

論文

伝導妨害波対策部品のノイズ抑制量算出手法の検討

大橋 弘幸^{*1)} 渡部 雄太^{*1)} 大森 学^{*1)}

Verification of noise suppressing performance calculation technique for conduction interference suppression parts

Hiroyuki Ohashi^{*1)}, Yuta Watanabe^{*1)}, Manabu Omori^{*1)}

This study proposes an equivalent circuit for an Equipment Under Test (EUT) for conduction interference noise suppression. This report shows the procedure for derivation of equivalent circuit impedance and noise source voltage from the measured impedance between the power supply terminals and conduction interference waves. Applying this procedure, the comparison of calculation and measurement is shown on the conduction interference waves of an EUT implemented with noise suppression parts.

キーワード：EMI，伝導妨害波，ノイズ対策

Keywords：EMI, Conduction interference, Noise suppression

1. はじめに

EMC 試験では，不要輻射測定の一つとして，製品の電源端子から漏れる 150 kHz から 30 MHz の伝導妨害波（以下，ノイズ）の測定を行い，規制値以下であることを確認する試験項目がある⁽¹⁾。この測定方法は，基準金属面上に EUT（供試装置）を配置し，LISN（疑似電源回路網）と呼ばれるインピーダンス整合回路を介して EUT に AC 電源を供給し，EUT から発生するノイズを EMI レシーバで測定する。図 1 に伝導妨害波の測定方法を示す。

ノイズの大きさが規定値を超えた場合は，ノイズ対策部品を追加して，ノイズの低減を図るが，その際に対策を難しくさせるいくつかの問題がある。例えば，電気製品のノイズの発生源となっているスイッチング電源は大抵の場合，電源メーカーから購入したものを使用しており，回路構成などの設計情報がない。加えて，ノイズ対策部品の周波数特性は定量的なデータとして提供されていないため，ノイズ対策部品の追加によるノイズ対策の効果をシミュレートすることが難しく，効率的なノイズ対策につながっていない。また，ノイズにはノーマルモードノイズとコモンモードノイズの二種類の伝搬モードが存在し，個々のノイズ対策部品はそれぞれの伝搬モードにのみ対応して設計されている。しかしながら，国際規格（CISPR11, CISPR22 等）に基づいた測定では，各伝搬モードのノイズの合成波の測定であるため，ノイズ対策部品の選定が測定結果に反映されないのが実情である。

以上のような問題のために 伝導妨害波の対策手順は未だ

確立されていない。ただし，設計段階でのノイズ対策技術は，回路設計ルール化などが行われており，回路基板情報を分析してノイズの原因や有効な対策法を示す DEMITAS などの支援ツールが存在する。一方，試作段階あるいは製品化後に施す後追い対策手法に関する技術報告は少ないが，電波暗室などの EMC 試験現場では後追い対策が主流で，その回数低減や効率化が課題となっている⁽²⁾。

本研究では回路構成がわからない EUT の効率的な後追い対策方法として，EUT にノイズ対策部品を取り付けた場合のノイズの変化を計算するために，製品を汎用的な回路モデルに置き換える新たな手法を検討した。その有効性についてスイッチング電源を例に報告する。

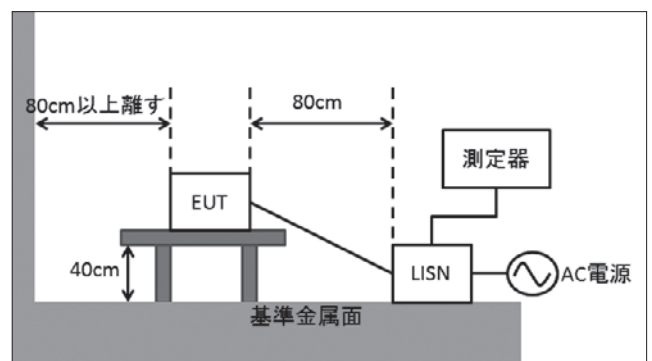


図1. 伝導妨害波測定方法

2. 汎用的な回路モデルとパラメータ決定法

2.1 回路モデルの作成 EUTの電源端子がL(Live)相，N(Neutral)相，PE(Protective Earth)の三端子である場合の回路モデルについて示す。電源端子から見た測定可能なパラメータは，端子間インピーダンスおよびノイズ電圧であ

