

インバータ駆動誘導電動機の軸電圧

奥山 吉彦 (おくやま よしひこ)

藤井 秀樹 (ふじい ひでき)

1 まえがき

PWM (Pulse Width Modulation) インバータの技術進歩により、誘導電動機の可変速運転はますます増加傾向にある。省エネルギーを目的とする用途や、従来直流電動機が用いられていた用途にまで PWM インバータと組み合わせた誘導電動機が採用されている。

その反面、PWM インバータ電源に起因する電動機への特有の問題が生じてきている。特に、インバータサージによる電動機絶縁の早期劣化や軸電圧の増加などがこれに相当する。これらの現象は、電動機の信頼性にかかわる重要な問題である。

本稿では後者の軸電圧について発生機構を明らかにし、軸電圧に関する等価回路を導き、測定結果と比較してこの発生機構の正しさが証明できたので紹介する。

2 PWM インバータと電動機巻線電位⁽²⁾

商用電源の場合には、各相の電圧の和は常に零であり、巻線中性点電位は大地電位となる。しかし、PWM インバー

タの場合は巻線中性点電位は零にはならず、有限の値をとる。この電圧をコモンモード電圧という。軸電圧はこのコモンモード電圧に起因している。

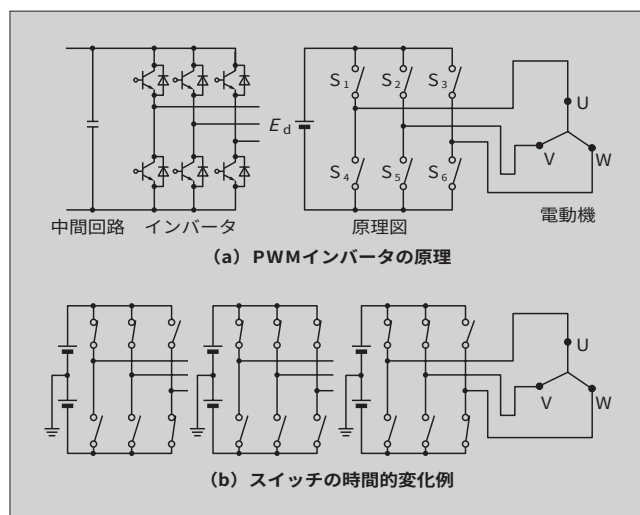
2.1 電動機巻線の中性点電位

PWM インバータは、コンバータ部で順変換された直流電圧をインバータ部でパルス幅変調をして可変電圧可変周波数の交流電源を得る装置である。

図1(a)には、PWM インバータの原理を示す。6個の半導体素子を $S_1 \sim S_6$ のスイッチで示してある。この6個のスイッチを一般的には、三角波の搬送波と正弦波の信号波の大小関係により開閉し、中間回路の直流電圧 E_d のパルス幅を適切にすることにより等価的な基本波正弦波電圧を得ている。図1(b)にはスイッチ開閉の時系列的变化例を示す。この図の右端の状態では、U、V 相端子の電位は $+1/2E_d$ 、W 相端子は $-1/2E_d$ であるので、電動機巻線中性点電位は $+1/6E_d$ となる。

図2は、過変調方式が採用された場合の中性点電位のパターンを示すもので、中性点電位は $-1/2E_d$ 、 $-1/6E_d$ 、 $+1/6E_d$ 、 $+1/2E_d$ の値を取り、3倍の基本波周波数で時間的に変化する。

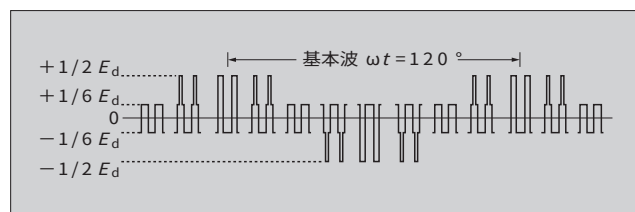
図1 PWM インバータの原理と巻線電位



2.2 電動機内部の電位分布と等価回路

電動機巻線と大地間にはいろいろな電気部品がある。巻線中性点電位が大地へ至る回路は二つある。一方は巻線→固定子鉄心→フレームであり、もう一方は巻線→固定子鉄心→回転子鉄心→軸→軸受→ブラケットである。これらの部品は電氣的に静電容量や抵抗で結合されており、図3は

図2 中性点電位のパターンと時間的变化



奥山 吉彦

誘導機の電気設計、回転電気機械の技術開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所回転機技術開発研究所主幹技師。



