

新しい渦電流等価回路法

- Cauer Ladder Network 等価回路法 -

1. 目的と有用性

従来、渦電流解析は電磁界解析（FEA）を用いてステップ計算されることが主流で、導体をメッシュで表現することで高い精度の結果を得ることができました。近年、渦電流場をラダー回路（はしご回路）の等価回路で表現でき、表皮効果も含めて高精度な結果を得ることがわかりました。当社では、これらの特徴を併せ持つ、新しい渦電流等価回路法（Cauer Ladder Network 法、CLN 等価回路法）を開発したので紹介します。導体形状はメッシュで表現しますが、従来の FEA とは異なり静磁界、静電界解析を交互に行うことでラダー回路の抵抗とインダクタンスを決定することができ、ラダー回路を電気回路や制御回路と連成解析することで表皮効果や近接効果を含めた渦電流場を解くことができます。

- (1) 導体の近接効果、表皮効果を考慮したコイル特性を表現する周波数依存性を含む等価回路を従来の有限要素解析より圧倒的に少ない計算時間で求められます。
- (2) 渦電流場をラダー回路で表現することで、周波数領域シミュレーションだけでなく、時間領域シミュレーションも可能です。

CLN 等価回路法の適用機器として、数百～数千本からなるより線コイルへの適用を進めています。ワイヤレス給電システムやパワエレで使用されるインダクタをターゲットとしています。

2. CLN 等価回路法の概要

CLN 等価回路法は、モデル縮約法 (Model Order Reduction) の一種で、モード合成法によく似た既定関数の直交化を基にした新手法です。図 1 に示すような電源が接続された渦電流場のインピーダンスは、抵抗 R とインダクタンス L の連分数で表すことができます。連分数は良く知られているように次に示す R と L のラダー回路で表現することができます。

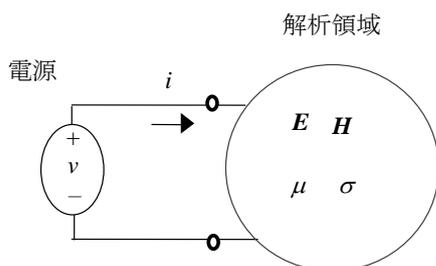


図 1 CLN 等価回路法で解ける渦電流場

$$Z(s) = \frac{v(s)}{i(s)} = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots} = R_0 + \frac{1}{\frac{1}{L_1s} + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{\frac{1}{L_3s} + \dots}}}$$

ラダー回路のインピーダンスが渦電流解析領域の特性を表している、すなわち集中定数化できるということになります。

渦電流場の導体の形状が単純であれば、解析的に集中定数を求めることもできますが、より汎用的な方法として導体をメッシュで作成し、FEA で求めることができるというのが本手法の新しい利点です。ラダー回路の定数を決定する方法を説明します（以下、事前解析と称す）。図 2 に示す二導体に往復電流が流れるとします。以下に、CLN 等価回路法による計算手順を示します。

- ① 直流電流解析（静電界解析）により R_0 を算出
- ② ①の電流による静磁界解析により L_1 を算出
- ③ ②の磁界の誘起電圧による電流解析により R_2 を算出
- ④ ③の電流による静磁界解析により L_3 を算出
- ⑤ ④の磁界の誘起電圧による電流解析により R_4 を算出
-

このように、順次静磁界解析と静電界解析を行うことで、メッシュで表現された渦電流場をラダー回路で表現することができます。静電界解析結果の電気エネルギーより R_{2n} を、静磁界解析結果の磁気エネルギーより L_{2n+1} を算出することができます。本解析として、求めたラダー回路に適切な電源を接続することで、周波数領域解析だけでなく過渡解析も回路計算として高速に行うことができるというのが特徴です。

FEA により静電界解析、静磁界解析を行う必要がありますが、ラダー回路の段数分行えばよく、従来の FEA 回路連

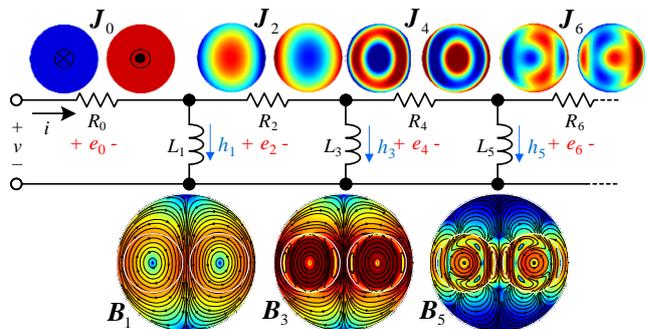


図 2 CLN 等価回路法によるラダー回路定数算出

成解析よりも少ない計算コストで同じ計算精度を出すことができます。

さらにラダー回路により解かれた抵抗とインダクタンス素子の電流、電圧を用いてメッシュ上の磁束密度分布、渦電流密度分布を再構成し、コンター図やベクトル図を表示することができます。

