

単相交流電源と分布定数回路で構成される 回転磁界生成法を利用した交流モータの検討

AC motor using rotating magnetic field consisting of
single-phase AC power supply and LC ladder circuit

©加藤 雅之 (茨城大学)

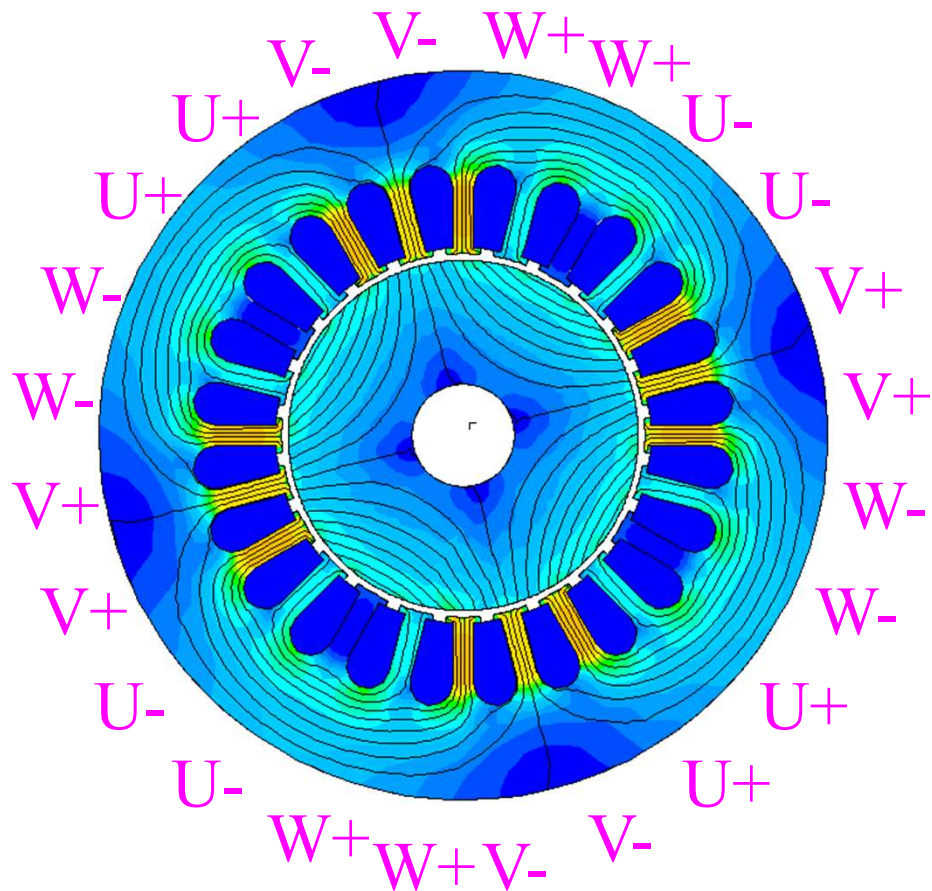


目次

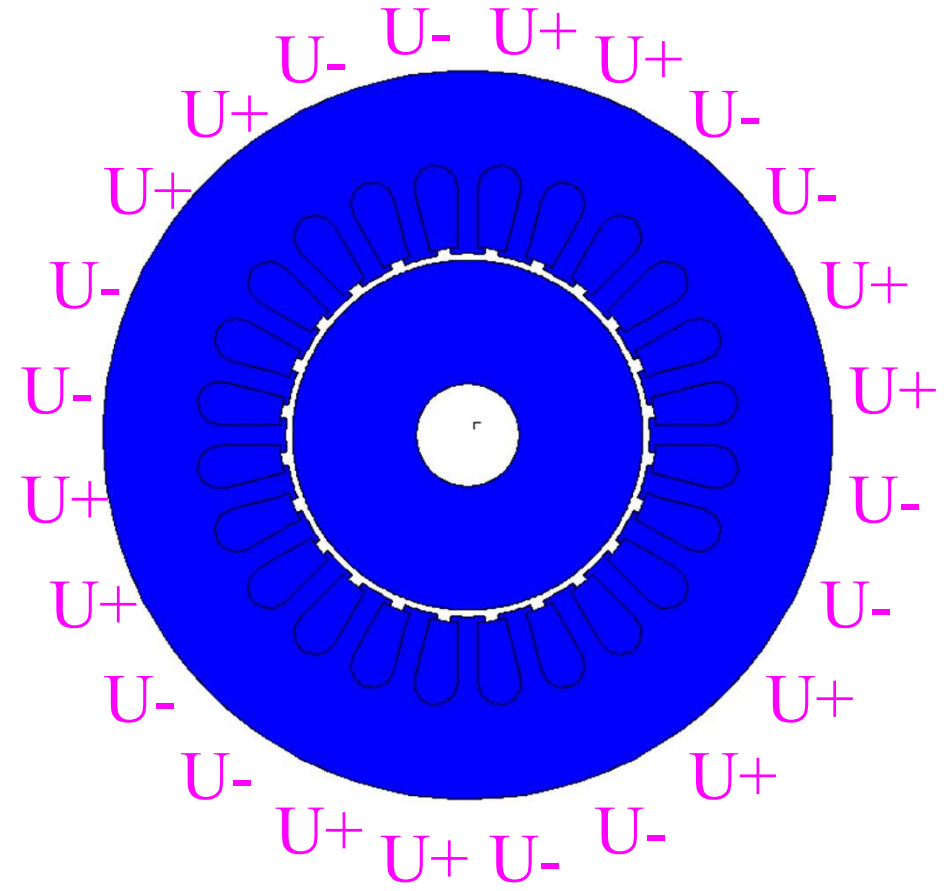
- ・背景・目的
- ・LCラダー回路の数学モデルと電流伝搬特性
 - 回路A(相互誘導による磁気結合)
 - 回路B(結線による回路結合)
 - 回路C(磁気/回路二重結合)
- ・LCラダー回路の磁界解析
 - 環状変圧器モデル
 - 電流伝搬特性
- ・交流モータ化
 - LCラダー回路と単相電源で駆動する交流モータ
 - 電流伝搬特性・トルク特性
- ・まとめ, 今後の展望

三相モータの動作原理(回転磁界)

