磁気異方性楔による交流励磁形同期機の 電圧高調波低減に関する考察

正員 井 出 一 正 (日 立)

正員 渡 部 正 敏 (日 立)

正員 佐 藤 征 規 (日 立)

正員 高 橋 身 佳 (日 立)

正員 高 橋 典 義 (茨城大)

Reduction of Higher Harmonic Sequences in Terminal Voltage of
an AC Exciting Synchronous Generator Using Magnetically Anisotropic Slot Wedges.

Kazumasa Ide, Member, Masatoshi Watanabe, Member, Masaki Sato, Member,

Miyoshi Takahashi, Member (Hitachi Ltd.)

Noriyoshi Takahashi, Member (Ibaraki University)

This paper describes relationships between characteristics of a magnetically anisotropic slot wedge and voltage higher harmonics in an AC exciting synchronous generator terminal due to permeance ripple caused by an open slot type rotor. From the relationships obtained, practical guide lines were formulated for machine designs applying the magnetically anisotropic slot wedge. The results were as follows.

- (1) Equivalent permeability of the magnetically anisotropic slot wedge became isotropic wedge permeability for air-gap flux ripple.
- (2) Two ways were identified to reduce voltage higher harmonics by using the slot wedges.
- (3) The level of leakage flux passing through the anisotropic slot wedge was determined only by its permeability in the width direction.
- (4) Effectiveness of the magnetic anisotropic slot wedges inserted into the stator slots was verified from experimental results using a model machine of the open slot type rotor.

キーワード：磁性楔，磁気異方性楔，磁気異方性，交流励磁形同期機，発電機，回転機，高調波

1. まえがき

可変速発電システムの中核となる交流励磁形同期機は、数十万kW級の大容量機であり、回転子、固定子とも開放スロット構造が採用される。このスロット構造は、ギャップにおける空間的なパーミアンス脈動を引き起こす要因となり、交流励磁形同期機の出力端子において電圧高調波を発生する可能性を有する¹⁾。一方、磁性楔はパーミアンス脈動を軽減する手段として検討され、ギャップを通過する磁束に対してパーミアンスの変動を緩和するために有効なことが報告されてきた^{2)~6)}。磁性楔の中には、一部の小形汎用の誘導電動機に適用され、実用化されているものもある⁷⁾。しかし、磁性楔はパーミアンス脈動を

軽減するのに有効である反面、楔を周方向に通過する漏れ磁束を増加する特性を有し、このことが大容量機に磁性楔を適用する上での制限事項の1つとなっていた。

以上のような問題点の解決を目的とし、先に筆者等は、楔の周方向透磁率と径方向透磁率を異なる値として磁気的に異方性を示す磁性楔（以下、磁気異方性楔と称する）を提案し、スロット周り磁場分布の数値計算によって、基本的に所期の特性が得られることを確認した⁸⁾。しかしながら、磁気異方性楔を交流励磁形同期機に適用する際には、適用上の指針等を明らかにする必要があると考えられる。

ここでは、上記の事項を明らかにするため、磁気異方性楔の磁気特性と電圧高調波振幅、漏れ磁束の関係、楔

数の発生機構を有する電圧高調波のうち軽減対象とされる高調波成分など、磁気異方性楔を適用するための理論的、数値的な指針について、詳細に検討した。まず、磁気異方性楔に対し、磁束脈動率に対する等方性換算の等価透磁率の概念を導入し、等方性楔に対する電磁気的性能の優位性を示した。次いで、交流励磁形同期機の機内磁場を数値的に解析し、回転子、固定子各々単独に磁気異方性楔を装着したときの電圧高調波振幅、漏れ磁束両者の低減効果を検討した。更に、解析結果に基づき、磁気異方性楔を装着した交流励磁形同期機の小形モデル機による実測により、考察した事項の妥当性が確認された。

