巻鉄心型三相変圧器の磁気特性解析

正員 新谷 邦弘* 正員 斉藤 弘一*

Analysis of Magnetic Properties of the Wound-core Type Three-phase Transformer

Kunihiro Shinya*, Member, Koichi Saitoh*, Member

This paper describes the magnetic properties of wound-core type three-phase transformer. In the analysis, magnetization characteristics are approximated by a Fourier-series, and it is assumed that the eddy current factor is proportional to the time-varying magnetic flux. Moreover harmonic balance method where the zero-phase-sequence and third harmonic components of flux density are taken into consideration is used.

From the results of numerical analysis, the influences of operating flux density, dimension ratio and construction of the core on the magnetic properties of wound-core type three-phase transformer are discussed. The results of the analysis were confirmed by the experiments. The results obtained will be useful in the design of wound-core type three-phase transformer.

キーワード：三相巻鉄心，磁気特性，調和平衡法，ビルディングファクタ

Keywords: wound-core type three-phase transformer, magnetic properties, harmonic balance method, building factor

1. まえがき

巻鉄心を用いた三相変圧器は，鉄心組立ての容易さなどの理由により比較的小容量のものから中容量のものまで広く使用されている⁽¹⁾。その鉄心構成法としては三個の巻鉄心からなる三脚鉄心と，四個の巻鉄心からなる五脚鉄心があり，鉄心製作の容易さから小容量の場合には三脚，中容量の場合には五脚が使用される。本装置の小型，軽量，高効率化を図るには磁気特性に関する検討が重要である。しかしながら，磁化特性の非線形性および鉄心構成に基づいて生ずる磁束波形の歪，磁束の不均一などのため磁気特性は複雑となる。これまで，有限要素法を用いて磁束波形を求め，鉄損について検討した報告⁽¹⁾やステップラップ部について等価磁化特性を検討した報告がなされている。しかし，ヒステリシス特性やうず電流の影響は考慮されておらず，磁束密度，鉄心寸法比，鉄心構成法と磁気特性の関係等鉄心設計の基礎事項は明らかにされていない。本論文はこれらの鉄心設計の基礎を得ることを目的とし，ノーカットでギャップのない理想的な三脚および五脚巻鉄心変圧器を対象として，ヒステリシス特性およびうず電流の影響を考慮して磁気特性の解析を行ったものである。

解析にあたっては，フーリエ級数を用いてヒステリシス

特性を高精度で近似し，磁束密度の変化の割合に比例した等価うず電流磁界の強さを仮定した交流磁化特性モデルを用いている。また，鉄心の磁気特性の解析には有限要素法等が一般に用いられる⁽¹⁾⁽²⁾が，この方法では動作磁束密度，鉄心形状，材質，鉄心構成法等の各種の設計要素について特性の全体を検討するには多くの時間を要し，また，特性の物理的意味を理解して，鉄心の設計指針を確立することも必ずしも容易ではない。ここでは，巻鉄心型三相変圧器の磁気特性が，その鉄心構造に起因して生ずる磁束の基本波零相成分および三倍高調波成分により大きな影響を受けることに着目し，調和平衡法を用いてこれらを直接求めて鉄心各部の磁束波形，励磁電流波形を得て磁気特性を検討している。これより，三脚および五脚巻鉄心について磁束密度，鉄心寸法比と磁束の基本波零相成分および三倍高調波成分との関係を示し，これらが素材特性と鉄心特性との関係すなわちビルディングファクタに与える影響を明らかにして鉄心設計の基礎を与えている。なお，解析結果は実験結果とほぼ一致することを示している。

2. 磁化特性の近似

巻鉄心の磁気特性を求めるにあたって，まず，素材の交流磁化特性（B-H特性）をモデル化する必要がある。ここでは，(1)式で表されるものとする⁽³⁾。

$$H = H_h + H_e \dots \dots \dots (1)$$

* 福井工業高等専門学校

〒916-8507 福井県鯖江市下町

Fukui National College of Technology

Geshi-cho, Sabae-city, Fukui 916-8507

$$H_h = f(B) = \sum_{j=1}^n (H_{cj} \cos j\phi + H_{sj} \sin j\phi)$$

$$H_e = K_e \cdot dB/dt \quad \phi = \sin^{-1}(B/B_m)$$

ここで、 H_h はヒステリシス特性における磁界の強さで、これをフーリエ級数で表す。ただし、 H_{cj} は j 次の余弦項のフーリエ係数、 H_{sj} は j 次の正弦項のフーリエ係数で n は考慮すべき高調波の次数である。また、等価うず電流磁界の強さ H_e は磁束密度 B の変化の割合に比例し、鉄心を均一に磁化するものとし、その比例定数を K_e とする。

