1Aになると、ほぼワイヤーのみのインダクタンスまで低下し、その特性は飽和に達していることが分かった。

CMCCのインダクタンスが低下し飽和状態にあるとき、CMCCの効果はほぼ無いに等しい。このとき、実際のパワーコンディショナのフィルタ効果がどれだけ悪化するかを、CMCCありの状態と、CMCCなし(ショート)の状態で比較した。

コモンモードループに大きな電流が流れ、EUT内のフィルタのCMCCが飽和すると仮定したとき、図8の結果からAC側、DC側の伝導エミッション値はともに悪化した。特に、今回の検証で用いたEUTはAC側のフィルタが2段であるため、DC側と比較してノイズの悪化が大きい結果となった。

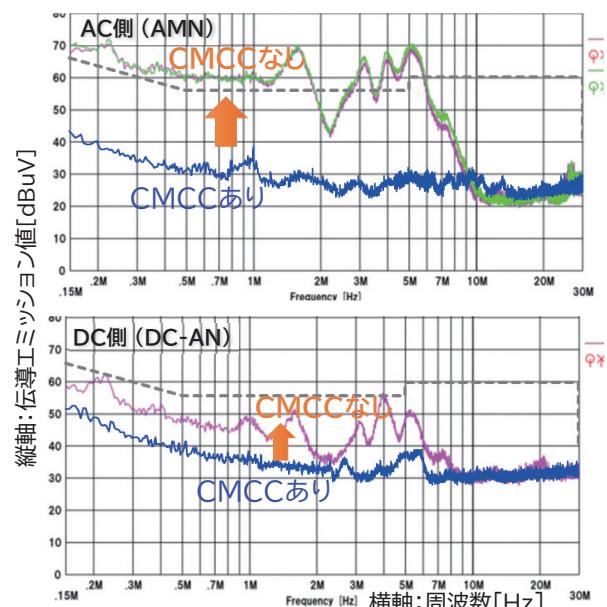


図8 CMCCあり・なしでの伝導エミッション比較

3.3 対策方法

3.2節より、コモンモードループの共振周波数とEUTの動作周波数を一致させないことが対策の重要な観点である。ただし、EUTの動作周波数を変更することは設計上難しいことが多く、コモンモードループの共振周波数の変更が汎用的な対策方法となる。

コモンモードループの共振周波数を変更するには、

DC-ANのAE側において、表3のとおり①R成分、②L成分、③C成分を挿入する方法がある。①は共振周波数自体は変化しないが、ダンピングによって共振エネルギーを低減させることができる。②③は共振周波数を低域へシフトさせる。

表3 コモンモードループの共振周波数の変更

観点	具体的な対策方法
①Rの挿入	DC側のサイトフィルタのアースと測定系のアースの間に、数Ω～数10Ω程度の抵抗を入れる。
②Lの挿入	DC-ANのAE側へ接続するケーブルへCMCCやリングコアを挿入する。値はmHオーダーがよい。
③Cの挿入	DC-ANのAE側へYコンを挿入する。(+)～アース間、(-)～アース間の両方にコンデンサを挿入し、値は数100nF～数uFオーダーがよい。

表3の①②③すべての対策において、EUTの動作周波数のスペクトルが低減することを確認している。図9に、②ケーブルへのL成分の挿入、①DC側サイトフィルタアースへのR成分の挿入を実施し、動作周波数のノイズが低減した結果を示す。