本論文は、以上の成果について述べるものである。

2. 磁気異方性楔の基本特性

まず、従来から検討されている磁気的に等方性の磁性楔（以下、等方性楔と称する）との比較において、磁気異方性楔の特徴、適用効果および検討事項について述べる。ここでの検討は、開放形スロット構造に対し、スロット楔を磁性楔とした場合を想定した。

図1に等方性楔の適用範囲を概念的に示す。図において、横軸は等方性楔の比透磁率 μ_s であり、縦軸にギャップにおける磁束の脈動率 β および漏れ磁束 ϕ_l を示す。 μ_s を大きくすると β は減少し、一方、 ϕ_l は μ_s に対して比例的に増加すると考えられる。したがって、低減効果を期

図1 等方性楔の適用範囲

Fig. 1. Condition of useful application of magnetic isotropic slot wedge.

図2 磁気異方性楔の着眼点

Fig. 2. Usefulness of application of magnetically anisotropic slot wedge.

待する磁束脈動率の上限値を満足する楔の比透磁率値を μ_{sp} 、電氣的性能面からの ϕ_l の許容値を満足する楔の比透磁率値を μ_{st} とすれば、適用可能な等方性楔の μ_s の範囲は $\mu_{sp} \leq \mu_s \leq \mu_{st}$ に限定される。したがって、磁性楔の適用条件は $\mu_{st} > \mu_{sp}$ となり、適用効果が期待できない場合もあるといえる。

図2に磁気異方性楔の着眼点を概念的に示す。図中、横軸は楔の周方向比透磁率 μ_{sx} であり、縦軸は楔の径方向比透磁率 μ_{sy} である。筆者等が提案した磁性楔は、楔を通過する漏れ磁束が大略周方向比透磁率 μ_{sx} によって決定されたと考え、径方向比透磁率 μ_{sy} を周方向比透磁率 μ_{sx} より大きくし、磁氣的に異方性を有するように構成する⁹⁾。磁気異方性楔は、漏れ磁束 ϕ_l を増加させずに、磁束の脈動率 β を低減できる磁性楔としての特性を示すことが期待される。

すなわち、楔の異方性比 k_μ を

$$k_\mu = \frac{\mu_{sy}}{\mu_{sx}} \quad (1)$$

のように定義すれば、 $k_\mu > 1$ の楔が検討対象の磁気異方性楔であり、以下ではこのような楔を開放スロットへ適用する際に必要な事項について検討した。

ここで、磁気異方性楔は、周方向比透磁率 μ_{sx} と径方向比透磁率 μ_{sy} が異なるため、 β と μ_{sx} 、 μ_{sy} との関係を明らかにすることが必要となる。以下においては、 β と μ_{sx} 、 μ_{sy} の関係を考察するため、磁気異方性楔の等価的な等方性相当の比透磁率（以下、等価比透磁率と称する） μ_{se} を考えてみた。ここで、考える等価比透磁率 μ_{se} は、磁束脈動率 β に対して適用することを想定し、以下に仮定したような磁路に対して考えた。

図3に等価比透磁率計算のために仮定した磁束の流れおよび磁路を示す。ここで、磁気異方性楔における等価比透磁率 μ_{se} は、以下のような仮定に従って求めた磁気抵抗から計算されるものとし、対向する側の鉄心はスロットを考えないものとした。

図3 等価比透磁率の解析モデル

Fig. 3. Analyzing model for equivalent relative permeability.