これらの各係数は材質、鉄板の厚さなどにより異なり、ここでは以下のように実験により求めるものとする。図 1 の有効断面積 S 、平均磁気回路の長さ L の方向性けい素鋼帯を用いた角型巻鉄心に巻数 $N = 50$ 回のコイルを設け、磁束正弦波条件で最大磁束密度 B_m を一定とし、周波数 f を変化させて磁界の強さ H の各調波成分を測定する。この時、 H の基本波成分の電圧と同相のもののみは周波数にはほぼ比例して増加し、他の成分はほぼ一定となる。そこで、ここでは、 $B_m = 1.7$ (T)、 $f = 60$ (Hz) と 120 (Hz) における電圧と同相の成分の測定値を使用し、その傾きから K_e を定めて一定とし、 $f = 0$ の点まで外挿して H_{c1} を求める。また、 H_{s1} および高次調波成分等の他のフーリエ係数は周波数に対する変化は少ないため $f = 60$ (Hz) の値を用いるものとする。なお、これらのフーリエ係数は最大磁束密度の関数となるため、 ΔB_m の間隔で測定し、折れ線近似して表す。ここでは、磁界の強さ H 実測値と近似値の差異を 5% 以下とするため、 $n = 17$ 、 $\Delta B_m = 0.05$ (T) とすることとし、交流磁化特性の近似結果を図 2 に示す。

図 1 鉄心寸法

Fig. 1. Dimension of the core.

 図 2 交流磁化特性の近似 ($f = 60$ Hz, $B_m = 1.0 \sim 1.8$ T)

Fig. 2. Approximation of the hysteresis loop.

3. 磁気特性解析方法

解析にあたって、次の仮定をおく。

(a) 漏れ磁束は無視でき、一個の鉄心の外形内径比は小さく、この中での磁束分布はほぼ均一とみなすことができ⁽⁴⁾、鉄心間の磁束のぐりはないものとする。

(b) 電源電圧は対称三相交流とし、(2) 式で表され、巻線抵抗の影響は無視できるものとする。

$$v_{UV} = V_m \cos(\omega t + \pi/6)$$

$$v_{VW} = V_m \cos(\omega t - \pi/2) \dots \dots \dots (2)$$

$$v_{WU} = V_m \cos(\omega t - 7\pi/6)$$

<3・1> 三脚巻鉄心型三相変圧器の磁気特性解析

三脚巻鉄心型三相変圧器の構成、各部の電圧、電流、磁束密度等の記号を図 3 に示す。三脚巻鉄心型では、(3)~(8) 式が成り立つ。ただし、接続は三角結線とし、各相の磁束を Φ_{UV} 、 Φ_{VW} 、 Φ_{WU} 、外側の鉄心 a の磁束密度の瞬時値を B_a 、平均磁気回路の長さ L_1 、内側の 2 個の鉄心 b, c の磁束密度の瞬時値を B_b 、 B_c 、平均磁気回路の長さを L_2 、断面積を S 、巻数を N とする。

$$v_{UV} = N \cdot d\Phi_{UV}/dt = NS \cdot d(B_a - B_b)/dt \dots \dots \dots (3)$$

$$v_{VW} = N \cdot d\Phi_{VW}/dt = NS \cdot d(B_b - B_c)/dt \dots \dots \dots (4)$$

$$v_{WU} = N \cdot d\Phi_{WU}/dt = NS \cdot d(B_c - B_a)/dt \dots \dots \dots (5)$$

$$Ni_U/L_1 = N(i_{UV} - i_{WU})/L_1 = f(B_a) + K_e dB_a/dt \dots \dots \dots (6)$$

$$Ni_V/L_2 = N(i_{VW} - i_{UV})/L_2 = f(B_b) + K_e dB_b/dt \dots \dots \dots (7)$$

$$Ni_W/L_2 = N(i_{WU} - i_{VW})/L_2 = f(B_c) + K_e dB_c/dt \dots \dots \dots (8)$$

磁束密度の瞬時値 B_a 、 B_b 、 B_c は (9) 式で表されるもの

図 3 三脚巻鉄心型三相変圧器の形状

Fig. 3. Configuration of the three-legged core.

