ワイヤレス給電の回路設計の基本
2010/7/9

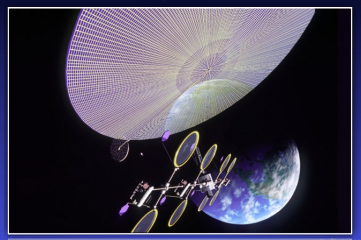
有限会社ソネット技研
石飛
www.sonnetsoftware.co.jp

- 背景
- 理論
- 解析例
- 製品紹介

磁気結合方式

磁気結合方式

電波方式



電波方式

共鳴方式

三方式

磁気結合	共鳴	電波
コイルより短い距離	コイルの数倍の距離	波長よりずっと長い距離

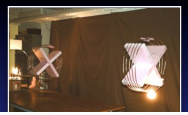
共鳴方式

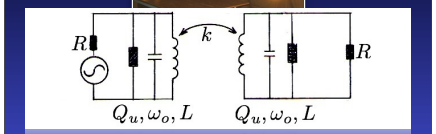
- Marin Soljačić, Andre Kurs, MIT 2007/6/7
- 2.1m離れた60W電球を点灯させた
- 10MHz，直径60cm，導体径6mm，距離2.1m

- ~~背景~~
- 理論
- 解析例
- 製品紹介

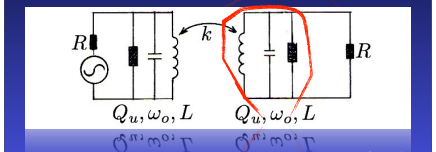
気になる設計パラメータ

- 周波数・波長
- コイル同士の距離・角度・周囲の物体や壁
- コイルの巻き数・巻径・形状・材質・基板・コア
- 負荷と信号源の結合方法・インピーダンス





$$R = \frac{Q_u \cdot \omega_o L}{k_c \cdot Q_u - 1}$$



$$R = \frac{Q_u \cdot \omega_o L}{k_c \cdot Q_u - 1}$$

100%の伝送効率を保つには

結合係数の変化に応じて
Rを刻々と調整する

$$R = \frac{Q_u \cdot \omega_o L}{k_c \cdot Q_u - 1}$$

伝送距離を決めるのはQu

kc=1/Quとなる距離が
限界距離

$$R = \frac{Q_u \cdot \omega_o L}{k_c \cdot Q_u - 1}$$

整合をとること

高Q共振器

- ~~背景~~
- ~~理論~~
- 解析例
- 製品紹介

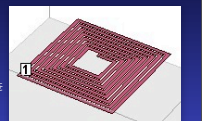
$$R = \frac{Q_u \omega_o L}{kQ_u - 1}$$

設計パラメータ間の関係

負荷や信号源と共振器の結合方法・整合	回路理論 回路シミュレータ SPICE	負荷抵抗 R
共振器の巻き数・巻径・形状・材質・基板・コア	電磁気学 電磁界シミュレータ	共振周波数 ωo インダクタンス L 共振器の Qu
共振器間の距離・角度・周囲の物体や壁	電磁気学 電磁界シミュレータ	結合係数 k

共振周波数とインダクタンス

- 開放構造インダクタ
- 60cm角，L/S=2/1cm，8.5T
- 外側一巻き分のタップ端子
- 負荷抵抗は5GΩ
- 解析
  - 要素サイズ1cm□，周波数分解能900点くらい
  - 解析時間10秒くらい
  - タップから見たインピーダンスの虚数部を観測した
- Im(Z)の極大点10MHz
  - ωo=62.8Mrad/sec
- Im(Z)が直線とみなされる低い周波数で
  - L=Im(Z)/ω=1.82uH

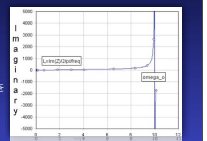


共振周波数とインダクタンス

- 開放構造インダクタ
- 60cm角，L/S=2/1cm，8.5T
- 外側一巻き分のタップ端子
- 負荷抵抗は5GΩ
- 解析
  - 要素サイズ1cm□，周波数分解能900点くらい
  - 解析時間10秒くらい
  - タップから見たインピーダンスの虚数部を観測した
- Im(Z)の極大点10MHz
  - ωo=62.8Mrad/sec
- Im(Z)が直線とみなされる低い周波数で
  - L=Im(Z)/ω=1.82uH

共振周波数とインダクタンス

- 開放構造インダクタ
- 60cm角，L/S=2/1cm，8.5T
- 外側一巻き分のタップ端子
- 負荷抵抗は5GΩ
- 解析
  - 要素サイズ1cm□，周波数分解能900点くらい
  - 解析時間10秒くらい
  - タップから見たインピーダンスの虚数部を観測した
- Im(Z)の極大点10MHz
  - ωo=62.8Mrad/sec
- Im(Z)が直線とみなされる低い周波数で
  - L=Im(Z)/ω=1.82uH



