

## コアタイプ回転変圧器における励磁コイルの並列接続特性

小田原 幸生  
機械電子部

Characteristics of the Parallel Arrangement of Excitation Coils in the Core-type Rotary Transformer

Yukio ODAWARA  
Mechanics & Electronics Division

### 要旨

回転するセンサに非接触で給電を行うために使われるコアタイプ回転変圧器の最大の特長は、この円形コイルに対し複数の励磁コイルを並列配置することが可能なことであり、特性が類似している同軸円形コイルと比べ、給電電力と効率の増加が容易である。今回、コアタイプ回転変圧器並びにこの給電回路の解析に基づくシミュレーションと実験による検証を行い、給電電力が励磁コイルの数のほぼ自乗に比例して増加し、力率も大幅に改善することが確認できた。さらに、シミュレーションと実験の結果を比較し、両者が十分な精度で一致していることを確かめた。

### 1. はじめに

コアタイプ回転変圧器は回転するセンサに非接触で電力を送る回転変圧器で、固定した励磁コイルのコアの内側を円形コイルが通り、センサと共に円形コイルが回転する。この特長は複数の励磁コイルを並列配置出来る点であり、これにより給電電力と効率を容易に増加させることができる。同軸円形コイル<sup>(1)</sup>と対比すると、同軸円形コイルでは特性は類似しているが、励磁コイルに相当する円形コイルを並列配置することは難しい。

これまでトルク検出器への応用<sup>(2)</sup>などについて報告を行った。今回、コアタイプ回転変圧器の磁気的特性、給電回路の解析結果に基づき<sup>(3)</sup>、励磁コイルの並列連結特性をシミュレーションにより求めた。また、励磁コイルの数を1~3個として実験による検証を行い、精度等を詳しく調べた。

(コアタイプ回転変圧器の概略図を Fig.1 に示す。)

### 2. 励磁コイルの並列配置特性 (シミュレーション)

コアタイプ回転変圧器のコアには円形コイルを保持する部品や配線が通過する隙間(ギャップ)があり、この隙間は一般的な変圧器のものとは比べて大きいので、コア全体

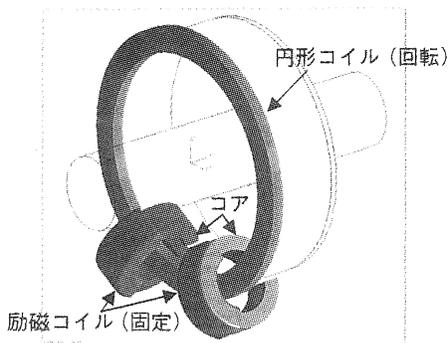


Fig.1 コアタイプ回転変圧器の概略図

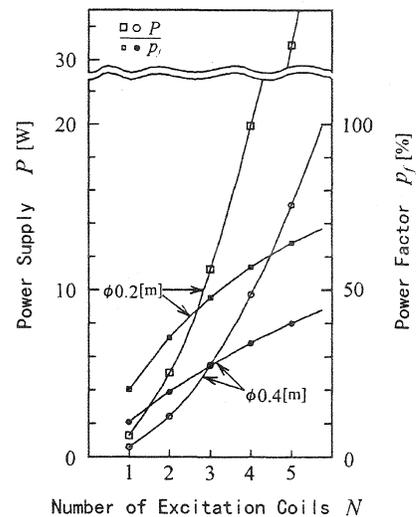


Fig.2 励磁コイルの数  $N$  と給電電力  $P$ 、力率  $P_f$  の関係

から発生する漏れ磁束により励磁コイルと円形コイルの結合係数(coupling factor)が低下する。給電では共振回路を用い、磁界の変化を強くしているが、大きな電力を送ることは適さない。この対策として、励磁コイルを1個から  $N$  個にすると円形コイルとの鎖交磁束を  $N$  倍にでき、給電電力は  $N^2$  倍になると考えられる。そこで、励磁コイルの数  $N$  に対する給電電力  $P$  と力率  $P_f$  の関係をシミュレーションにより求めた。基本的に計算は前回の報告<sup>(3)</sup>の回路方程式によった。力率  $P_f$  は回路損失をゼロとし、励磁電力に対する給電電力  $P$  との比として求めた。Fig.2に計算結果のグラフを、Fig.3に給電回路ブロック図と回路定数の設定を示す。