3. 解析事例

CLN 等価回路法による解析例として、DC-DC コンバータの過渡応答解析事例と、0.1mm 素線から構成されるマルチターンコイルの交流抵抗解析事例を示します。

3.1 DC-DC コンバータの過渡応答解析

図3(a)に示す DC-DC コンバータを CLN 等価回路法でラダー回路集中定数化し、(b)に示す DC-DC コンバータ回路と連成解析しています。図3(c)に過渡応答解析結果として電流波形を示します。コアは非線形材料として扱っているため、幾つか結果を重ねて示しておりますが、微分透磁率を用いた結果が FEA 結果と非常によく一致していることがわかります。計算時間は FEA 回路連成解析に比べ CLN

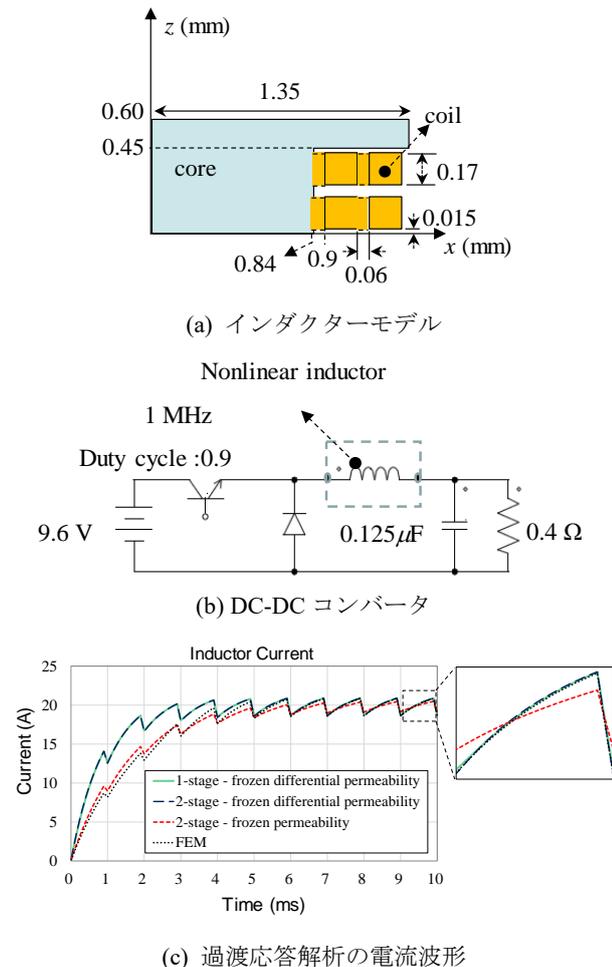


図3 DC-DC コンバータ回路連成解析

等価回路法では事前解析も含めて 1/100 となっています。

3.2 マルチターンコイルの交流抵抗解析

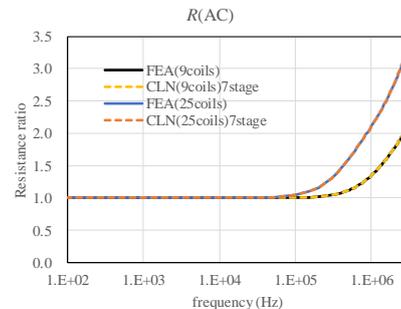
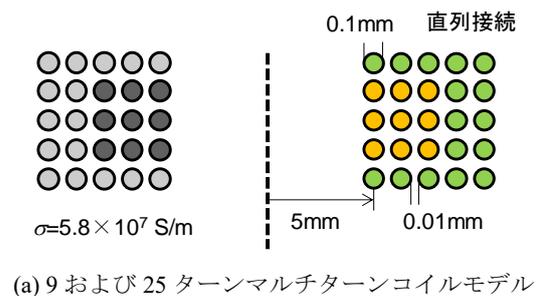
図4(a)に示す9および25本の0.1mm素線で構成された空芯コイルの交流抵抗を求めます。従来、抵抗の周波数依存性を求めるにはAC解析を求めたい周波数ケース分解析する必要がありますが、CLN 等価回路法ではラダー回路定数を事前解析により求めてしまえば、周波数ケース分は高速な回路計算を実行するのみで済ませることができます。図4(b)に交流抵抗比の周波数依存性を示します。85kHzでの表皮厚さは0.23mmで素線径が0.1mmですので、表皮効果による交流抵抗の増加は小さいはずですが、それよりも低い周波数で交流抵抗が増加しています。これは近接効果によるものと考えられ、9本モデルよりも25本モデルの方が低い周波数から交流抵抗の増加が始まっています。通常ワイヤレス給電システムで用いられているようなコイルは数百~数千本の素線から構成されるため、近接効果による交流抵抗の増加をいかに抑えるかが重要になります。

4. まとめ

新しい渦電流等価回路法である CLN 等価回路法の概要と解析事例を紹介しました。今後は具体的な電気機器への適用を進めていく予定です。

参考文献

A. Kameari, *et al.*, "Cauer Ladder Network Representation of Eddy-Current Fields for Model Order Reduction Using Finite Element Method", IEEE Tran. Magn. DOI: 10.1109 (2017)



(b) 交流抵抗比の周波数依存特性

図4 マルチターンコイルの交流抵抗解析