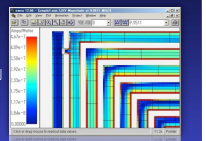
Qu

- 35um純銅
- 解析
  - 要素サイズ1cm□で解析時間3秒くらい
  - 要素サイズ0.25cm□で解析時間74秒(4CPU)
- 共振周波数でのRe(Z)が等価並列抵抗(EPR)
  - 要素サイズ1cm□で143kΩ
  - 要素サイズ0.25cm□で104kΩ
  - Qu=104kΩ/ωoL=909

$$Q_u = \frac{EPR}{\omega_o L}$$

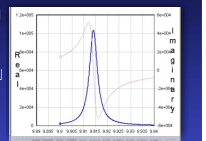
Qu

- 35um純銅
- 解析
  - 要素サイズ1cm□で解析時間3秒くらい
  - 要素サイズ0.25cm□で解析時間74秒(4CPU)
- 共振周波数でのRe(Z)が等価並列抵抗(EPR)
  - 要素サイズ1cm□で143kΩ
  - 要素サイズ0.25cm□で104kΩ
  - Qu=104kΩ/ωoL=909



Qu

- 35um純銅
- 解析
  - 要素サイズ1cm□で解析時間3秒くらい
  - 要素サイズ0.25cm□で解析時間74秒(4CPU)
- 共振周波数でのRe(Z)が等価並列抵抗(EPR)
  - 要素サイズ1cm□で143kΩ
  - 要素サイズ0.25cm□で104kΩ
  - Qu=104kΩ/ωoL=909



設計パラメータ間の関係

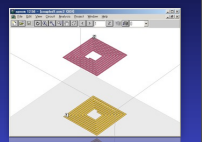
負荷や信号源と共振器の結合方法・整合	回路理論 回路シミュレータ SPICE	負荷抵抗 R
共振器の巻き数・巻径・形状・材質・基板・コア	電磁気学 電磁界シミュレータ	共振周波数 ωo インダクタンス L 共振器の Qu
共振器間の距離・角度・周囲の物体や壁	電磁気学 電磁界シミュレータ	結合係数 k

設計パラメータ間の関係

負荷や信号源と共振器の結合方法・整合	回路理論 回路シミュレータ SPICE	負荷抵抗 R
共振器の巻き数・巻径・形状・材質・基板・コア	電磁気学 電磁界シミュレータ	共振周波数 ωo インダクタンス L 共振器の Qu
共振器間の距離・角度・周囲の物体や壁	電磁気学 電磁界シミュレータ	結合係数 k

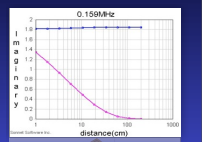
結合係数

- 二つの無損失コイルの間隔を変化させて解析
- 周囲に十分な空間
- 解析
  - 間隔10種類で解析時間38秒
- 低い周波数でIm(Z12)/Im(Z11)が結合係数
  - 2mで k=0.00105



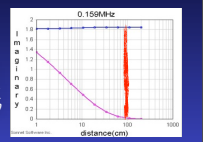
結合係数

- 二つの無損失コイルの間隔を変化させて解析
- 周囲に十分な空間
- 解析
  - 間隔10種類で解析時間38秒
- 低い周波数でIm(Z12)/Im(Z11)が結合係数
  - 2mで k=0.00105



限界距離は？

- 無損失伝送が可能な限界結合係数kc=0.0011
- k=0.0011となる距離は100cm程度
- 2mでk=0.00105なので2mまで無損失伝送するにはQu950以上のインダクタを設計しなければならない



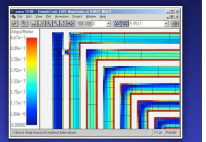
設計パラメータ間の関係

負荷や信号源と共振器の結合方法・整合	回路理論 回路シミュレータ SPICE	負荷抵抗 R
共振器の巻き数・巻径・形状・材質・基板・コア	電磁気学 電磁界シミュレータ	共振周波数 ωo インダクタンス L 共振器の Qu
共振器間の距離・角度・周囲の物体や壁	電磁気学 電磁界シミュレータ	結合係数 k

設計パラメータ間の関係

負荷や信号源と共振器の結合方法・整合	回路理論 回路シミュレータ SPICE	負荷抵抗 R
共振器の巻き数・巻径・形状・材質・基板・コア	電磁気学 電磁界シミュレータ	共振周波数 ωo インダクタンス L 共振器の Qu
共振器間の距離・角度・周囲の物体や壁	電磁気学 電磁界シミュレータ	結合係数 k

- ~~背景~~
- ~~理論~~
- ~~解析例~~
- ~~製品紹介~~



製品紹介

ソネット電磁界シミュレータは

SONNET

24

なぜProfessional版か?

- 伝送距離はQuで決まる
- Quは導体損失で決まる
- 導体損失の解析には電流密度の解析が必要
- 電流密度の解析には多くの解析要素が必要
- 多くの解析要素には多くのメモリが必要
- Professional版はメモリ制限が無い

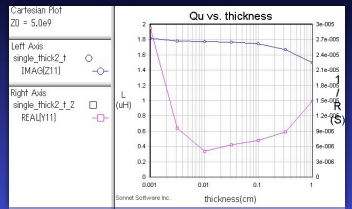
26

なぜProfessional版か?

- 導体損失を下げるには？
- 丸棒を使う
  - 量産に向かない
  - Sonnetで解析できない
- 厚い導体を使う
  - コストが高い
  - Professional版なら解析できる
- 多層導体を使う
  - 量産に向く
  - Professional版なら解析できる

27

導体厚さに最適値がある



28

- ~~背景~~
- ~~理論~~
- ~~解析例~~
- ~~製品紹介~~

29

まとめ

整合を保とう

Quの高い共振器を作ろう

QuのSonnet 350万

30