(1) abからadまでの磁気抵抗は、楔の周方向比透磁率 μ_{sx} のみに規定される。

(2) adからacまでの磁気抵抗は、楔の径方向比透磁率 μ_{sy} のみに規定される。

図中、斜線部の微小磁路について着目すれば、abからacまでの磁気抵抗 ΔR は、次式のようになる。

$$\Delta R = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{x}{\mu_{sx} \Delta y} + \frac{y}{\mu_{sy} \Delta x} \right) \quad (2)$$

ここに、 x ：微小磁路の x 方向位置、 y ：微小磁路の y 方向位置、 Δx ：微小磁路の x 方向幅、 Δy ：微小磁路の y 方向幅、 μ_0 ：真空透磁率

図中、 h 、 w は楔の厚みおよび幅であり、 $(y/x) = \{h/(w/2)\} = (\Delta y/\Delta x)$ の関係が明らかである。この関係を(2)式に代入して次式が得られる。

$$\Delta R = \frac{1}{\mu_0} \frac{x}{\Delta x} \left(\frac{\mu_{sy} w^2 + 4 \mu_{sx} h^2}{2 \mu_{sx} \mu_{sy} w h} \right) \quad (3)$$

(3)式中、 $\mu_{sx} = \mu_{sy} = \mu_{se}$ 、 $\Delta R = \Delta R_e$ と置き換え、次式が得られる。

$$\Delta R_e = \frac{1}{\mu_0} \frac{x}{\Delta x} \left(\frac{w^2 + 4 h^2}{2 w h \mu_{se}} \right) \quad (4)$$

(4)式において、 μ_{se} を等方性楔に換算した場合の磁気異方性楔の等価比透磁率とみなすためには、 $\Delta R = \Delta R_e$ の条件を満足する必要がある。この条件を適用し、(3)式と(4)式を μ_{se} について整理すれば、次式が得られる。

$$\mu_{se} = \mu_{sx} k_\mu \left(\frac{w^2 + 4 h^2}{k_\mu w^2 + 4 h^2} \right) \quad (5)$$

以上より、(5)式が磁束脈動率に対する等価的な比透磁率であると考えることができる。

以上の等価比透磁率の考えに基づき、以下では、開放スロット周りを解析領域とした2次元磁場の有限要素解析によって磁束分布を考察した。ここで、解析方法、境界条件等は前論文(7)により、寸法等の値は、次章に示す小形モデル機の固定子スロット周りの値を使用した。

図4は磁束の流れおよび対向する鉄心表面での径方向磁束密度 B_y の計算を示し、図中に各計算例の楔の比透磁率および(5)式によって計算される等価比透磁率 μ_{se} を示した。同図(a)は非磁性楔の場合の計算例であり、(b)～(d)は等価比透磁率 μ_{se} が略等しく異方性比 k_μ が異なる計算例である。また、図において x が0、8.44の位置は、それぞれ楔の中央部、ティースの中央部である。これらの計算例をみると、対向する鉄心表面の磁束密度分布は磁性楔を装着することにより平滑化されること、異方性比 k_μ が異なる場合でも等価比透磁率 μ_{se} が等しければ、磁束密度分布は大略一致していることがわかる。

上記の等価比透磁率の考えによれば、楔部を周方向に横切る漏れ磁束を規定すると考えられる周方向の比透磁率 μ_{sx} が一定の条件において、異方性比 k_μ が大きいほど、磁束脈動率を規定すると考えられる等価比透磁率 μ_{se} を大きくすることができる。したがって、 $k_\mu > 1$ の磁気異方性楔は、等方性楔に比較して漏れ磁束の発生を抑制しながらも、磁束脈動を低減する特性を示す磁性楔であると考えることができる。

3. 磁気異方性楔を適用した交流励磁形同期機の解析

本章では、前章の検討結果に対し、固定子および回転子スロットの双方を考慮した交流励磁形同期機の断面の磁場解析によって、磁気異方性楔の適用効果を数値的に検討する。すなわち、有力な電圧高調波の振幅、電圧の基本波成分の振幅、漏れ磁束などを計算し、交流励磁形同期機のスロットに磁気異方性楔を装着した場合の特性を解析する。

表1 小形モデル機の主要諸元

Table 1. Model machine Specifications.