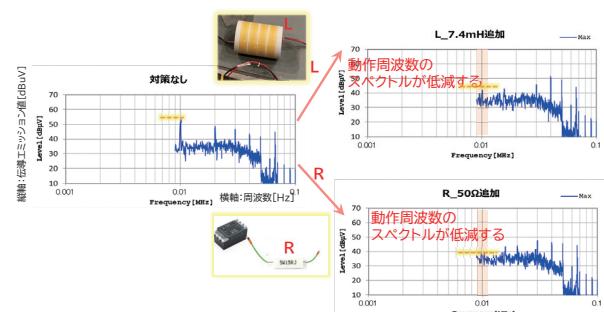


図9 ループの共振周波数変更による対策

4. 放射エミッション測定の問題点と対策方法

CMADを挿入するポートの違いによって放射エミッションの測定結果が変化する原因と対処方法について述べる。

4.1 測定の問題点

CISPR11ではCMADを挿入することが要求され、測定距離3mにおいてテストボリュームを超える場合は必須となる。ケーブルが3本以上を超える場合は最大エミッ

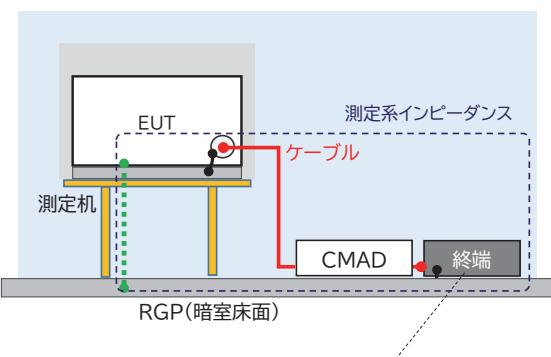
ションが期待される3ポートを選定して、CMADを挿入することになる。^[3]

しかし、4ポート以上の複数ポートを有するパワーコンディショナにおいて最大エミッションをもつ3ポートを選定する明確な基準はない。実際に、CMADを挿入するポートの違いによって放射レベルが変化し、全ポートにCMADを挿入しないと評価結果の再現性がとれない事例が報告されている。

4.2 原因

EUTに接続する周辺機器や測定設備を含めた測定系のインピーダンスによって、放射エミッション評価結果が変化することが原因である。

EUTとなるパワエレ機器は、ケーブルを介して系統模擬負荷や供給電源などの周辺機器に接続する。一般的には上記の周辺機器に直接接続せずに、不要ノイズの分離や測定環境の安定化を目的としたサイトフィルタやトランジスタなどを経由して周辺機器に接続されることが多い。これらのEUTからみた外側の機器を総称して「終端」と呼ぶことにする。EUTや終端を含む放射エミッション評価の模式図は図10の通りである。



終端：サイトフィルタ、負荷、トランジスタ、電源、（インピーダンスの規定無し）

図10 EUTから見た終端とCMAD

EUTやケーブルの配置の再現性が取れていたとしても、終端のインピーダンス特性が異なると放射エミッションの評価結果の再現性が低下する。CMADが終端の手前(EUT側)に挿入される場合は、再現性の低下は発生しない。ただし、CMADの効果は規定されている30～230MHzの周波数範囲に限定される。

以降の4.2.1から4.2.3で、検証結果をもとに原因について述べる。

4.2.1 終端とEUTから見た測定系のインピーダンス

まず、終端の種類によってEUTから見た測定系のコモンモードのインピーダンスが異なることを確認した。

図10の測定セットアップにおいて、図2のEUTの代わりにインピーダンスアナライザを接続し、インピーダンスプローブを用いてEUTから見たケーブルとアース間の周波数対インピーダンス特性を計測した。EUTのポートは1ポートのみとした。

図11に示す通り、終端の種類によって、計測される測定系のインピーダンス特性が大きく異なる結果が得られた。縦軸のインピーダンスは絶対値で、後述の放射エミッションとの比較のため、縦軸の方向は上側の値が低く、下側の値が高くなるグラフとした。

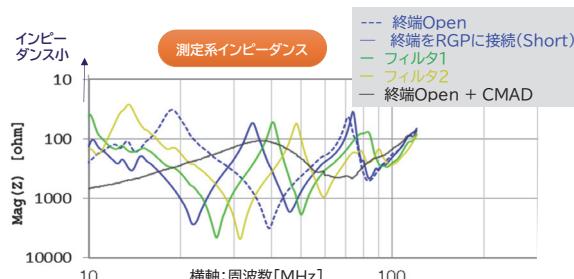


図11 異なる終端条件による測定系のインピーダンス

CMADを挿入すると、30MHz以上の放射エミッション帯域のインピーダンスは、終端条件の違いに対して変化しなくなる。

図12は、8個の異なる終端条件に対して、CMADなしのときとCMADありのときのインピーダンスを測定し比較した結果である。CMADを挿入すると、終端条件にかかわらずインピーダンスが同じになる結果が得られた。