※磁束密度コンター図



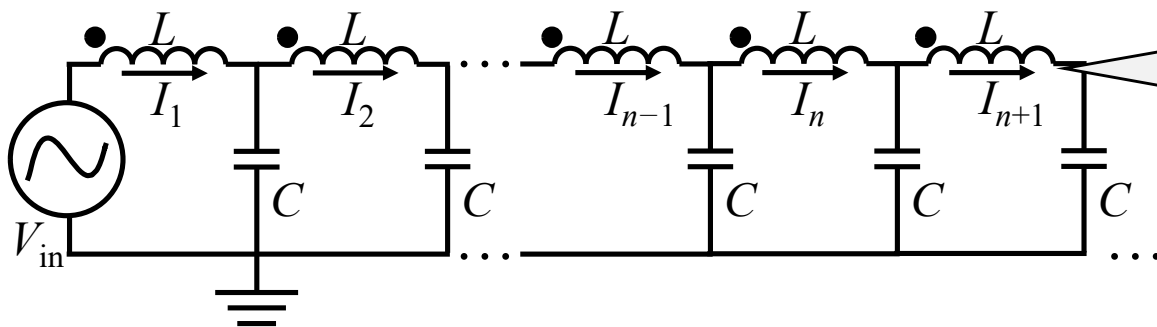
三相交流
⇒4極の回転磁界



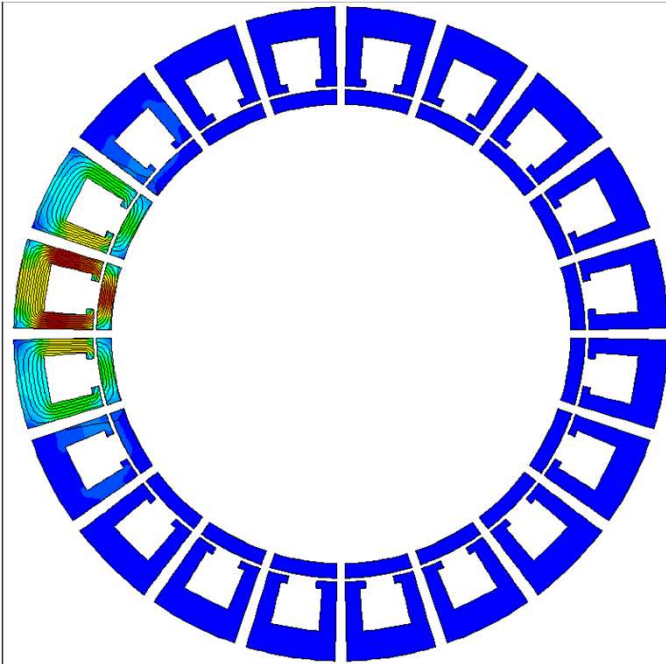
単相交流(時間的位相差消去)
⇒12極の定在磁界

“三相交流の**時間的位相差**”と“磁極の**空間的位相差**”で回転磁界は生成
いずれかの位相差が損なわれると単なる定在した交番磁界
三相交流無しに三相モータは回転しない

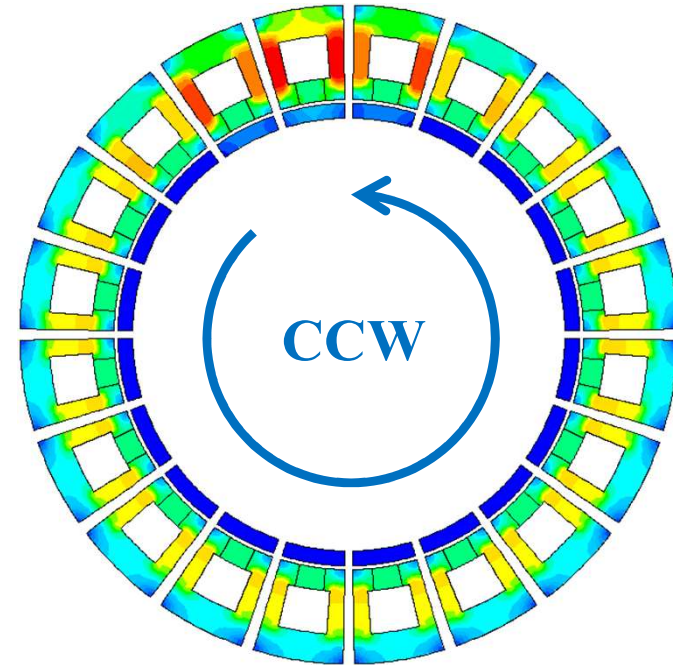
非線形LCラダー回路



磁気飽和を
積極的に利用し
非線形化



局在振動



磁気ソリトン

非線形インダクタ+線形キャパシタをはしごのように結線(一種の**分布定数回路**)

局在振動, ソリトンといった**非線形波動現象**が観測

磁気エネルギーの波が回路内を伝搬⇒**回転磁界**のように振る舞う

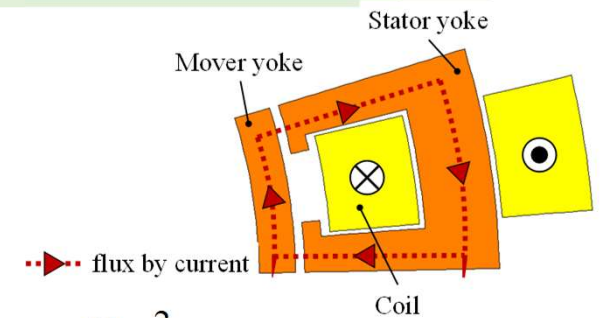
非線形LCラダー回路の課題

①局在振動 (M. Kato, *IEEE Trans. Magn.*, 2020)

インダクタンスの条件
$$I_n = \frac{1}{L_0} \phi_n + \frac{\beta}{L_0 n^3} \phi_n^3$$

LCラダー回路の微分方程式
$$\frac{d^2 \phi_n}{dt^2} = -\frac{\omega_m^2}{4} (2\phi_n - \phi_{n+1} - \phi_{n-1}) - \frac{\beta \omega_m^2}{4n^3} (2\phi_n^3 - \phi_{n+1}^3 - \phi_{n-1}^3)$$

線形項 非線形項

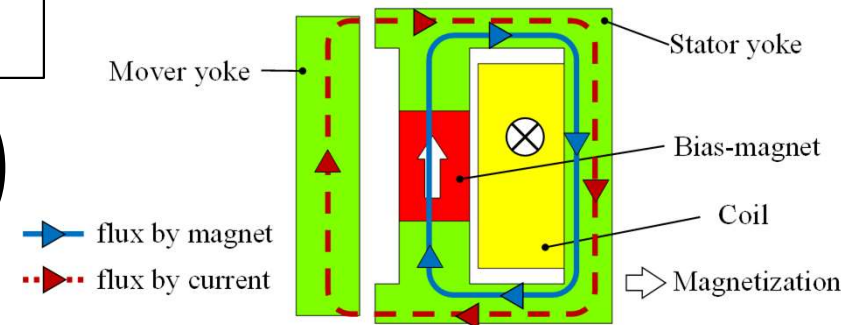


②ソリトン (M. Kato, *IEEE Trans. Magn.*, 2022)

インダクタンスの条件
$$I_n = a \left(1 - e^{-b(\phi_n - \phi_{PM})} \right)$$

LCラダー回路の微分方程式
$$\frac{d^2 \phi_n}{dt^2} = \frac{a}{C} (2e^{-b\phi_n} - e^{-b\phi_{n-1}} - e^{-b\phi_{n+1}})$$