給電シミュレーションから次のことが分かった。

- (1) 励磁コイルが1個の時の給電電力  $P_1$  を基準とすると、励磁コイルが  $N$  個の給電電力  $P$  は  $N^2 P_1$  より僅かに小さい

結果となった。これは、励磁コイルのコアの配置により円形コイルの出力インピーダンスが増加し出力が減少するが、この一方で給電周期一定の条件では励磁コイルの励磁電力が僅かに増加し出力の減少が抑制されるためである。  
 (2)  $N$ を増やすと力率  $p_f$ も増加するので、実際の回路では効率の改善に役立つ。

### 3. 実験結果と考察

第2章の結果を確認するため、励磁コイルの数を1~3個として実験を行った。

Table 1 に励磁コイルの仕様を示す。励磁コイルの製作ではギャップ長等に若干のバラツキを生じた。並列配置による給電では各励磁コイルの自己インダクタンスが揃っていることが必要なので、コイル巻き数  $N_1$ により調整した。

Table 2 に円形コイルの仕様を、Table 3 に相互インダクタンス  $M$ の測定結果を示す。

Fig. 4 は円形コイルに3個の励磁コイルを配置した時の写真である。

(1) 励磁コイルの並列配置による円形コイル自己インダクタンス  $L_2$ の変化についての考察 (Table 4)

円形コアの自己インダクタンス  $L_2$ の計算法は本報告の付録の記載による。計算値と実測値とを比較すると、実測値の方が最大5.7%ほど小さい値となっている。付録の説明によると、計算値はさらに0.5%( $N=1$ )~1.3%( $N=3$ )プラスに補正する必要がある。これにより最大誤差は約7%となる。他の測定例でも、実測値の方が若干小さくなる傾向がある。これは測定の際の損失(銅損、コアの鉄損など)が影響しているものと思われる。

(2) シミュレーションと実験結果の比較 (Table 5)

上記(1)と同じような傾向・誤差で、実測値の方が計算値よりも小さい値を示している。計算では回路損失を考慮していないが、給電回路のダイオードにおける損失を考慮すると、より実測値に近い値が得られる。

シミュレーションにおいて給電回路のダイオードにおける損失を考慮した場合、回路損失がないと仮定した場合と比べ、励磁コイルの励磁電力(無効電力を含む)は僅かに増加する。このため、給電電力だけに注目すると回路損失の影響は比較的小さい。