項 目	固定子	回転子
鉄心外径 (mm)	650.0	576.8
鉄心内径 (mm)	580.0	475.0
スロット数	108	120
2極あたりスロット数	13.5	15.0
結線方法	1Y	1Y
極数	16	
ギャップ長 (mm)	1.6

図4 磁束の流れおよび磁束密度分布

Fig. 4. Calculated magnetic flux flow and magnetic flux density distribution.

表1に小形モデル機の主要諸元を示す。同機は、固定子、回転子とも開放スロット構造の交流励磁同期機を模擬するモデルとして製作されたものであり、以下の検討のための対象機とした。

<3・1> 電圧高調波に関する解析 本節では、電圧高調波および基本波と磁気異方性楔の透磁率の関係について考察した。まず、検討対象である小形モデル機の出力端子において有力な電圧高調波成分についてその発生機構を示しておく。すべりが1より十分小さい範囲で運転される交流励磁同期機の電圧高調波は、界磁巻線が直流で励磁された場合について検討すれば大略の傾向が把握できることから、以下では、界磁巻線が直流で励磁された場合に限定して考察する¹⁰⁾。

界磁巻線が直流励磁された場合の電機子相電圧 $e(t)$ は、次式となる¹⁰⁾。なお、次式は、スロットによる不連続性を無視した界磁起磁力分布、および回転子スロット、固定子スロットの数に対する基本波の脈動成分のみ考慮したパーミアンス分布を仮定し、近似式として誘導したものである¹⁰⁾。

$$e(t) = \sqrt{2} \frac{E}{f_{w1}} \left[f_{w1} \sin \omega t \right. \\ \left. \pm \sum_m \left\langle \frac{1}{k} f_{wk} \sin k \omega t \right\rangle \right]_{k=6m \pm 1} \\ \pm \frac{Q_r}{2} f_{w(1 \pm n_r)} \sin \{(1 \pm n_r) \omega t\} \\ \pm \sum_m \left\langle \frac{-Q_s}{2k(k - n_s)} \right. \\ \left. \times f_{w(k - n_s)} \sin k \omega t \right\rangle_{k=6m \pm 1} \quad (6)$$

ここに、 E ：基本波成分電圧実効値、 f_{wk} ： k 次空間高調波に対する電機子巻線係数、 n_r ：2極あたり回転子スロット数、 n_s ：2極あたり固定子スロット数、 Q_r ：回転子パーミアンス脈動係数、 Q_s ：固定子パーミアンス脈動係数、 t ：時刻、 ω ：角周波数

以下の解析において、小形モデル機の有力な電圧高調波は第14次成分であり、第14次成分は、その高調波次数と表1に示したスロット数からわかるように、(6)式第3項に示される回転子スロットによるパーミアンス脈動によって発生したものと考えられる。すなわち、以下に示される磁気異方性楔による電圧高調波の低減効果は、上記発生機構の高調波成分に対して得られるものである。

まず、モデル機の回転子スロットに磁気異方性楔を装着した場合を想定し、種々の周方向比透磁率 μ_{sx} 、径方向比透磁率 μ_{sy} に対する磁場を解析した。また、等価比透磁率 μ_{se} との関係についても併せて検討した。以下、電機子巻線の線間電圧において、第14次高調波成分の実効値を E_{14} 、基本波実効値を E_{11} と表記する。

図5(a)は第14次高調波スペクトラム(E_{14}/E_{11})と楔の周

方向比透磁率 μ_{sx} の関係であり、楔の異方性比 k_μ をパラメータとして示した。図をみると、異方性比が大きいほど同一の周方向比透磁率値での電圧高調波スペクトラムが小さいこと、電圧高調波スペクトラムを低減する効果において、周方向比透磁率値を増加したとき電圧高調波スペクトラムが減少する割合は、周方向比透磁率が小さい領域で顕著なことがわかる。同図(b)に第14次高調波スペクトラム(E_{14}/E_{11})と前章で定義した楔の等価比透磁率 μ_{se} の関係を示す。これをみると、高調波スペクトラムと等価比透磁率の関係は、楔の異方性比によらず単一の曲線で表現されることがわかる。