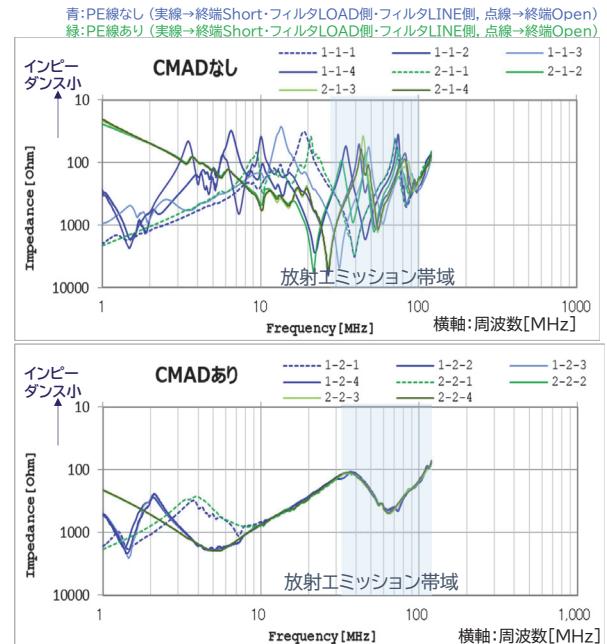


図12 CMAD有無による測定系のインピーダンス

4.2.2 測定系のインピーダンスと放射エミッション

つぎに、EUTからみた測定系のインピーダンスにおける低い周波数と、放射エミッションのピーク周波数が対応していることを確認した。

図10の測定セットアップにおいて、EUTにコムジェネ（基準発振器）を用いて、1ポートの放射エミッションを測定した。図13の上のグラフに放射エミッションの水平・垂直最大値の測定結果を示す。

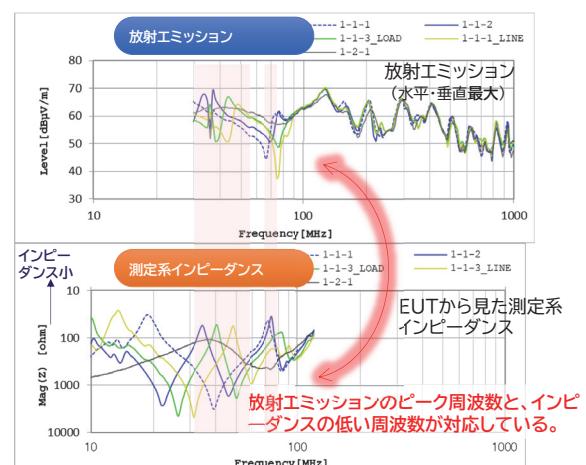


図13 放射エミッション結果と測定系インピーダンス

図13より、どの終端条件においても、放射エミッションのピーク周波数と、EUTからみた測定系インピーダンスの低い周波数が対応している結果が得られた。これは、

測定系のインピーダンスが低いほど、EUT(コムジェネ)の出力インピーダンス50Ωとの整合条件に近くなり、測定系へ伝わるノイズ電力が大きくなることで放射エミッション値が増加するためと考えられる。

4.2.3 複数ポートを持つ場合のインピーダンス

4.2.2の結果から、測定系のインピーダンスが低い周波数は放射エミッションが大きくなる。複数ポートを持つ場合も同様で、各ポートで発生するEUT内部のノイズレベルやEUT内のインピーダンスが同一レベルであるとき、複数ポートのうち最も低いインピーダンス特性をもつ周波数が放射エミッション結果にもピークとなって現れる。

たとえば、3ポートの合成インピーダンス Z_{ALL} は、単体の各ポートのインピーダンス Z_1, Z_2, Z_3 を使って以下の式で表すことができる。ただし、計算の簡易化のため、インピーダンスの絶対値のみを考慮する。

$$\frac{1}{Z_{ALL}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \quad (1)$$