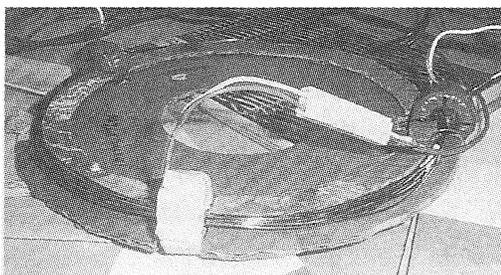


Fig. 4 実験に用いた励磁コイルと円形コイル

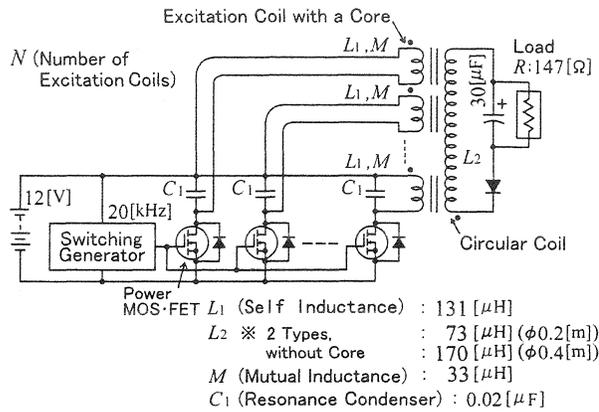


Fig. 3 給電回路ブロック図とパラメータ設定値

Table 1 励磁コイル (3個) の仕様

容量 $L_1$	実測 130.6~131.7 [ $\mu\text{H}$ ] (20 kHz)
磁気抵抗 $R_1$	10.5~11.0 $\times 10^6$ [A/Wb]
測定はLCZメータによる。	
コア: H5AT 28 $\times$ 13 $\times$ 16 TDK製 (外径28mm, 内径16mm, 厚13mm)	
ギャップ長 $g_z$ : 約6 [mm]	
コイル角 $C_A$ : 約(20/18) $\pi$ [rad] (200°)	
コイル巻き数 $N_1$ : 37~38回 ( $\phi 0.6$ フォルマル線)	
コイル抵抗 : 0.29 [ $\Omega$ ] (導線等も含む)	

Table 2 円形コイル仕様

容量 $L_2$	実測 70.4 [ $\mu\text{H}$ ] (20 kHz)
円形コイル径 $D$ : 200 [mm] 断面径 $d$ : 5 [mm]	
コイル巻き数 $N_2$ : 12回 ( $\phi 1$ [mm] フォルマル線)	
コイル抵抗 (導線等も含む): 0.18 [ $\Omega$ ]	
(参考: 容量計算値 <sup>(1)</sup> : 72.6 [ $\mu\text{H}$ ] ( $\delta=0.245$ ))	

Table 3 相互インダクタンス  $M$ の測定結果

相互インダクタンス (平均)		磁気利用率 (平均)	
$M$	33.1 [ $\mu\text{H}$ ] (20 kHz)	$r$	0.784
コア枠内における給電コイル導線の位置: コア中心			
測定はファンクションジェネレータとオシロスコープによる。			

Table 4 励磁コイルの並列配置による円形コイル自己インダクタンス  $L_2$ の変化

$N$	実測値	計算値	※ 計算において、 $L_2$ の初期値( $N=0$ の時の値)は実測値を用いた。
1	78.9 [ $\mu\text{H}$ ]	81.3 [ $\mu\text{H}$ ]	
2	88.1	92.2	
3	96.2	102.2	

Table 5 給電シミュレーション結果と実測との比較

	$N$	実測	計算
給電電力 $P$	1	1.23 [W]	1.26 [W]
	2	4.92	5.03
	3	10.63	11.24
効率 $\eta$ 力率 $p_f$	1	$\eta$ 37.8 [%]	$p_f$ 20.1 [%]
	2	52.3	35.6
	3	54.5	47.5

5. まとめ

これまで報告したコアタイプ回転変圧器並びにこの給電回路の解析結果を基に、励磁コイルを並列配置した場合の給電特性についてシミュレーションと実験により検証を行った。この結果、単一の励磁コイルの給電電力を基準とすると、励磁コイルが  $N$  個の時の給電電力はほぼ  $N^2$  倍に等しく、力率も大幅に改善できることが確認できた。また、シミュレーション結果と実験結果を比較すると、両者が十分な精度で一致していることが確認できた。

謝 辞

本研究過程でご助言をいただいた大分大学工学部生産システム工学科の小川幸吉助教授に感謝の意を表します。

<付 録>

※ 励磁コイルの配置による円形コイル自己インダクタンスの増加について

当センター平成 11 年度研究報告で、コアタイプ回転変圧器の容量の計算に磁気回路の考え方をうい、励磁コイル、円形コイルの自己インダクタンス  $L_1, L_2$ 、相互インダクタンス  $M$  が次式で計算出来ることを述べた。

$$L_1 = N_1^2 / R_1 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$M = r N_1 N_2 / R_1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$L_2 \doteq L_{20} + N \times r N_2^2 / R_1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$N_1, N_2$  : 励磁コイル, 円形コイルの巻き数

$R_1$  : 励磁コイルの磁気抵抗 [A/Wb]

(励磁コイルの起磁力 ÷ 励磁コイル平均磁束)