製品内部における伝導妨害波の伝搬モード変換モデルの検証
平成25年度 基盤研究
^{*1)} 電子・機械グループ

る。端子間インピーダンスとは、電源端子L相、N相、PEの各端子間から見たEUTのインピーダンスのことであり、それぞれ Z_{ln} 、 Z_{lpe} 、 Z_{npe} とする。またノイズ電圧とは電源端子L相-PE間、N相-PE間に発生するEUTからのノイズ電圧のことであり、それぞれ V_l 、 V_n とする。以上の測定可能なパラメータから回路モデルの構成は三つのインピーダンスパラメータと二つの電圧パラメータを含むものであればその値を算出できる。

また、回路モデルにはL相-N相間を伝搬するノーマルモードとL相およびN相とPEの間で伝搬するコモンモードの二種類のノイズの伝搬路が確保されている必要がある。加えて、ノイズは回路上に部品を追加することで伝搬モードが変換することがある。例えば部品の追加によってコモンモードノイズの一部の伝搬路が変わり、ノーマルモードノイズとして伝搬することがある。そのため、伝搬モードの変換を考慮した回路モデルの必要がある。

上述した条件に基づいて作成した回路モデルが図2で、 Δ 結線型回路モデル(図2(a))とY結線型回路モデル(図2(b))であり、それぞれは対策手法により使い分ける。 Δ 結線型回路モデルは電源端子間に対策部品を挿入の場合、Y結線型回路モデルは電源端子に直列に対策部品を挿入する場合に、パラメータ計算が容易になる。そしてどちらの回路モデルにも三つの内部インピーダンス Z_a 、 Z_b 、 Z_c 、および二つのノイズ源 V_{0a} 、 V_{0b} が含まれる。

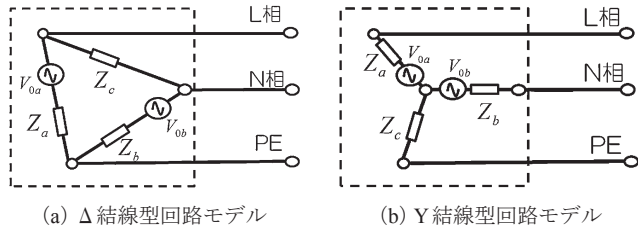


図2. 汎用的な回路モデル

2.2 回路パラメータの算出方法 まず、 Δ 結線型回路モデルのパラメータ算出方法を示す。 Δ 結線型回路モデルの内部インピーダンス Z_a 、 Z_b 、 Z_c は、電源端子間のインピーダンス Z_{ln} 、 Z_{lpe} 、 Z_{npe} の値から、

$$Z_a = \frac{Z_{ln}^2 + Z_{lpe}^2 + Z_{npe}^2 - 2(Z_{ln}Z_{lpe} + Z_{ln}Z_{npe} + Z_{lpe}Z_{npe})}{2(Z_{ln} - Z_{lpe} - Z_{npe})} \dots (1)$$

$$Z_b = \frac{Z_{ln}^2 + Z_{lpe}^2 + Z_{npe}^2 - 2(Z_{ln}Z_{lpe} + Z_{ln}Z_{npe} + Z_{lpe}Z_{npe})}{2(-Z_{ln} + Z_{lpe} - Z_{npe})} \dots (2)$$

$$Z_c = \frac{Z_{ln}^2 + Z_{lpe}^2 + Z_{npe}^2 - 2(Z_{ln}Z_{lpe} + Z_{ln}Z_{npe} + Z_{lpe}Z_{npe})}{2(-Z_{ln} - Z_{lpe} + Z_{npe})} \dots (3)$$

として求める。また、ノイズ測定の結果より、EUTの電源端子のL相-PE間ノイズ電圧 V_l 、N相-PE間ノイズ電圧 V_n がわかっているので、 Δ 結線型の回路モデルのノイズ源 V_{0a} 、 V_{0b} の値は、

$$\begin{bmatrix} V_{0a} \\ V_{0b} \\ V_{0b} - V_{0a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_a + Z_{mesa}}{Z_{mesa}} & -\frac{Z_a}{Z_c} & 0 \\ 0 & \frac{Z_b}{Z_c} & \frac{Z_b + Z_{mesb}}{Z_{mesb}} \\ -\frac{Z_a}{Z_{mesa}} & \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{Z_c} & \frac{Z_b}{Z_{mesb}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_l \\ V_n - V_l \\ V_n \end{bmatrix} \dots (4)$$