磁束密度の瞬時波形 B_a, B_b, B_c, B_d が得られ、これらを (16)~(18) に代入することにより、電流の瞬時値 i_U, i_V, i_W が得られる。

〈3・3〉 磁気特性の計算 得られた磁束密度の瞬時値より各鉄心の誘導起電力 e 、励磁電流 i の瞬時値を求め、 e, i 等を (23), (24) 式で表す。ただし、起電力の第 k 次高調波の余弦成分を E_{ck} 、正弦成分を E_{sk} 、電流の第 k 次高調波の余弦成分を I_{ck} 、正弦成分を I_{sk} とし、考慮すべき次数を m 次までとする。

$$e = \sum_{k=1}^m (E_{sk} \sin k\omega t + E_{ck} \cos k\omega t) \dots\dots\dots (23)$$

$$E_{sk} = -k\omega N S B_{ck}, \quad E_{ck} = k\omega N S B_{sk}$$

$$i = \sum_{k=1}^m (I_{sk} \sin k\omega t + I_{ck} \cos k\omega t) \dots\dots\dots (24)$$

鉄損 P_i は各鉄心について誘導起電力および励磁電流の同一調波、同一成分の積として (25) 式より求める。

$$P_i = \sum_{k=1}^m (E_{sk} I_{sk} + E_{ck} I_{ck}) \dots\dots\dots (25)$$

4. 解析結果

〈4・1〉 磁束密度、励磁電流、鉄損の解析結果および実験結果

磁束密度、励磁電流および鉄損の解析結果を実験結果と比較して示す。実験には方向性ケイ素鋼帯 27P100 を用い、図 1 の寸法のもを三脚および五脚巻鉄心の鉄心 b および c として使用し、三脚の場合 $K_L = 1.65$ ($L_1 = 0.624$ m, $L_2 = L$)、五脚の場合 $K_L = 1.80$ ($L_3 = 0.341$ m, $L_2 = L$) である。巻線は巻数 $N = 50$ 回で三角結線とする。なお、相電圧に対する見かけの磁束密度の最大値 B_m ($= V_m / 2\omega N S$, 以下動作磁束密度と呼ぶ)、鉄心寸法比 K_L と交流磁気特性との関係を示すこととし、実用的な範囲を考慮して $1.3 \text{ (T)} \leq B_m \leq 1.7 \text{ (T)}$, $1.5 \leq K_L \leq 2.0$ の場合を取り扱う。また、磁束密度の 7 倍以上の成分は少なく無視できるものとし、諸特性を求めるにあたって、磁束密度は 5 倍調波成分までを考慮し、誘導起電力、電流は基本波成分の 2% 以上の成分のみを取り扱うこととし、 $m = 17$ 次まで考慮した。

$B_m = 1.7 \text{ (T)}$, $K_L = 1.65$, $f = 60 \text{ (Hz)}$ における動作波形を図 6 に示す。磁束密度の 7 倍以上の調波成分を無視したことによると思われる差異が幾分見られるが、解析結果は実験結果とほぼ一致しており、各鉄心の磁束密度波形および各線電流波形は各々異なったものとなるがわかる。

磁束密度の調波成分 B_k を図 7 に示す。解析結果は実験結果と一致している。図より、磁束密度は 3 倍高調波成分を含むことがわかる。これは、三相巻鉄心では各鉄心は 2 個の巻線で励磁されて起磁力の 3 倍成分は打消し合うことによる。なお、 B_m を大きくすると基本波正相分に対する割合は増加する。また、鉄心構成の非対称に基づく零相成

図 6 動作波形 (材質: 27P100, $f = 60 \text{ Hz}$, $K_L = 1.65$)

Fig. 6. Wave forms.

図 7 各鉄心の磁束密度調波成分 (材質: 27P100, $f = 60 \text{ Hz}$, $K_L = 1.65$)

Fig. 7. Harmonic component of flux density.

図 8 各鉄心の磁束密度の最大値 (材質: 27P100, $f = 60 \text{ Hz}$, $K_L = 1.65$)

Fig. 8. Maximum flux density of the core.

分を生じ、 B_m が低い程大きく、 $1.7 \text{ (T)} \leq B_m$ では少なくなる。なお、5 倍高調波成分は基本波成分の 5% 以下で、特性への影響は少ない。

各鉄心の磁束密度の最大値 B_p を図 8 に示す。解析結果は実験結果と一致している。鉄心寸法の差異により $B_{ap} < B_m < B_{bp}$, B_{cp} となり、差異は B_m が低いほど顕著となる。なお、図 6 の動作波形から明らかなように、各

(a) Fundamental component

(b) High harmonic component

図9 励磁電流調波成分
(材質: 27P100, $f = 60$ Hz, $K_L = 1.65$)

Fig. 9. Harmonic component of magnetizing current.