藤井 秀樹

誘導電動機の開発設計に従事。現在、三重工場回転機設計部。

図3 軸電圧に対する電動機の回路

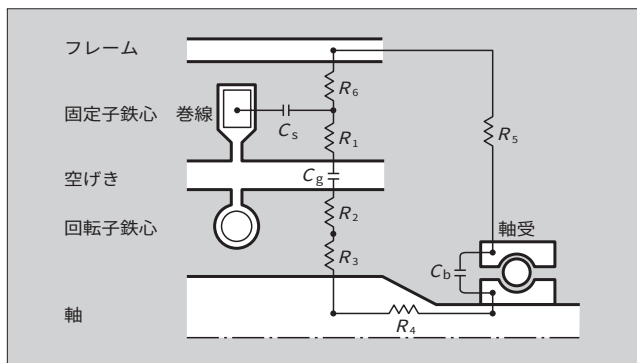
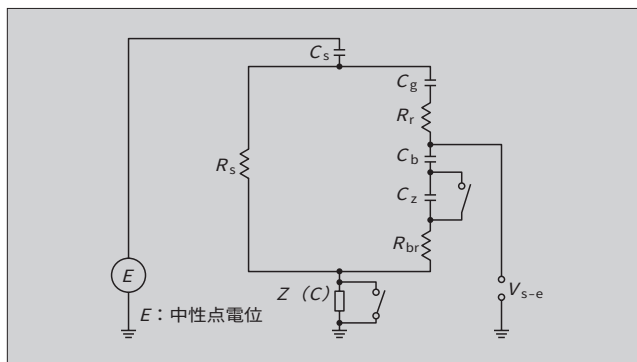


図4 軸電圧に対する等価回路



この様子を示すものである。

図中 C_s は固定子巻線と鉄心間の静電容量、 C_g は固定子鉄心と回転子鉄心間の静電容量、 C_b は軸受の内輪と外輪間の静電容量、 $R_1 \sim R_6$ は各点を結ぶ抵抗を表している。したがって、電動機の軸電圧に対する等価回路は、 $R_1 \approx 0$ 、 $R_2 + R_3 + R_4 = R_r$ 、 $R_5 = R_{br}$ 、 $R_6 = R_s$ とすると図4で表される。図中スイッチの記号を付けた C_z (軸絶縁) や C (フレーム一定盤間の絶縁物) は、軸電圧検証用の静電容量である。

R_s は積層されたケイ素鋼板とフレームの抵抗であるので、 C_g 、 R_r 、 C_b 、 R_{br} で構成されるブランチの全インピーダンスに比較して十分小さく、式(3)の仮定が成り立つとすると、 C_z や C は短絡されている場合の軸-大地間電圧 (V_{s-e}) と軸-ブラケット間電圧 (V_{s-br}) は次式で表せる。

$$V_{s-e} = E_s \frac{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$V_{s-br} = E_s \frac{\frac{1}{j\omega C_b}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{ここで、} E_s = \frac{R_s}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}}$$

$$\text{仮定：} R_s \ll R_r + R_{br} + \frac{1}{j\omega C_g} + \frac{1}{j\omega C_b} \quad \dots\dots\dots(3)$$

図5 試験装置結線図

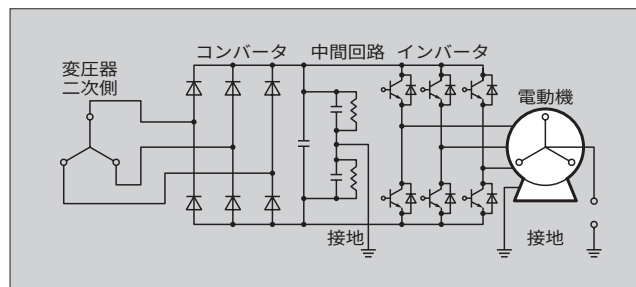
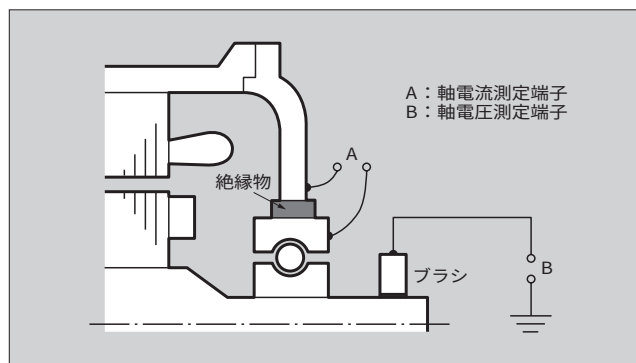


図6 軸電圧・軸電流測定装置



③ 軸電圧の測定⁽²⁾

②章では PWM インバータ駆動誘導電動機の軸電圧の発生機構と等価回路について述べた。この考え方の妥当性を検証するために、3.7 kW、200 V、50 Hz、4 極機、密封形玉軸受使用の全閉かご形誘導電動機を用いて軸電圧の測定を行った。