非線形項



系の非線形性を利用するため線形則が適用できない
 解析解が存在しないor導出過程で複雑な数学的処理を伴う
 ⇒線形化し、回路の振る舞いを単純化できないか？

目的 & 方針

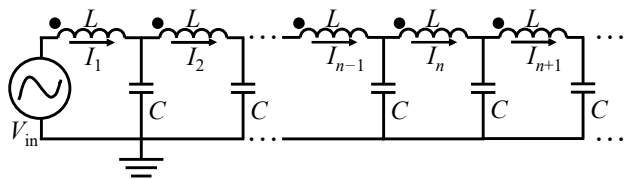
本研究の目的

➤ LCラダー回路上で励起される回転磁界を利用した交流モータ駆動法の開発
方針

➤ 磁気飽和領域を回避することでインダクタを線形化(線形LCラダー回路)
(フェーザ表示のような線形則が利用可能)

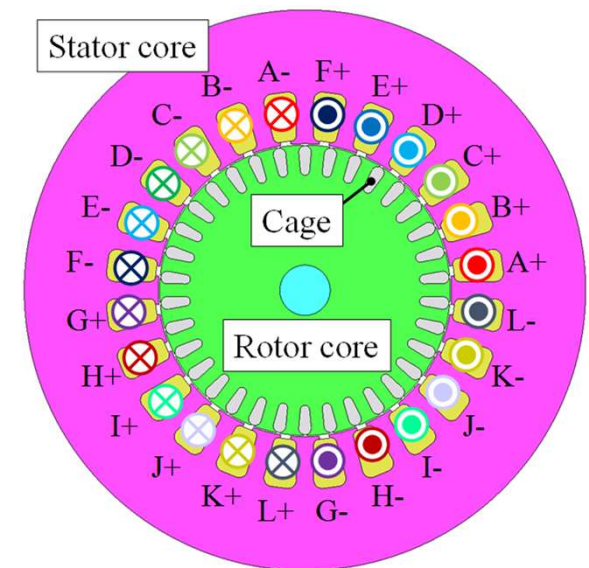
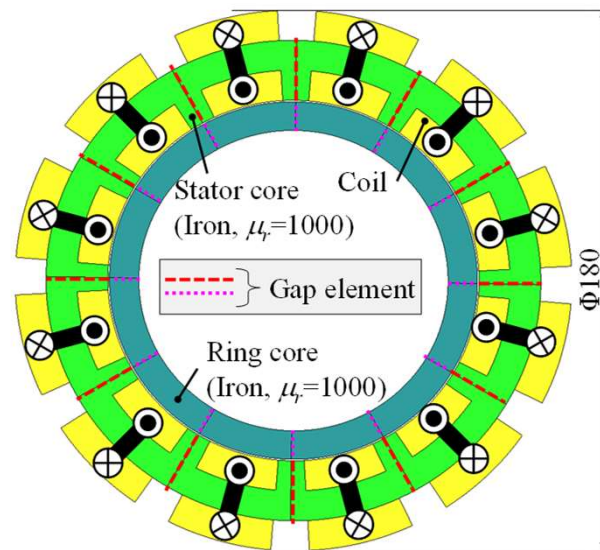
成果要約

➤ LCラダー回路の波動性により, 回路始端の単相電源のみで多相交流を生成
➤ 多相交流により励起された回転磁界を駆動源としトルクを発生可能



$$I_{n+1} - 2I_n + I_{n-1} = LC \frac{d^2 I_n}{dt^2} + RC \frac{dI_n}{dt}$$

$$\gamma_B = \sqrt{-\omega^2 LC + jRC\omega}$$



①理論計算
(波動方程式)

②理想モデル
(環状変圧器)

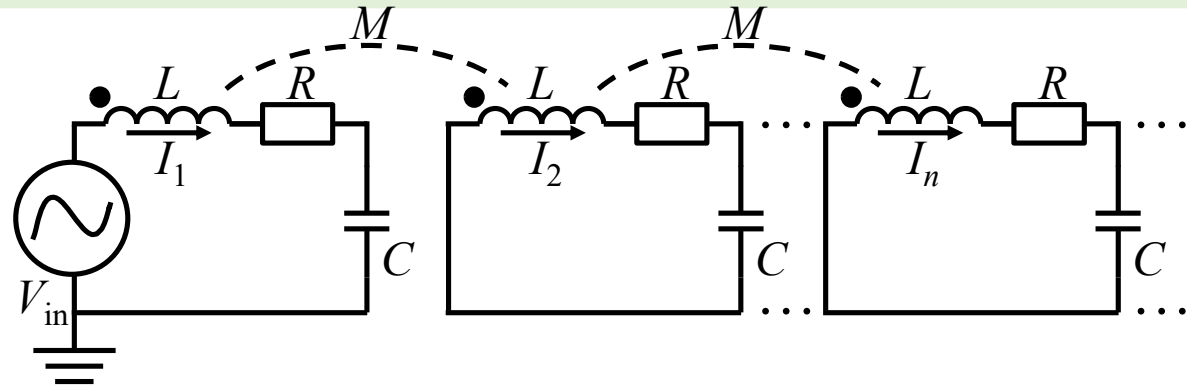
③モータ化
(誘導モータ)

目次

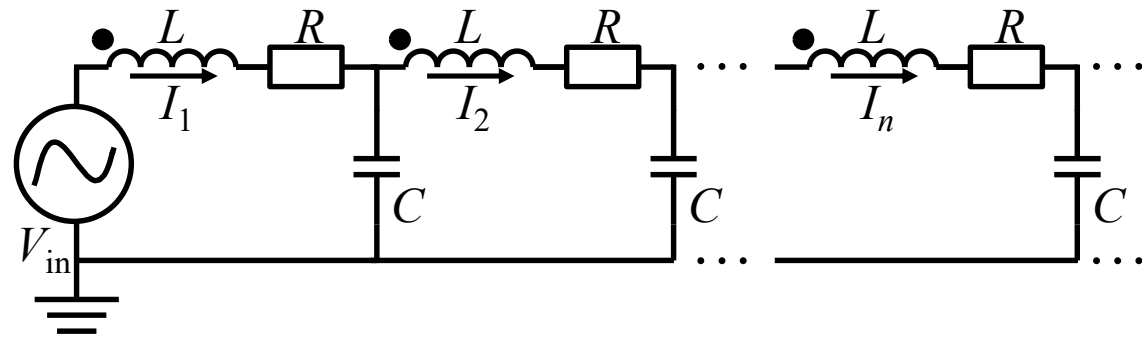
- ・背景・目的
- ・LCラダー回路の数学モデルと電流伝搬特性
 - 回路A(相互誘導による磁気結合)
 - 回路B(結線による回路結合)
 - 回路C(磁気/回路二重結合)
- ・LCラダー回路の磁界解析
 - 環状変圧器モデル
 - 電流伝搬特性
- ・交流モータ化
 - LCラダー回路と単相電源で駆動する交流モータ
 - 電流伝搬特性・トルク特性
- ・まとめ, 今後の展望