なお、図5に示された効果は、(6)式第3項における回転子スロットによるパーミアンス脈動係数 Q_r が、回転子スロットに磁気異方性楔を装着することによって低減されたために得られた効果であると考えられる。

図6(a)に電圧の基本波成分 E_{11} と楔の周方向比透磁率 μ_{sx} の関係を示し、楔の異方性比 k_μ をパラメータとした。異方性比 k_μ が一定のとき周方向比透磁率 μ_{sx} を増加すれば電圧の基本波成分が増加し、等価的にギャップ長が低減されていること、 k_μ が大きいほど同一値の μ_{sx} に対する基本波成分が大となることがわかる。また、比透磁率 μ_{sx} 、異方性比 k_μ ともある程度大きくなれば、その効果は略一定となっている。一方、同図(b)は電圧の基本波成

(a) 電圧高調波と周方向透磁率の関係

(b) 電圧高調波と等価透磁率の関係

図5 電圧高調波と回転子スロット楔比透磁率の関係

Fig. 5. Relation between voltage higher harmonic sequence and relative permeability of rotor slot wedge.

分 E_{i1} と楔の等価比透磁率 μ_{se} の関係を示したものである。図より、電圧基本波と等価比透磁率の関係は、楔の異方性比によらず単一の曲線で表現できることがわかる。

以上の計算によれば、回転子スロットに磁気異方性楔を装着し、回転子スロットによる磁場脈動を低減できることが確認された。また、磁気異方性楔を回転子スロットに装着したときの電圧高調波および基本波は、楔の異方性比に拘わらず、前章で定義した等価比透磁率で規定されることが明らかとなった。

次いで、以下においては、上記と同様の事項を、同一対象機の固定子スロット楔として磁気異方性楔を装着した場合について検討してみた。

図7(a)は第14次高調波スペクトラム(E_{i14}/E_{i1})と楔の周方向比透磁率 μ_{sx} の関係であり、楔の異方性比 k_μ をパラメータとして示した。図をみると、何れの異方性比 k_μ においても、 μ_{sx} が小さい領域では μ_{sx} の増加に対して高調波スペクトラムが減少する割合が大きいこと、異方性比 k_μ が大きいにほど同一の周方向比透磁率値での電圧高調波スペクトラムが小さいことがわかる。また、 μ_{sx} がある値をとるとき、高調波スペクトラムが零となり、更に μ_{sx} が大きくなれば、高調波スペクトラムが有限値となっている。以上の計算結果より、楔の異方性比を一定としたとき、対向するスロットによって発生する磁場脈動を低減するための最適な透磁率値が存在すると考えられる。同図(b)に第14次高調波スペクトラム(E_{i14}/E_{i1})と楔

(a) 電圧基本波と周方向透磁率の関係

(b) 電圧基本波と等価透磁率の関係

図6 電圧基本波と回転子スロット楔比透磁率の関係

Fig. 6. Relation between voltage fundamental sequence and relative permeability of rotor slot wedge.

(a) 電圧高調波と周方向透磁率の関係

(b) 電圧高調波と等価透磁率の関係

図7 電圧高調波と固定子スロット楔比透磁率の関係

Fig. 7. Relation between voltage higher harmonic sequence and relative permeability of stator slot wedge.

(a) 電圧基本波と周方向透磁率の関係

(b) 電圧基本波と等価透磁率の関係

図8 電圧基本波と固定子スロット楔比透磁率の関係

Fig. 8. Relation between voltage fundamental sequence and relative permeability of stator slot wedge.