鉄心の磁束の三倍調波成分は最大値を減少させる作用をしている。

各線の励磁電流の調波成分 I_k を図9に示す。 $B_m = 1.7$ (T) 近傍では素材特性の不均一によるものと思われる差異を生じているが、各線の各調波成分ともに解析結果は実験結果とほぼ一致しており、本解析では励磁電流についても詳細な検討が可能である。基本波成分 I_1 は不平衡となり、U相ではV, W相より大きくなる。なお、不平衡の程度は K_L が大きいほど増加し、 B_m の影響は少ない。また、巻鉄心型では鉄心寸法の差異により相電流が不平衡となるため三角結線であっても線電流に3倍調波成分 I_3 が含まれ、 B_m が高く鉄心寸法比 K_L が大きい程増加する。

鉄心 a, b, c の単位重量当たりの鉄損 W_a, W_b, W_c および全鉄心の単位重量当たりの鉄損 W を図10に示す。素材特性の不均一により生じたと思われる差異が幾分見られるがいずれの場合にも解析結果は実験結果とほぼ一致している。 $W_a < W < W_b, W_c$ の関係にあり、 B_m が小さく、 K_L が大きいほど差異は顕著となり、これらは、磁束密度の最大値に差異を生じたことによる。

(4・2) ビルディングファクタ 鉄心の設計に当たっては、素材の単位重量当たりの鉄損と全鉄心の単位重量当たりの鉄損との比すなわち、ビルディングファクタ (以下 B.F とする) を把握する必要がある。ここでは、素材を動作磁束密度 B_m の磁束正弦波条件で励磁した場合を基準にとり、 B_m 、鉄心寸法比 K_L と B.F との関係について解析により検討した結果を示す。

(a) Three-legged core ($K_L = 1.65$)

(b) Five-legged core ($K_L = 1.8$)

図10 動作磁束密度と単位重量当たりの鉄損との関係 (材質: 27P100, $f = 60$ Hz)

Fig. 10. Relation between flux density and iron loss.

図11 動作磁束密度とビルディングファクタとの関係 (材質: 27P100, $f = 60$ Hz)

Fig. 11. Relation between flux density and building factor.

鉄心寸法比 K_L をパラメータとした動作磁束密度 B_m と B.F との関係を図11に示す。 K_L が小さい場合には B.F が極小となる B_m が存在し、 K_L が大きい場合には B_m が高い程 B.F は増加する傾向となり、 K_L が大きい程 B_m に対する B.F の変化の割合は大となる。

材質 27P100 および 30P120 について B_m をパラメータとした鉄心寸法比 K_L と B.F との関係を図12に示す。 B_m が低い場合には K_L を大きくすると B.F は小となるが、 B_m が高くなると K_L に対する変化は少なくなり、 $B_m = 1.7$ (T) では鉄心寸法比による差異はほとんど見られなくなる。

B.F が以上のような傾向を示す理由として、磁束密度の基本波零成分 B_{s10} 、3倍調波成分 B_{s3} の振る舞いが上げられ、これらを図13、図14に示す。三相巻鉄心の B.F は

図 12 鉄心寸法比 K_L とビルディングファクタとの関係

Fig. 12. Relation between K_L and building factor.

図 13 磁束密度零相波成分 ($f = 60 \text{ Hz}$)

Fig. 13. Zero-phase-sequence component of flux density.

図 14 磁束密度 3 倍調波成分 ($f = 60 \text{ Hz}$)

Fig. 14. Third harmonic component of flux density.

1.2 から 1.3 の範囲にあり、大きくなる主な理由としては、各相が 2 個の鉄心で構成され、図 4 のように各鉄心の磁束の基本波正相分の間には位相差を生じ、磁束密度の最大値が見かけの値 B_m より高くなることが挙げられる。これに対し、零相成分の正弦項 B_{s10} は図 4 のように B_{bm} および B_{cm} を幾分高くするもののそれ以上に B_{am} を低くして鉄心 a のヒステリシス損を減少させ、B.F を小さくする。図 12 のように、動作磁束密度が低く、 K_L が大きい程 B_{s10} は大となり、この効果は顕著となり B.F は小となる。また、3 倍調波成分の正弦項は各鉄心の磁束密度の最大値を低くしてヒステリシス損を減少させる作用をし、 $B_m < 1.5 \text{ (T)}$ で顕著となる。 $B_m < 1.5 \text{ (T)}$, $K_L \leq 1.65$ では B_{s3} の影

響が顕著であるのに対し、 B_m が高く、 K_L が大きい処では B_{s10} の影響が顕著となって B.F は先に述べたような傾向を示すものと考えられる。なお、図 12 には材質による差異が示され、 B_m が低い処ではグレードの高い材質の方が B.F が小さく、 B_m が高い処ではグレードが低い材質の方が B.F が小さくなることを示している。これは、図 13 のようにグレードの高い材質の方が起磁力の差異による磁束密度の差異が大きいため零相成分の影響が顕著であるのに対し、3 倍調波成分の割合は図 12 のようにグレードが低い材質の方が大きく、この影響が顕著であるためと考えられる。