LCラダー回路の構成法

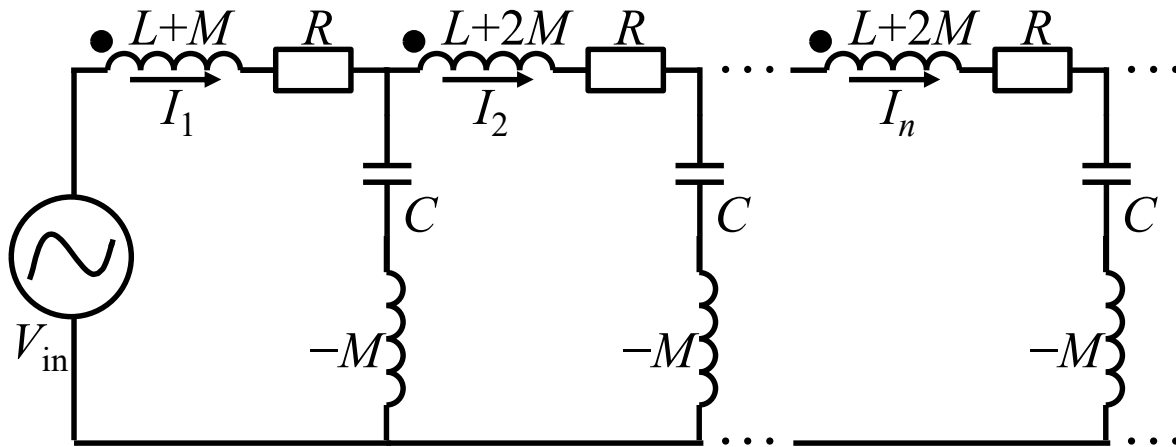
回路A
相互誘導作用による
磁気結合



回路B
結線による
回路結合

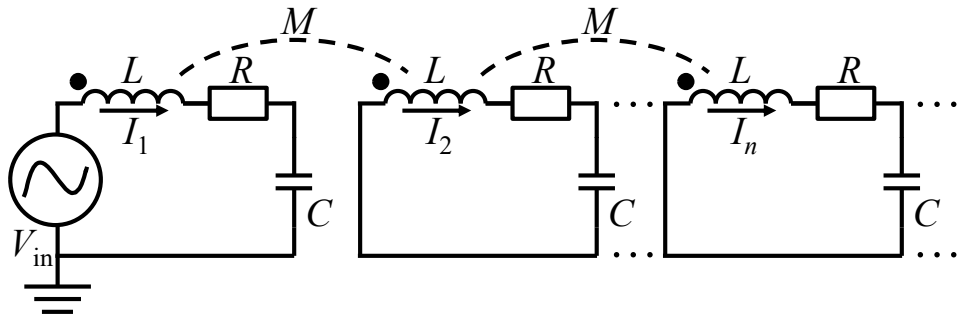


回路C
磁気/回路
二重結合

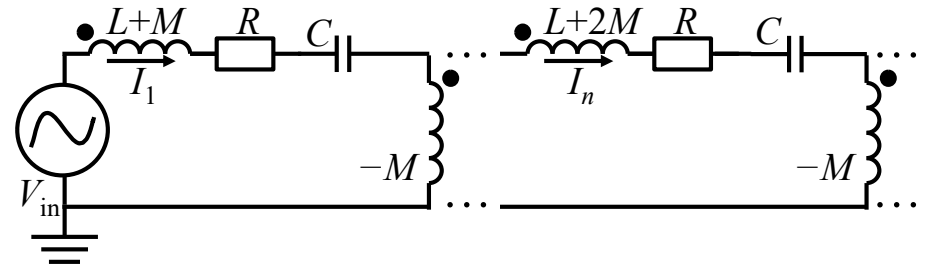


3種の結合方式に対して電流伝搬特性を導出する

回路A(磁気結合)の数学モデル



(a) 元の回路



(b) 等価変換後

n 番目の単位セル
における回路方程式

$$L \frac{d}{dt} I_n + R I_n + \frac{1}{C} \int I_n dt + kL \frac{d}{dt} (I_{n-1} + I_{n+1}) = 0$$

連続変数に対するテイラー展開

$$I_{n\pm 1} = I \pm h \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \dots$$

フェーザ表示(線形則)

$$\frac{d}{dt} s(t) = j\omega S$$

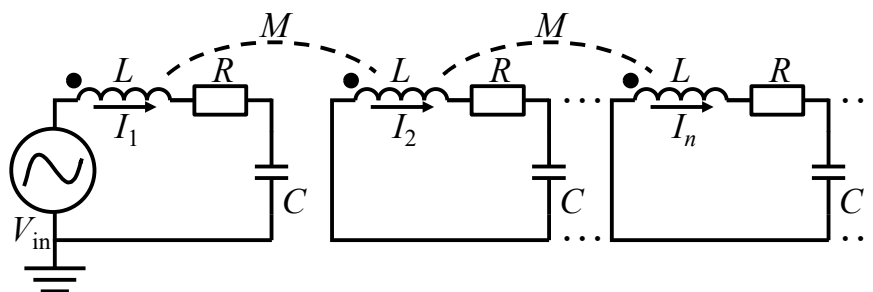
$$\frac{d^2 I}{dx^2} = \frac{\gamma^2}{h^2} I \quad \underline{\gamma_A} = \sqrt{\frac{(1 - (1 + 2k)LC\omega^2) + RC\omega j}{kLC\omega^2}} = \underline{\alpha} + \underline{j\beta}$$

伝搬定数 減衰定数 位相定数

分布定数回路理論における伝搬定数が出現
電流は位置 x (=単位セルの番号 n)に応じて指数的に減衰

3種のLCラダー回路まとめ

回路A
相互誘導による
磁気結合

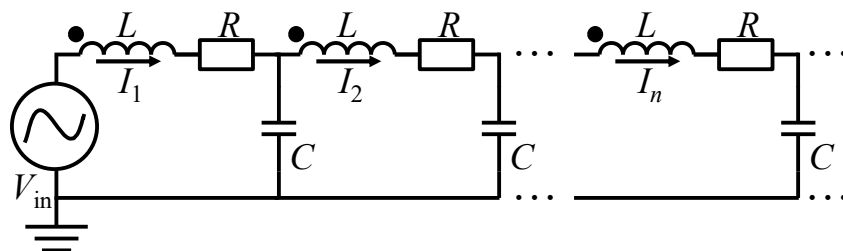


伝搬定数

実部: 減衰定数 虚部: 位相定数

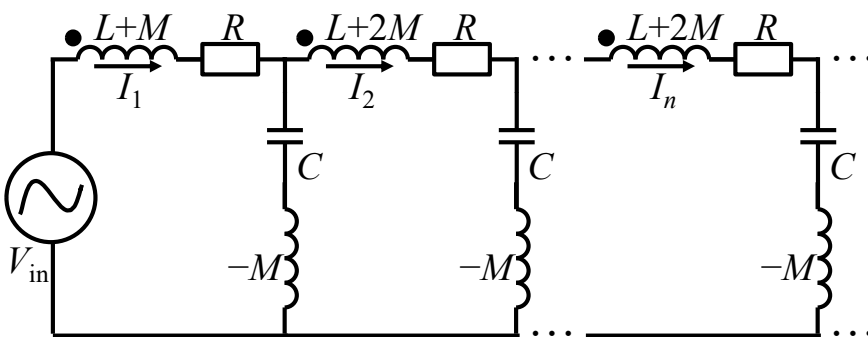
$$\gamma_A = \sqrt{\frac{(1 - (1 + 2k)LC\omega^2) + RC\omega j}{kLC\omega^2}}$$

