

CLN等価回路法によるコイル均質化

1. 目的と有用性

非接触給電システムでは高周波領域における表皮効果や近接効果によるコイルAC抵抗の増加を抑えるためにリッツ線が用いられます。しかし、リッツ線のAC抵抗を試作なしで評価するのは難しく、設計段階でコイルの最適化を行うことが困難となっています。

リッツ線の渦電流を考慮した有限要素法解析では、巻線一本一本を表皮厚以下のサイズの要素でメッシュ化する必要がありますが、メッシュ数が膨大となり、実際的な問題の解析は困難でした。そのため、解析的手法や有限要素解析による導体のユニットセル解析による均質化法が提案されています。しかし、解析的手法は単純な形状や配置に限定され、有限要素法に基づく手法は、汎用的ですが、リッツ線のユニットセル解析において3次元解析が必須となり、計算コストが膨大となり、設計に用いられる手段とはなっていません。

ここでは、ユニットセル解析にCLN (Cauer Ladder Network) 等価回路法を用いることで、有限要素法ベースの手法に比べ、はるかに少ない計算コストで、有限要素法ベースの手法と同等の結果を得られることを示します。

2. CLN 等価回路法によるコイル均質化

リッツ線は多数の撚り線から構成されます。線材自身の電流による渦電流は、対象となる周波数領域では、通常、無視できるレベルになりますが、他の線材中の電流による磁場がジュール損失を生じ、その結果AC抵抗を増大させます。この損失は、一般に近接効果と呼ばれます。コイル損失とインピーダンスに対する近接効果は、コイル全体を均質化された複素透磁率を持つ非導電性の材料に置き換えることで、有限要素解析において考慮することができます。均質化法を用いることで、粗なメッシュにより、十分な精度でインピーダンスを求めることができます。

図1に、直列結線された巻線からなるコイルを示します。有限要素法ベースの手法では、ユニットセルに適切な境界条件を与え、多くの周波数に対して、周波数領域の解析(AC解析)を行い、周波数と複素透磁率の関係を求めることができます。一方、ここで提案するCLN等価回路法による方法では、図1に示すように、ユニットセルのCLN等価回路(ラダー回路)を生成し、その等価回路の任意の周波数のインピーダンスより複素透磁率が計算できます。

有限要素法ベースの手法と異なり、CLN等価回路法に基づく方法では、ラダー回路の1段分の抵抗とインダクタンスを求めるのに1回の静磁界解析と静電界解析のみが必要とされます。静解析は、AC解析に比べ、はるかに高速に

解析を行えます。また、通常は、数段の等価回路で広い周波数領域に対して十分な精度を持つ結果を得られます。このため、CLN等価回路法に基づく方法は、(対象とする周波数領域が広い場合は特にですが)有限要素法ベースの手法に比べ非常に効率的な手法となります。

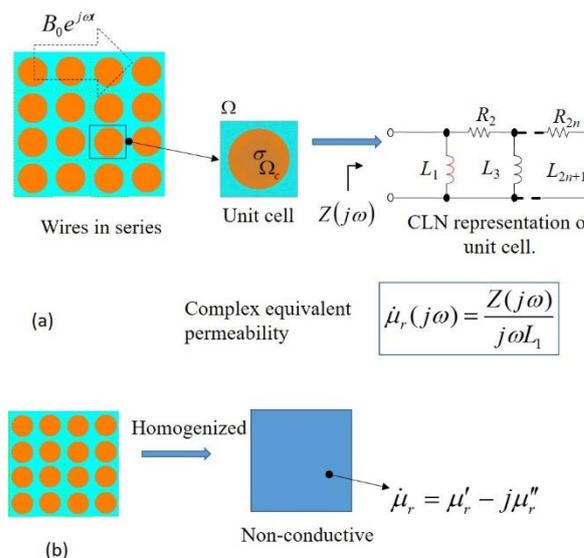


図1 CLN等価回路法によるコイル均質化

3. リッツ線の解析事例

図2に2段撚り(6×6)のリッツ線のユニットセルの導体部を示します。撚り線の場合には、ユニットセル解析は3次元になるため、メッシュ数がしばしば膨大になります。

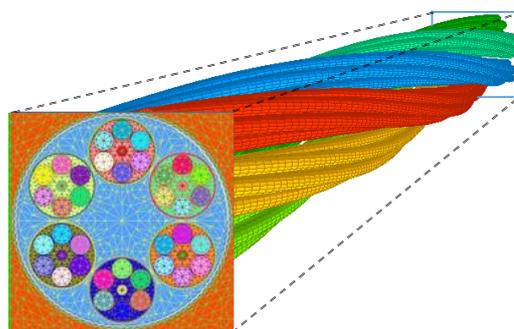


図2 2段撚り(6×6)のリッツ線のユニットセル

3.1 複素透磁率

手法の有効性を示すために、図3に示す3つの異なる巻き方の6×6のリッツ線に対して複素透磁率を計算しました。4段のCLNから求められた複素透磁率(相対値)を図4に示します。