の等価比透磁率 μ_{se} の関係を示す。これをみると、磁気異方性楔を固定子スロットに装着した場合においても、高調波スペクトラムと等価比透磁率の関係は、図5(b)と同様に、楔の異方性比によらず単一の曲線で表現されていることがわかる。

図7で低減された高調波は、前述のように主として(6)式第3項の成分であると考えられ、(6)式第4項における固定子スロットによるパーミアンス脈動係数 Q が低減された効果として説明することは困難である。その物理的な意味と高調波成分の低減効果が得られる条件については、別途、詳細な検討が必要であると考えられる。しかしながら、図7の結果を解釈すれば、磁気異方性楔はギャップを介して対抗するスロットによるパーミアンスの空間的な分布を改善する作用を有していることが推定される。

図8(a)に周方向比透磁率 μ_{sx} と電圧の基本波成分 E_{11} を示し、楔の異方性比 k_μ をパラメータとした。 k_μ が一定のとき μ_{sx} を増加すれば、電圧の基本波成分が増加していること、 k_μ が大きいほど基本波成分が大となることからわかる。同図(b)は電圧の基本波成分 E_{11} と楔の等価比透磁率 μ_{se} の関係であり、その関係は、楔の異方性比によらず単一の曲線で表現できることがわかる。これらの結果は、いずれも図6の回転子スロットを磁気異方性楔とした場合と同様な傾向を示していることがわかる。

このような固定子スロットに磁気異方性楔を装着した場合の計算結果より、磁気異方性楔は、楔を適用したスロットに対向するスロットによる脈動磁場を平滑化する効果を有すること、その場合の電圧高調波および基本波も、楔の異方性比に拘わらず、等価比透磁率で規定されることが明らかとなった。

以上、本節では、磁気異方性楔の脈動磁場を低減する効果および電圧基本波に対して等価的にギャップ長を低減する効果について検討した。更に、これらの効果と磁気異方性楔の等価比透磁率との関連を明らかにした。

<3・2> 漏れ磁束に関する解析 本節では、磁気異方性楔を回転子スロットまたは固定子スロットに装着した場合の漏れ磁束について、小形モデル機の断面での磁場解析によって検討する。

回転子スロットに磁気異方性楔を装着した場合について漏れ磁束を考える。磁場解析において、回転子内径部および固定子外径部の境界条件は固定境界とし、磁気ベクトルポテンシャル A を零とおくものとする。磁気異方性楔を装着した回転子側を励磁し、このときの回転子における磁気ベクトルポテンシャルの最大値を A_{rrm} 、固定子における磁気ベクトルポテンシャルの最大値を A_{rsm} とする。回転子側、固定子側を流れる磁束の最大値は、それぞれ A_{rrm} 、 A_{rsm} に比例すると考えられるため、漏れ磁束の割合を示す量として、次のような K_{lf} を考えることにする。

$$K_{lf} = \frac{A_{rrm} - A_{rsm}}{A_{rrm}} \quad (7)$$

すなわち、 K_{lf} は、回転子スロットに磁気異方性楔を装着した場合について、楔部の漏れを含む回転子スロット漏れおよび歯頭漏れを総括して計算した回転子側での漏れ磁束の割合と考えられる。

一方、固定子スロットに磁気異方性楔を装着した場合、楔を装着した固定子側を励磁し、回転子、固定子における磁気ベクトルポテンシャルの最大値をそれぞれ A_{rrm} 、 A_{asm} とし、 K_{lf} と同様な K_{la} を考えることにする。

$$K_{la} = \frac{A_{asm} - A_{rrm}}{A_{asm}} \quad (8)$$

K_{la} は、固定子スロットに磁気異方性楔を装着したときの固定子側での漏れ磁束の割合となる。

図9(a)は回転子スロットに磁気異方性楔を装着したときの楔の異方性比 k_μ と漏れ磁束の割合 K_{lf} を示し、同図(b)は固定子スロットに磁気異方性楔を装着したときの異方性比 k_μ と漏れ磁束の割合 K_{la} を示す。何れも、楔の周方向比透磁率 μ_{sx} をパラメータとして示した。図をみると、漏れ磁束は楔の異方性比 k_μ に殆ど依存せず、楔の周方向比透磁率 μ_{sx} のみに依存すること、漏れ磁束を抑制するためには楔の周方向比透磁率を小さくすることが有効であることがわかる。

図10は磁気異方性楔を装着したときの楔の周方向比

図9 磁気異方性楔の異方性比と漏れ磁束の割合の関係

Fig. 9. Relation between anisotropy rate of slot wedge and leakage flux rate.