回路B
結線による
回路結合



$$\gamma_B = \sqrt{-\omega^2 LC + jRC\omega}$$

回路C
磁気/回路
二重結合



$$\gamma_C = \sqrt{\frac{(R + j\omega(1 + 2k)L)j\omega C}{1 + \omega^2 kLC}}$$

波動方程式 $\frac{d^2 I}{dx^2} = \frac{\gamma^2}{h^2} I \implies I_n = I_a e^{(-\gamma n)}$

いずれの回路方式でも波動的な解(電流)が得られる

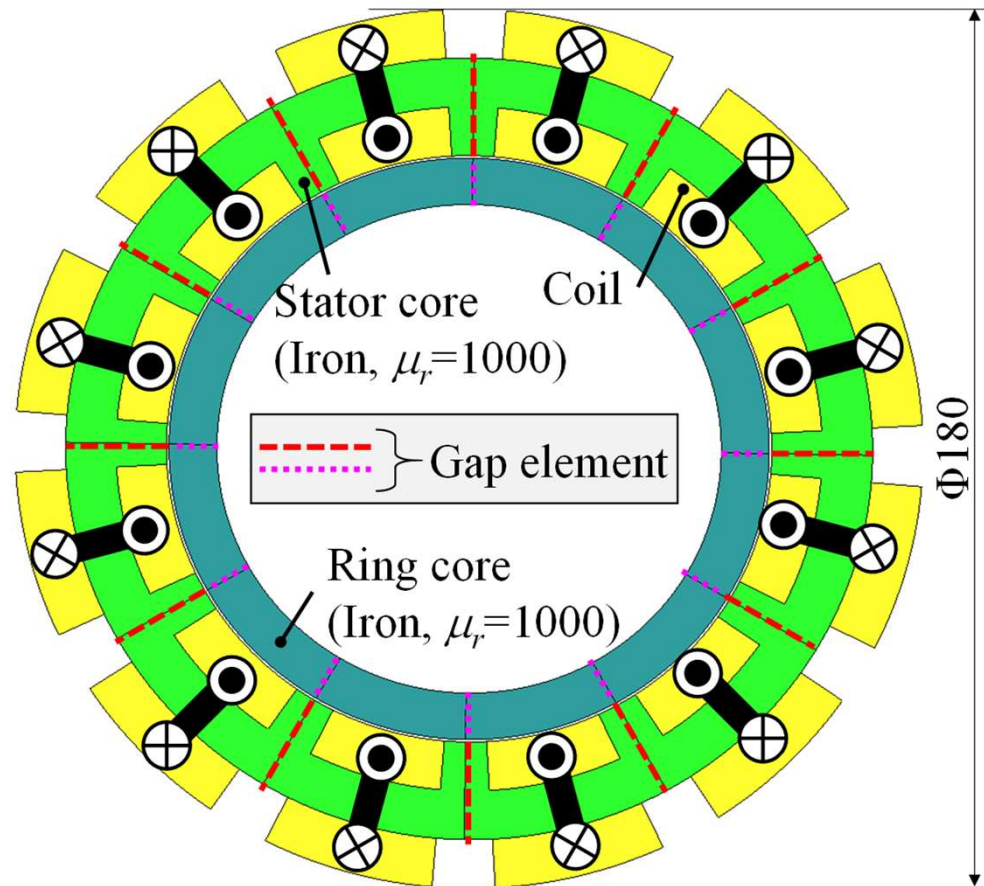
ただし, 減衰定数(電流伝搬時の減衰量)

位相定数(電流伝搬時の位相差)は回路方式により異なる

目次

- ・背景・目的
- ・LCラダー回路の数学モデルと電流伝搬特性
 - 回路A(相互誘導による磁気結合)
 - 回路B(結線による回路結合)
 - 回路C(磁気/回路二重結合)
- ・LCラダー回路の磁界解析
 - 環状変圧器モデル
 - 電流伝搬特性
- ・交流モータ化
 - LCラダー回路と単相電源で駆動する交流モータ
 - 電流伝搬特性・トルク特性
- ・まとめ, 今後の展望

理想モデル(環状変圧器)の磁界解析



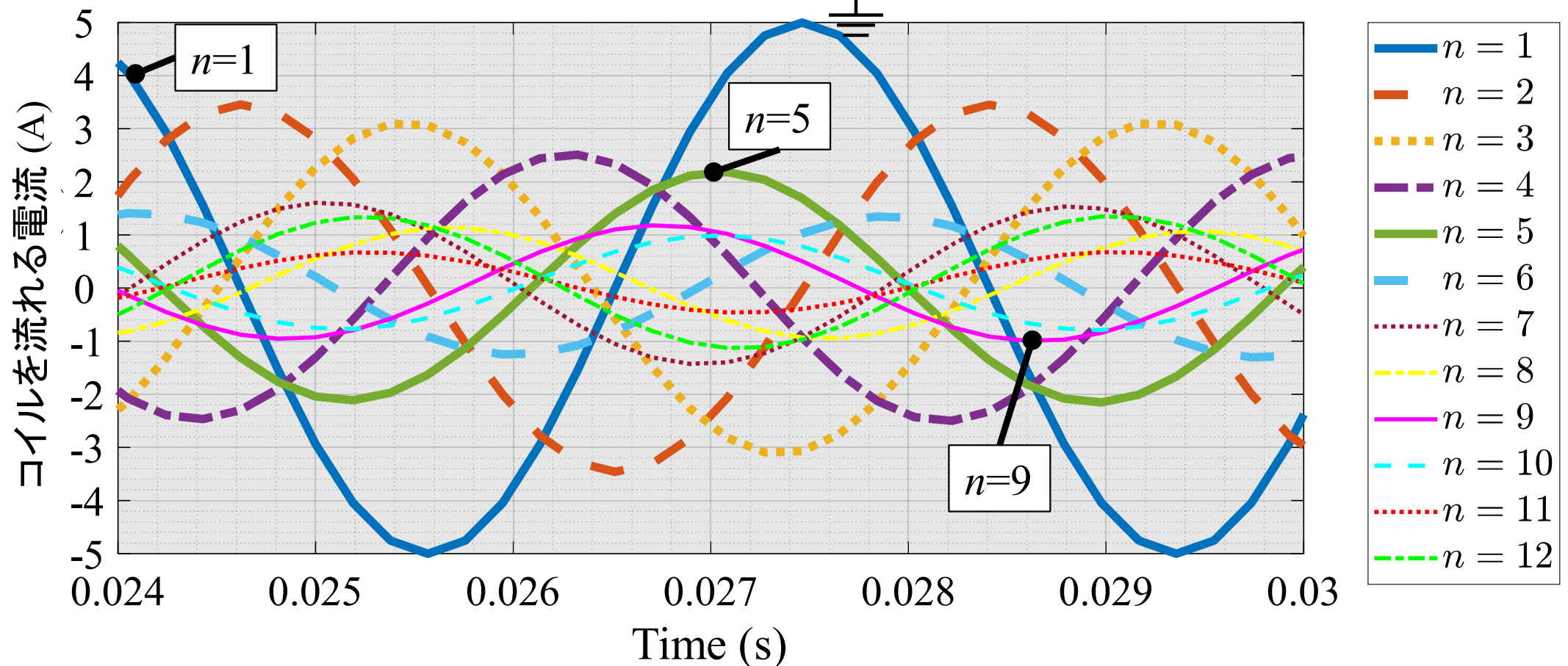
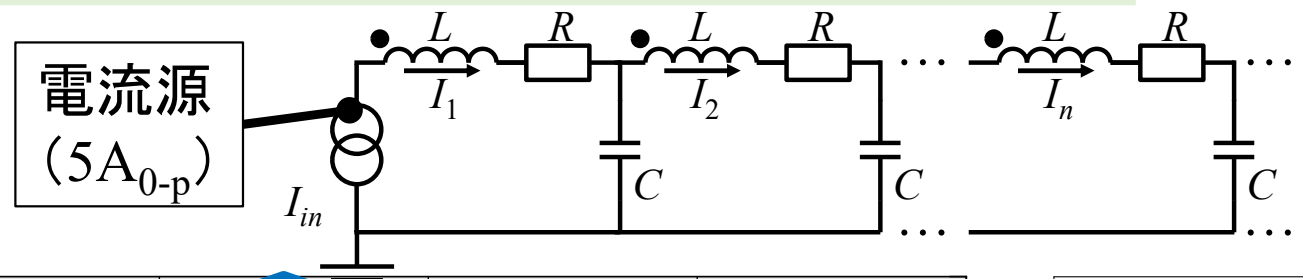
解析条件