$r$  : 磁気利用率

$L_{20}$  : 円形コイル自身の自己インダクタンス

$N$  : 励磁コイルの数

(3)式において、個々の励磁コイルの仕様、円形コイルとの位置関係は同じとする。)

この計算式の理論的側面を考える。円形コイルによって発生する磁界は、円形コイルを縁とする等価板磁石 (equivalent magnetic shell) に置き換えて考えることができる。故に、円形コイルに単位電流が流れる時、円形コイルを含む面がコアと交わる断面に生じる起磁力は  $I[A] \times N_2$ 、コアに発生する磁束は  $N_2 / R_1 [Wb]$ 、このうち円形コイルを通る磁束は  $r N_2 / R_1 [Wb]$ 、円形コイルとの鎖交数すなわち自己インダクタンスは  $N_2 \times r N_2 / R_1 [H]$  となる。このことから、 $N$  個のコアを配置した場合の円形コイル自己インダクタンスは近似的に(3)式で表せることが分かる。ところで、 $R_1, r$  は励磁コイルのコイル幅の影響を受けるため、本来、起磁力が生じる前記コア断面に対応する狭いコイル幅の数値を用いるべきである。しかし、僅かな誤差を許すならば、以下の理由から必ずしもその必要がないことが分かる。

参考文献

- (1) 電気学会, 「電気工学ハンドブック (基礎物理-電磁誘導作用)」, p.107-111, 1988
- (2) 小田原 幸生 : 「回転式トルク検出器の開発」 p.68~71, 「回転式検出器への非接触電力供給方法」 p.72~75, 大分県産業科学技術センター平成 10 年度研究報告
- (3) 小田原 幸生 : 「コアタイプ回転変圧器の設計法とその検証」 p.63~79, 大分県産業科学技術センター平成 11 年度研究報告

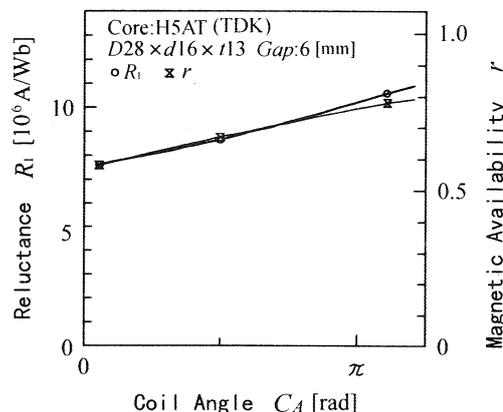


Fig.A-1 励磁コイルのコイル角  $C_A$  に対する磁気抵抗  $R_1$ 、磁気利用率  $r$  の関係

Fig.A-1 に、コイル角  $C_A$  (コア中心からコイル両端を臨んだ角度) に対する磁気抵抗  $R_1$ 、磁気利用率  $r$  を実測した結果を示す。この例のコアは本文の実験で使った円形コアで、測定値は平均値をとっている。グラフから  $C_A$  が増大すると磁気抵抗  $R_1$  と磁気利用率  $r$  が共に増えるが、 $(r/R_1)$  は  $C_A < (3/4)\pi$  でほぼ一定であるため、 $R_1, r$  は必ずしもコイル幅が狭い時の数値を用いる必要はない。しかし、 $C_A$  を大きくし過ぎると、 $(r/R_1)$  は小さくなる。これは相互インダクタンス  $M$  の低下にも繋がるので、好ましくない。

本文の例では  $C_A$  は  $(20/18)\pi$  [rad] である。この時、 $(r/R_1)$  は  $C_A = (2/18)\pi$  [rad] の時の値に対し 0.96 倍であるので、 $L_2$  全体からすると、実際よりも 0.5%( $N=1$ )~1.3%( $N=3$ ) 小さい値で計算されていることになる。この程度の誤差であるので、実質的にコイル角  $C_A$  の影響は無視できる。

一方、コア形状が四角の場合には励磁コイルからの漏れ磁束が少ないため、コイル幅の影響は小さい。