式(1)より、実際に測定した終端のインピーダンス特性を Z_1, Z_2, Z_3 に代入すると、その3ポートの合成インピーダンス Z_{ALL} は以下の図14のグラフの結果になった。

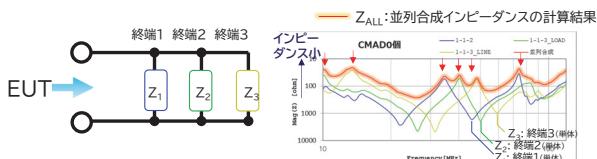


図14 3ポートの合成インピーダンス

図14より、各終端条件のインピーダンスの低い周波数が、全体のインピーダンスにも現れていることが分かった。この周波数は、放射エミッションでピークとなって現れると推測できる。

CMADを挿入すると、4.2.1で確認したCMADの効果によって、最も低いインピーダンス特性をもつ周波数の影響を抑えることができるが、CMADを挿入しないポートについてはこの影響を抑えることができない。

図15に、式(1)の Z_1, Z_2 にCMADを挿入した実測の終端のインピーダンス特性を、 Z_3 にCMADがない実測の終端

のインピーダンス特性を代入し、その3ポートの合成インピーダンス Z_{ALL} を計算した結果を示す。

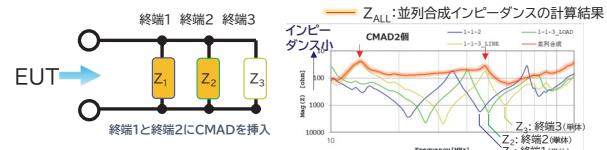


図15 2ポートにCMADがある合成インピーダンス

図15から、全体の合成インピーダンスの低い周波数は、CMADを挿入していない Z_3 の影響が支配的であることが分かった。

のことから、CMADをすべてのポートに使用しないと、終端違いによる全体のインピーダンスの変化を抑えることができず、放射エミッションの測定結果の再現性がとれないといえる。

4.3 対策方法

測定系の終端条件の違いによる放射エミッションの差異を防ぐには、CMADをすべてのポートに入れることで対処できるが、規格要求は3箇所までである。そのため、CMADを挿入しない3箇所以外のポートの終端のインピーダンス特性が放射エミッションのピークとなって表れてしまう。

評価結果の再現性を取るためにには、特にCMADを挿入しないポートの再現性が必要であり、サイト外も含めた周辺機器や設備を統一し、設置方法や配線を同一にすることが対策方法になる。

5. おわりに

本稿では、EMC専門委員会パワーエレクトロニクス EMC規格対応WG活動での実機検証結果をもとに、パワーエレ機器のEMI測定における問題点と対処法について述べた。規格要求や原則に従うことが第一であるが、同時に規格要求で明記されていない測定設備のインピーダンスによる悪影響に注意しなければならない。

パワーエレ機器の多様化や電磁ノイズに関する環境の複雑化により、EMC規格の標準化は進行中である。本稿で取り上げた問題点だけでなく、今後も様々な問題が生じ

ることが予想される。

引き続きWG活動を通じて、規格動向を収集し不明点や問題点の検証を行い、規格に対する問題提起や改善提案に繋がるよう、有意義な検証を継続していきたい。

参考文献

- [1] 経済産業省、第6次エネルギー基本計画、pp.4、2021年。
- [2] 内閣府、2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、4.重要分野における「実行計画」(5)自動車・蓄電池産業、2021年。
- [3] CSIPR 11、「工業・科学及び医療用装置からの妨害波の許容値及び測定法」、2019年。
- [4] 山村英穂、「改訂新版 定本 トロイダル・コア活用百科」、1.2 インダクタとコア、CQ出版社、2010年。



藤田 浩志(ふじた こうじ)

2011年 オムロン株式会社入社

2011年～2017年

社内EMCサイト運営や、パワエレ商品の開発
とEMC設計業務に従事。

現在 EMCシミュレーションを軸として設計現場の
開発力革新を推進。

また、2018年よりKEC EMC専門委員会 パワーエレクトロニクスEMC規格対応WGに参加し、現在に至る。