- ステータコアおよびリンクコアを線形材料 ($\mu_r=1000$) と仮定 (磁気飽和の影響を排除)
- コア内部にギャップ要素条件を付与インダクタ間のエアギャップを仮想的に設定
- JMAG-Designer Ver.20.0を使用

LCラダー回路の数学モデルに従う実モデル(環状変圧器)を提案
磁界解析により電流伝搬特性を理論値と比較

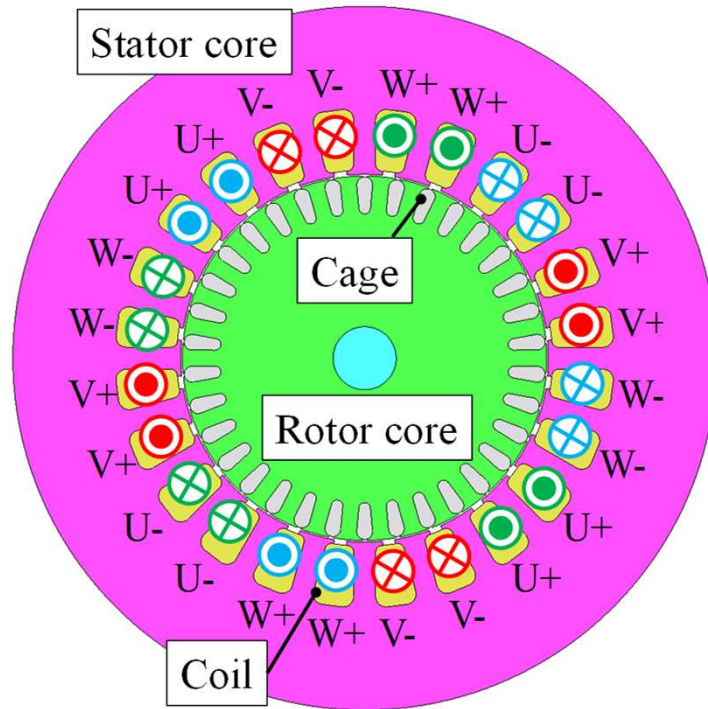
回路B(回路結合)の電流伝搬特性

ギャップ要素を25mmと設定
 結合係数 $k=0.04$, $L=3.7\text{mH}$
 $C=100\mu\text{F}$, $R=1.36\Omega$