式(4)から求まる。ここで Z_{mesa} 、 Z_{mesb} は測定器の入力インピーダンス 50Ω である。

次にY結線型回路モデルのパラメータ算出方法を示す。Y結線型回路モデルのインピーダンス Z_a 、 Z_b 、 Z_c は電源端子間のインピーダンス Z_{ln} 、 Z_{lpe} 、 Z_{npe} の値から、

$$Z_a = \frac{Z_{ln} + Z_{lpe} - Z_{npe}}{2} \dots (5)$$

$$Z_b = \frac{Z_{ln} - Z_{lpe} + Z_{npe}}{2} \dots (6)$$

$$Z_c = \frac{-Z_{ln} + Z_{lpe} + Z_{npe}}{2} \dots (7)$$

として求める。また回路モデルのノイズ源 V_{0a} 、 V_{0b} の値は、

$$\begin{bmatrix} V_{0a} \\ V_{0b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_a + Z_c + Z_{mesa}}{Z_{mesa}} & \frac{Z_c}{Z_{mesb}} \\ \frac{Z_c}{Z_{mesa}} & \frac{Z_b + Z_c + Z_{mesb}}{Z_{mesb}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_l \\ V_n \end{bmatrix} \dots (8)$$

式(8)から求まる。

3. ノイズ対策による伝導妨害波の変化値の計算

作成した回路モデルの電源端子にノイズ対策部品を取り付けた後にEMIレシーバの入力インピーダンスに発生するノイズ電圧を V_l' 、 V_n' とし、ノイズの変化値の計算方法について、XコンデンサおよびYコンデンサを取り付けた場合を例に述べる。

まずXコンデンサによる対策を施した場合のノイズの計算方法について述べる。XコンデンサとはコンデンサをL相-N相間に取り付ける対策手法であり、ノーマルモードノイズに対して抑制効果がある。Xコンデンサのインピーダンスを Z_{XC} とし、 Δ 結線型回路モデルに取り付けると Z_c に対して並列に Z_{XC} を取り付けることになるため、式4における Z_c を $Z_c // Z_{XC}$ と表すことができる。そしてXコンデンサ取り付け後に発生するノイズ電圧 V_l' 、 V_n' は式(4)のインピーダンス行列の逆行列を用いて、

$$\begin{bmatrix} V_l' \\ V_n' - V_l' \\ V_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_a + Z_{mesa}}{Z_{mesa}} & -\frac{Z_a}{Z_c // Z_{XC}} & 0 \\ 0 & \frac{Z_b}{Z_c // Z_{XC}} & \frac{Z_b + Z_{mesb}}{Z_{mesb}} \\ -\frac{Z_a}{Z_{mesa}} & \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{Z_c // Z_{XC}} & \frac{Z_b}{Z_{mesb}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{0a} \\ V_{0b} \\ V_{0b} - V_{0a} \end{bmatrix} \dots (9)$$

式(9)から求まる。

次にYコンデンサによる対策を施した場合のノイズの計算方法を示す。YとはコンデンサをL相-PE間およびN相-PE間に取り付ける対策手法であり、コモンモードノイズに対して抑制効果がある。Yコンデンサのインピーダンス

を Z_{YC} とし, Δ 結線型回路モデルに取り付けると Z_a および Z_b に対して並列に Z_{YC} を取り付けることになるため, 式(4)における Z_a を $Z_a // Z_{YC}$, Z_b を $Z_b // Z_{YC}$ と表すことができる。そしてYコンデンサ取り付け後に発生するノイズ電圧 V_i' , V_n' は式(4)のインピーダンス行列の逆行列を用いて,

$$\begin{bmatrix} V_i' \\ V_n' - V_i' \\ V_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_a + Z_{mesa} // Z_{YC}}{Z_{mesa} // Z_{YC}} & -\frac{Z_a}{Z_c} & 0 \\ 0 & \frac{Z_b}{Z_c} & \frac{Z_b + Z_{mesb} // Z_{YC}}{Z_{mesb} // Z_{YC}} \\ -\frac{Z_a}{Z_{mesa} // Z_{YC}} & \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{Z_c} & \frac{Z_b}{Z_{mesb} // Z_{YC}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{0a} \\ V_{0b} \\ V_{0a} - V_{0b} \end{bmatrix} \dots (10)$$

式(10)から求まる。

4. スイッチング電源による実験例

4.1 コンデンサによる対策 回路構成の不明なスイッチング電源をEUTとし, 内部回路を作成した回路モデル(電源端子間にコンデンサを取り付けるため Δ 結線型回路モデル)に置き換え, ノイズ対策後のノイズの変化を計算した。回路モデルのパラメータ算出に必要な端子間インピーダンスはEUTを非動作状態にしてネットワークアナライザにより150 kHz~30 MHzの周波数特性を測定により得た。またノイズ対策部品のインピーダンスについてもインピーダンスアナライザにより周波数特性を測定し, 計算に用いた。以下に計算結果と実測結果を示す。