透磁率 μ_{sx} と漏れ磁束の割合 K_{lf} , K_{la} であり、楔の異方性比 k_μ をそれぞれ1としたときについて示した。図より、計算した範囲では、楔の周方向比透磁率 μ_{sx} の増加に対し、漏れ磁束の割合 K_{lf} , K_{la} とも、略直線的に増加することがわかる。

4. 実測結果

本章では、前章までの検討に基づき、磁気異方性楔を試作し、小形モデル機の固定子スロット楔として使用した場合の高調波を実測することによって、適用効果を確認した。実測においては、前章に示した図5と図7の比較により、透磁率を最適値とすることによって、電圧高調波の振幅を略零とすることができると考えられる固定子スロット側に磁気異方性楔を装着した。

図10 磁気異方性楔の周方向比透磁率と漏れ磁束の割合の関係

Fig. 10. Relation between relative permeability of slot wedge and leakage flux rate.

図11 磁気異方性楔の断面構成および装着状況

Fig. 11. Structure of magnetically anisotropic slot wedge and stator slot wedge application.

図11(a)に試作した磁気異方性楔の断面構成を示し、同図(b)に磁気異方性楔を装着した小形モデル機の固定子スロット部を示す。磁気異方性材はガラス繊維層の間に鉄粉を充填して、エポキシ系樹脂を含浸し、更に加圧成形して作製したものであり、ガラス繊維層を積層した方向の透磁率が小さくなるような磁気異方性を示すように構成した。磁気異方性材の比透磁率は、等価的に16および5と実測された。これを、径方向の比透磁率が16、周方向の比透磁率が5となるように固定子スロット楔の大きさに加工し、モデル機の固定子スロットに装着した。

図12および図13に小形モデル機の磁束波形 ϕ および電圧波形 e を示す。ここで、磁束、電圧波形の計算は回転子移動を考慮した2次元磁場解析に基づいた⁽⁴⁾。これらを見ると、実測と計算はよく一致すること、磁気異方性を適用することにより非磁性楔を装着したときの有力な高調波成分が大幅に低減されることが確認された。また、本実測結果によれば、前章で考察したように、磁気異方性楔は楔を装着したスロットに対向するスロットによる高調波成分を低減できることが裏付けられた。

図12 小形モデル機の磁束波形

Fig. 12. Magnetic flux waveform of model machine.

図13 小形モデル機の電圧波形

Fig. 13. Voltage waveform of model machine.

5. あとがき

本論文では、磁気異方性楔を適用した交流励磁形同期機の電圧高調波の低減に関し、適用上の指針を得ることに主眼を置いて種々検討した。本論文の結論をまとめれば、以下ようになる。

(1) 磁気異方性楔は、スロットによる脈動磁場および等価ギャップ長の低減に有効であり、等方性楔に比較して漏れ磁束が抑制できることを、等価透磁率の概念を導入して示した。また、等価透磁率は、磁気異方性楔による電圧高調波および等価ギャップ長の低減効果を規定し、楔の異方性比によらないパラメータであることが明らかとなった。

(2) 磁気異方性楔は、楔を適用したスロット自身による脈動磁場および楔を適用したスロットに対向するスロットによる脈動磁場の双方を平滑化する効果を示すことが明らかとなった。