5. まとめ

ヒステリシス特性および電流の影響を考慮し、三角結線した三脚および五脚巻鉄心型三相変圧器に、磁束の基本波零相成分および三倍高調波成分に着目した調和平衡法を適用して磁気特性を求め、次の結果を得た。

(1) 磁束には基本波零相成分が含まれ、これは外側鉄心の磁束密度の最大値を低下させて鉄損を減少させる作用をし、動作磁束密度が低く、内側に対する外側鉄心の磁気回路の長さの割合が大きいほど顕著となる。

(2) 磁束には 3 倍高調波成分が含まれ、各鉄心の磁束密度の最大値を低くして、鉄損を減少させる作用をし、動作磁束密度を高くするほど顕著となる。

(3) 実用的な動作磁束密度、鉄心寸法比における素材の鉄損に対する全鉄心の鉄損の割合 (ビルディングファクタ) は 1.2 から 1.3 程度で、動作磁束密度が高く、外側の鉄心の磁気回路の長さの割合が大きいほど小となる。

(4) 励磁電流の基本波成分は不平衡となり、外側の鉄心の磁気回路の長さの割合が大きいほど顕著で、動作磁束密度による差異は少ない。また、線電流には 3 倍高調波電流が含まれ、内側に対する外側の鉄心の磁気回路の長さの割合が大きいほど大となる。

以上の解析結果は実験結果とほぼ一致している。なお、三角結線時の三脚と五脚巻鉄心は、内側に対する外側の鉄心の磁気回路の長さ (五脚では外側 2 個分) が等しい場合には同じ動作となる。すなわち、五脚は三脚の外側の鉄心を中央部分でカットし外側に向けて閉じたものと考えられる。

本解析方法では簡単な計算で直接励磁電流、鉄損を求めることができるため、動作磁束密度、鉄心寸法比の影響など特性の全般の把握が容易となり、得られた結果は巻鉄心型三相変圧器の設計に有用である。なお、本解析法はギャップを有する場合にも起磁力に補正を加えることにより適用でき、詳細については別に報告したい。また、巻厚、ステップラップ部の磁束の亘りの影響などでビルディングファクタはさらに増加すると考えられるが、これらについては有限要素法などによる詳細な検討が必要となる。

(平成 14 年 7 月 8 日受付, 平成 14 年 12 月 13 日再受付)

文 献

- (1) 栗田省吾・長江洋典・永田 徹・浅井政一:「三相変圧器巻鉄心における三脚と五脚鉄心の鉄損特性に関する検討」, 電気学会研資, SA-98-37 (1998)
- (2) 井上 幸・原田和郎・石原好之・戸高敏之・平川:「ステップラップを考慮した巻鉄心型三相変圧器の磁界解析」, 電気学会マグネティックス研資, MAG-99-174 (1999)
- (3) K. Saitoh, K. Shinya, and E. Miyazawa: "Magnetic Properties of Silicon Steel Plate Exited with Distorted Wave Voltage", *T. IEE Japan*, Vol.114-D, No.5, pp.520-525 (1994-5) (in Japanese)
斉藤弘一・新谷邦弘・宮沢永次郎:「ひずみ波電圧で励磁されるケイ素鋼板の交流磁気特性」, 電学論 D, 114, 5, pp.520-525 (1994-5)
- (4) K. Saitoh, K. Shinya, and E. Miyazawa: "Influence of Dimension Ratio and Magnetizing Conditions on the AC Magnetic Properties of Tape Wound Ring Core", *T. IEE Japan*, Vol.118-A, No.5, pp.490-495 (1998-5) (in Japanese)
斉藤弘一・新谷邦弘・宮沢永次郎:「環状巻鉄心の交流磁気特性に与える磁化条件と寸法比の影響」, 電学論 A, 118, 5, pp.490-495 (1998-5)

新 谷 邦 弘 (正員) 1946年12月1日生。1970年3月福井大学工学部電気工学科卒業。同年, 福井工業高等専門学校電気工学科に勤務。主として電気機器鉄心の磁気特性解析に関する研究に従事。現在, 同教授。工学博士。日本応用磁気学会会員。

斉 藤 弘 一 (正員) 1952年5月9日生。1971年3月福井県立武生工業高等学校電気工学科卒業。同年, 福井工業高等専門学校電気工学科に勤務。主として電気機器鉄心の磁気特性に関する研究に従事。