Xコンデンサによる対策をEUTに施したときのノイズのグラフの計算結果と実測結果を図3に示す。計算結果を示す図3(a)において, 未対策(凡例none)のノイズのレベルと比較して, Xコンデンサによるノイズ対策を施したときのノイズのレベルはほとんど変化していないことがわかった。またXコンデンサの容量を変化させてもノイズを抑制する効果がほとんどなかった。実測結果(図3(b))につい

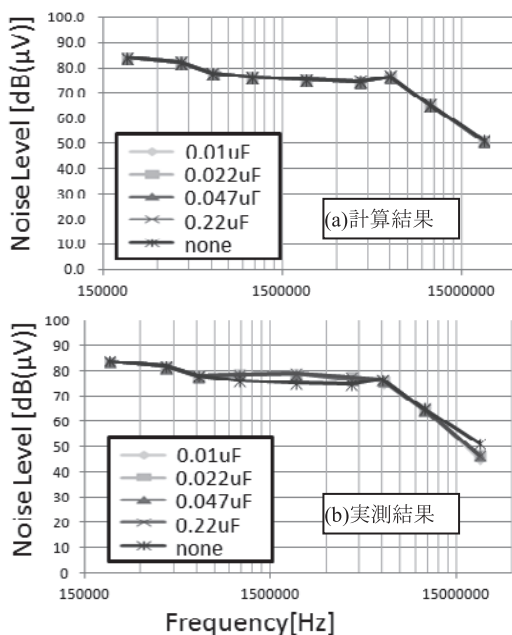


図3. Xコンデンサによる対策結果

ても計算結果と同じ傾向を示しており, 計算結果, 実測結果ともにこのEUTに対してXコンデンサではノイズ抑制効果がないことを示した。

次にYコンデンサによる対策を施したときのノイズのグラフの計算結果と実測結果を図4に示す。計算結果を示す図4(a)において, 未対策(凡例none)のノイズのレベルと比較して, Yコンデンサによるノイズ対策を施したときのノイズのレベルが抑制されていることがわかった。またYコンデンサの容量を変化に伴ってノイズのレベルが変化していることもわかった。実測結果(図4(b))についても計算結果と同じ傾向を示しており, 計算結果, 実測結果ともにこのEUTに対してはYコンデンサが有効な対策であることを示した。

Xコンデンサはノーマルモードノイズに対してのみ有効な対策手法であるが, EUTのノイズの支配的な成分がコモンモードノイズである場合にはこのノイズ対策は効果的ではない。Yコンデンサはコモンモードノイズに対して有効な対策手法であるので, Xコンデンサの対策結果と合わせて考えるとこのEUTの支配的なノイズ成分はコモンモードノイズであることが計算結果のみで判断できる。従来手法で有効なノイズ対策を判断するためにはEUTに実際にノイズ対策部品を取り付けた後の実測結果でしか得られなかったが, 提案手法により計算上で有効なノイズ対策かどうかの判断ができた。

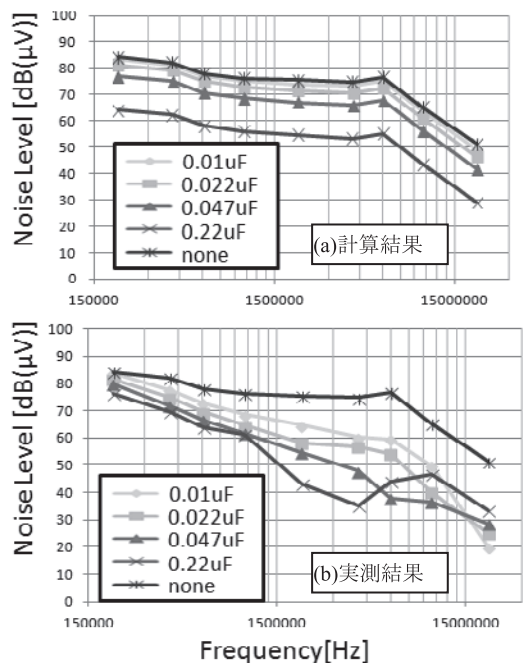


図4. Yコンデンサによる対策結果

4.2 伝搬モードの変換現象の確認 XコンデンサやYコンデンサによる対策ではノーマルモードノイズかコモンモードノイズのいずれかに対して抑制効果があるが, 不適切なノイズ対策によって一方の伝搬モードのノイズが増加してしまうことがある。これは伝搬モードが変換するため