(3) 磁気異方性楔を装着した場合の漏れ磁束は、実用的には、楔の周方向比透磁率のみに依存していると考えて支障ないと判断できる。

(4) 磁気異方性楔を試作するとともに、モデル機の固定子スロットに試作楔を装着し、電圧波形に含まれる有力高調波を低減できることが確認された。

ところで、(2)の結論のうち、楔を適用したスロットに対向するスロットによる脈動磁場を低減する効果は、本論文の検討範囲で、その物理的意味およびその効果の得られる条件は明確とならなかった。本件を解明することは、今後の課題として残されていることを記しておく。

しかしながら、(2)の結論は、回転時の遠心力を負わない固定子側に磁性楔を装着し、回転子スロットによる脈動磁場を等価的に低減できることを示したものであり、機械的な観点からも有用な知見であると思われる。

更に、楔は回転機全体からみて重量、コスト的に無視できる程度の要素部品に過ぎない。しかし、これを磁気異方性楔とすれば、本論文のような性能改善が期待され、その開発メリットは大きいといえる。

本研究を進めるにあたり、御協力頂いた日立製作所日立工場八坂保弘主任技師に御礼申し上げる。

(平成5年9月1日受付、平成6年1月10日再受付)

文 献

- (1) 井出・高橋・伊藤・辻・八坂・藤本：「交流励磁形同期発電機の出力端子電圧における高調波とその評価方法」，電学論D，111，8（平3）
- (2) B. J. Chalmer and J. Richardson："Performance of Some Magnetic Slot Wedges in An Open Slot Induction Motor"，*Proc. of IEE*, 114（1967）

- (3) 中野：「磁性楔の研究」，安川電機，34，3（昭45）
- (4) 加藤・河面・ト部・高橋：「電機子みぞ高調波磁束に起因する高調波鉄損の磁性楔による軽減効果の理論的，実験的研究」，電学論B，102，10（昭57）
- (5) 磯部・竹本：「磁性楔を用いた回転機鉄心のカータ係数」，電学論B，106，10（昭61）
- (6) A. Kaga, Y. Anazawa and H. Akagami："The Efficiency Improvement of Capacitor Motor with Ferrite Magnetic Wedges"，*IEEE Trans. on Magn.*, 22, 5（1986）
- (7) M. Watanabe, K. Ide, M. Takahashi and N. Takahashi："Magnetically Anisotropic Slot Wedges for Rotating Machines"，*ibid.*, 26, 2（1990）

井出 一正（正員）昭和39年1月5日生。63年3月東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士前期課程修了。同年4月（株）日立製作所入社。日立研究所勤務。回転電気機械の研究に従事。現在，同所研究員。日本応用磁気学会会員。平成4年電気学会論文発表賞，平成5年電気学会論文賞受賞。

渡部 正敏（正員）昭和17年4月21日生。36年3月基督教独立学園高校卒業。同年4月（株）日立製作所入社。日立研究所に勤務し，回転電気機械の研究に従事。その間42年茨城大学工業短期大学電気工学科卒業。平成元年3月同社生産技能研修所教授，現在に至る。平成元年電気学会論文賞受賞。

佐藤 征規（正員）昭和18年5月26日生。34年4月（株）日立製作所入社。日立工場を経て日立研究所に勤務し，回転電気機械の研究に従事。その間47年日立製作所茨城工業専門学校電気工学科卒業。現在に至る。

高橋 身佳（正員）昭和24年5月11日生。47年3月秋田大学鉱山学部電気工学科卒業。同年4月（株）日立製作所入社。日立研究所勤務。回転電気機械の研究に従事。現在，同所主任研究員。工学博士。日本応用磁気学会，IEEE会員。平成元年電気学会論文賞受賞。

高橋 典義 (正員) 昭和10年3月1日生。34年3月東北大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)日立製作所入社。日立研究所に勤務し、回転電気機械の研究に従事。平成2年4月茨城大学教育学部教授、現在に至る。工学博士。平成元年電気学会論文賞受賞。