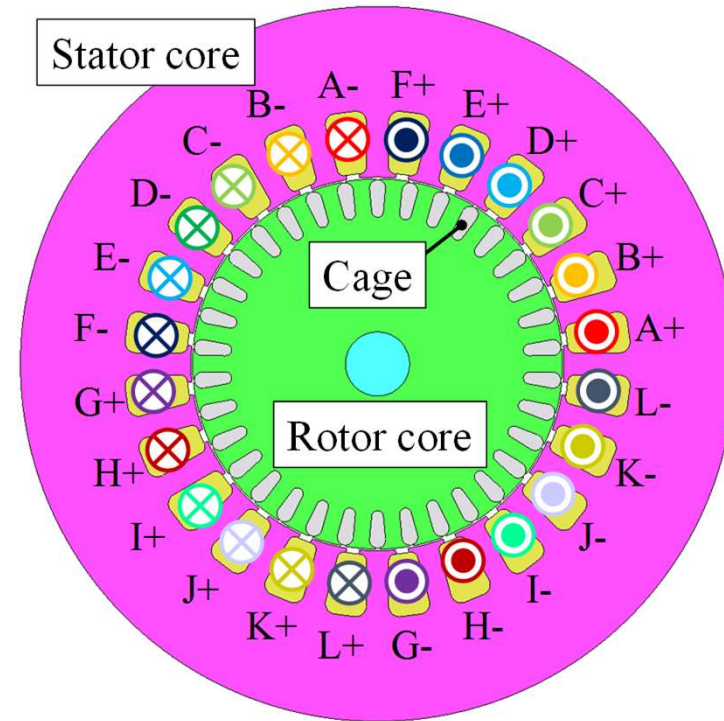


減衰定数(磁界解析):0.15程度
 減衰定数(理論計算):0.1
 回路Bが最も良好な電流伝搬特性を示した

誘導モータ化



(a) 比較用モータ
4極24スロット分布巻
直列数:4
コイルピッチ:5

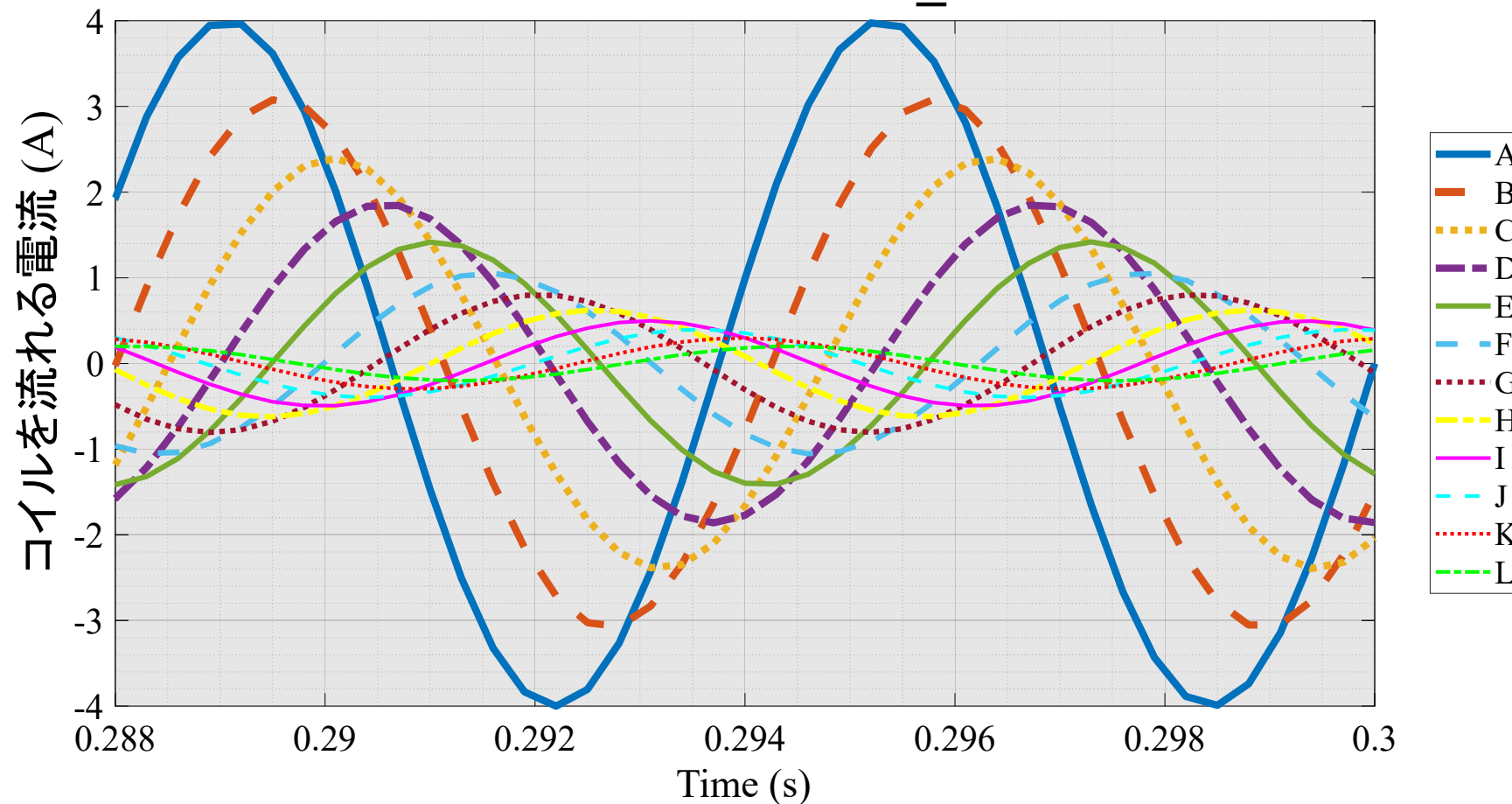
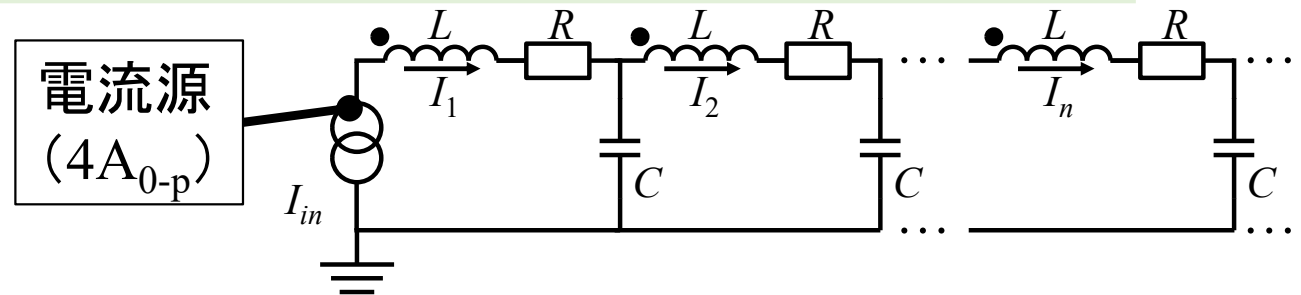


(b) 提案モータ
4極24スロット分布巻
直列数:1
コイルピッチ:6

- 前述の環状変圧器に類似している
 - ラダー回路上で生成される回転磁界の伝搬は受動的である
- ことを踏まえ, LCラダー回路と単相電源から構成される誘導モータを検討する