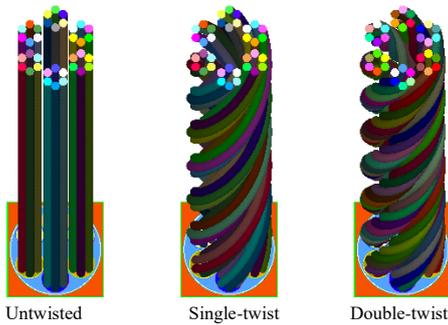
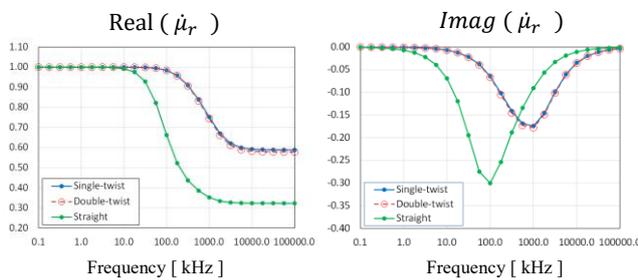


図3 解析に用いたリッツ線



(a)実部 (b)虚部
図4 図3のリッツ線に対する複素透磁率(相対値)

3.2 コイルインピーダンス

前節で得られた複素透磁率を用い、図5に示す6×6のリッツ線25ターンからなるコイルを均質化し、コイルのインピーダンスを求めました。

精度を比較するため、撚らないリッツ線に対しては、細かなメッシュを用いた2次元軸対称モデルによる有限要素法解析によってもインピーダンスを求めました。

図6に結果を示します。予想通り、撚り線(Single-twist、Double-twist)のAC抵抗は、低周波数から中間領域の周波数領域(数百kHzまで)においてストレートな場合(Untwisted)に比べ小さくなっています。また、均質化法により得られたインピーダンスは、有限要素法による2次元軸対称モデルの解析(図6のStraight - FEM fine mesh)の結果と一致することで、その妥当性を確認しています。

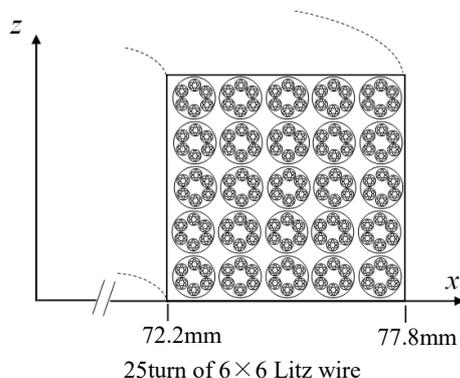
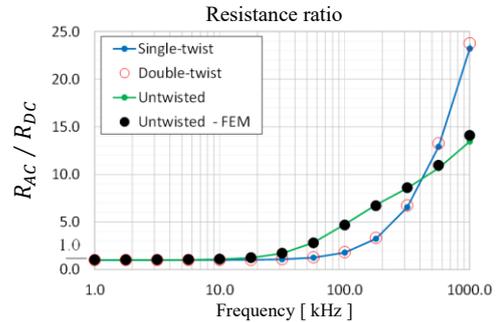
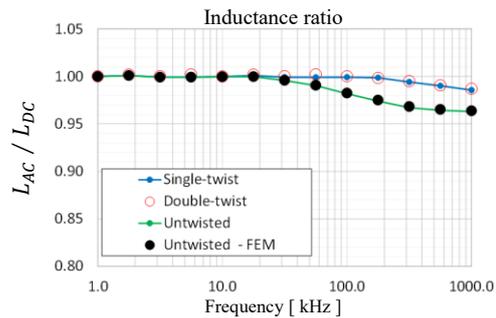


図5 均質化を行ったコイル(リッツ線25ターン)



(a) 抵抗



(b) インダクタンス

図6 均質化コイルのインピーダンスの比較

4. まとめ

本資料ではリッツ線の均質化のための効率的な手法を提案し、その解析事例を紹介しました。本手法は従来の有限要素法ベースの手法に比べ桁以上高速な手法です。

SSILでは本手法により図7に示すような数百の素線からなる3段撚りのリッツ線を均質化することを目指しています。そのような複雑なモデルでは、有限要素法を適用することは、ユニットセル解析においても、おそらく困難になると思われます。しかしCLN等価回路法は静解析のみでよいので、ユニットセル解析では導体間の空気領域のメッシュを必要としない磁場解析法を採用することで、さらに効率的で実用的な手法とする予定です。これによりCLN等価回路法によるコイル均質化は、リッツ線解析の非常に有効かつ実際的な手法となります。

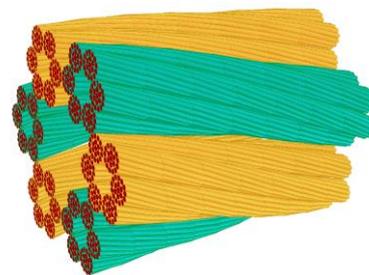


図7 3段撚り(6×6×20)のリッツ線の概念図

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)