である。例えば電源端子のL相-PE間にもみコンデンサを取り付けるとコモンモードノイズの一部の伝搬モードが変換することによって、ノーマルモードノイズが増加する。作成した回路モデルはこの伝搬モードの変換現象を再現できるかスイッチング電源をEUTとし、EUTの電源端子のL相-PE間にもみコンデンサを取り付けてノイズの変化値を計算した。以下に計算結果と実測結果を示す。

図5に部品追加前後を比較したノーマルモードノイズのグラフを示す。計算結果を示す図5(a)において、追加部品なし(凡例none)のノイズのレベルと比較して、コンデンサ追加後のノーマルモードノイズのレベルは増加した。実測結果(図5(b))についても計算結果と同じ傾向を示した。

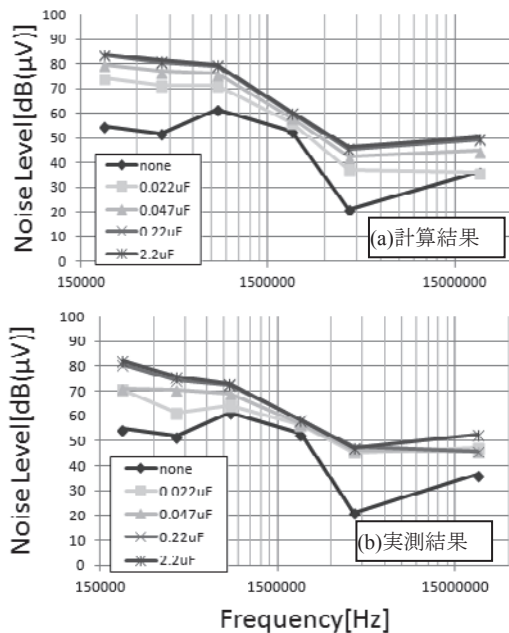


図5. ノーマルモードノイズ

図6に部品追加前後を比較したコモンモードノイズのグラフを示す。計算結果を示す図6(a)において、追加部品なし(凡例none)のノイズのレベルと比較して、コンデンサ追加後のコモンモードノイズのレベルは若干減少していた。実測結果(図6(b))についても計算結果と同じ傾向を示した。

これらの結果から不適切な部品追加によるコモンモードノイズからノーマルモードノイズへの伝搬モードの変換を計算によって確かめることができた。これにより、例えば自作のノイズフィルタ回路をEUTに取り付けしたときに不適切な設計の回路だったとしても計算上で伝搬モードの変換によるノイズ増加を確認し、適切なフィルタ回路への修正がノイズの実測をせずに可能となる。

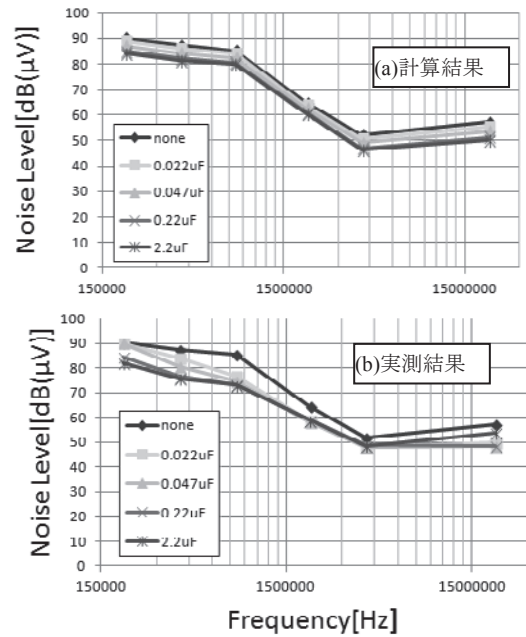


図6. コモンモードノイズ

5. まとめ

回路構成がわからないEUTに対してノイズ対策部品を取り付けた場合のノイズの変化を計算するために、製品を汎用的な回路モデルに置き換える手法について、検討した結果をスイッチング電源を例に報告した。有効なノイズ対策手法の判別や不適切なフィルタ回路の判別など、従来手法ではノイズ対策の有効性を見極めるために部品追加後のEUTのノイズの実測結果からしか判断できなかったが、提案手法は計算によって有効性の判断ができるため、効率的な後追いのノイズ対策が期待できる。

(平成27年7月14日受付, 平成27年8月10日再受付)

文 献

- (1) TDK株式会社:「TDK EMC TECHNOLOGY EMC設計ガイドブック」, pp.110-111(2010)
- (2) 長田 久:「ノイズ対策の基礎 第4回」, 『THE HOTLINE』, Vol.30, p.31(1999)