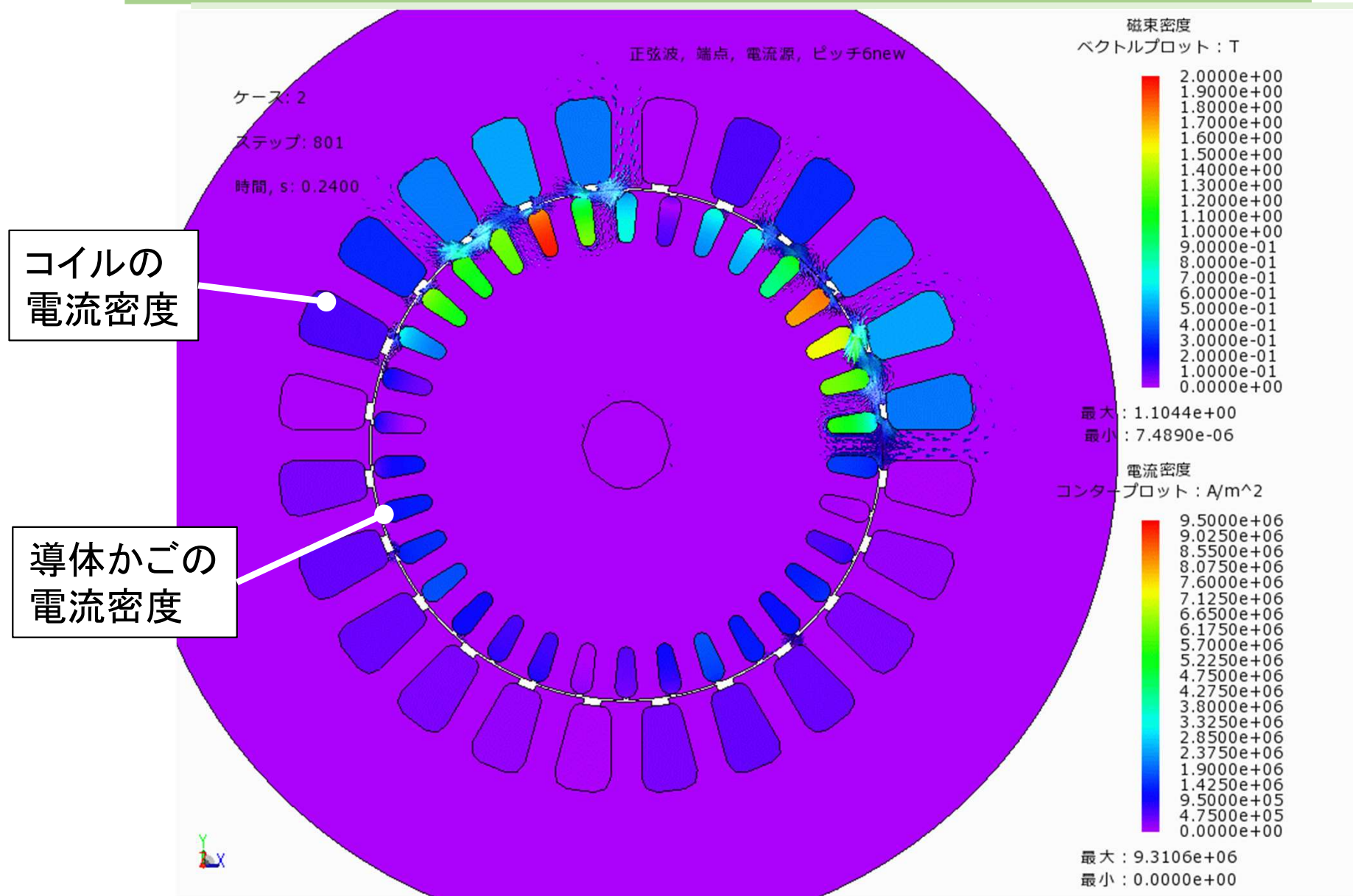
すべり1における電流波形

$C=100\mu\text{F}$, $R=0.35\Omega$



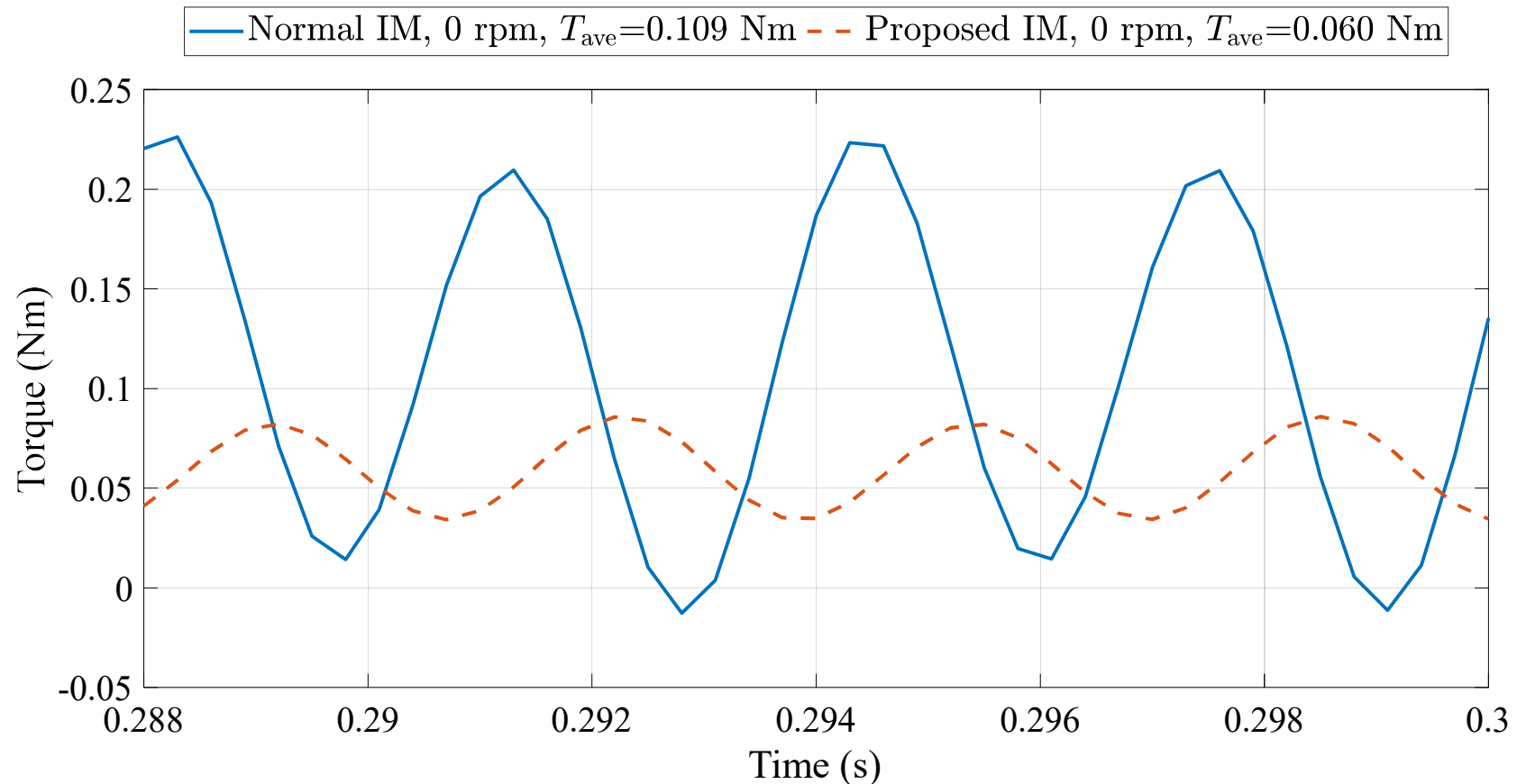
始端であるA相からB相→C相→D相→・・・と電流が伝搬
G相がA相に対して逆位相となっており、**12相交流**が形成

磁束/電流密度ベクトル分布



12相交流に基づき4極の回転磁界が確かに生成されている

すべり1におけるトルク波形



平均トルクは約45%低下したものの、連続的なトルク出力が実現できている
LCラダー回路と単相電源を利用した交流モータの可能性が示された

まとめ・今後の展望

◆3種の線形LCラダー回路の提案

- 相互誘導作用・回路結線の両者で電流伝搬が確認
- 環状変圧器モデルによる磁界解析では回路結線方式が優位であった

◆LCラダー回路と単相電源で構成される誘導モータの提案

- 一般的な三相誘導モータの構造を流用
- 単相電源のみで12相交流が形成され、4極の回転磁界を発生させることに成功
- 平均トルクは45%程度低下したものの、連続的なトルク出力が可能であることを実証

-
- 回路長を12から3に変更し更なる単純化(電流減衰の抑止)
 - 他種交流モータ(同期モータ, リラクタンスモータ, ...)の検討
 - 提案した誘導モータの数学モデル導出(相互誘導作用のモデル化)

謝辞

本研究は公益財団法人双葉電子記念財団 2021年度自然科学研究助成により遂行されました