3.1 試験装置の概要

軸電圧を測定した試験装置の概要を図5に示す。被試験機、PWM インバータ、変圧器の仕様を以下に記す。

3.1.1 被試験誘導電動機の仕様

発生機構の証明や等価回路定数の決定のため、被試験機には次の処置をした。

- (1) 中性点電位を測定するために巻線中性点を引き出した。
- (2) 軸電流測定用として図6に示すような軸絶縁を施し、軸受外輪とブラケットから端子を引き出した。
- (3) 電動機の高圧状態を作るためにエポキシガラス積層板を用いた (フレーム脚と定盤間に挿入)。

3.1.2 PWM インバータの仕様

出力：33 kVA、搬送波周波数：15.6 kHz、出力電圧：200 V、中間回路電圧：280 V_{dc} のインバータを使用した。

なお、PWM インバータの直流中間回路の平滑用コンデンサには、図5に示すように2個のコンデンサを直列接続し、その中点を接地して電位の基準点とした。

3.1.3 変圧器仕様

出力：10 kVA、変圧比：400 V/200 V、三相、二次側結線：Y 結線、出力電圧：200 V である。

図7 電動機端子部線間電圧

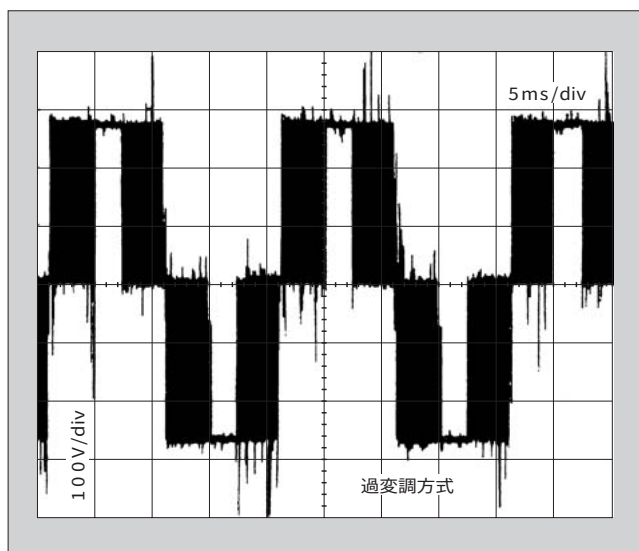


図9 電動機巻線中性点電位

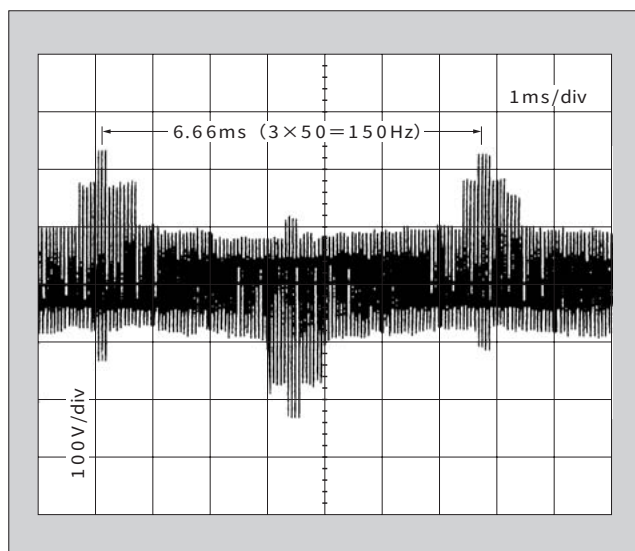


図8 インバータ中間回路電圧

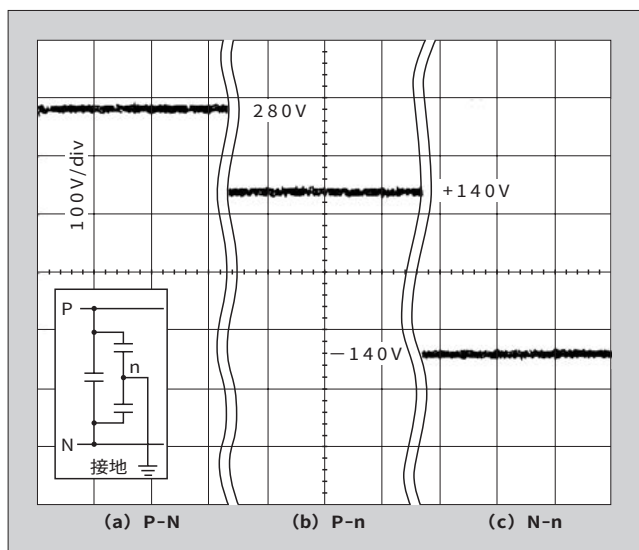
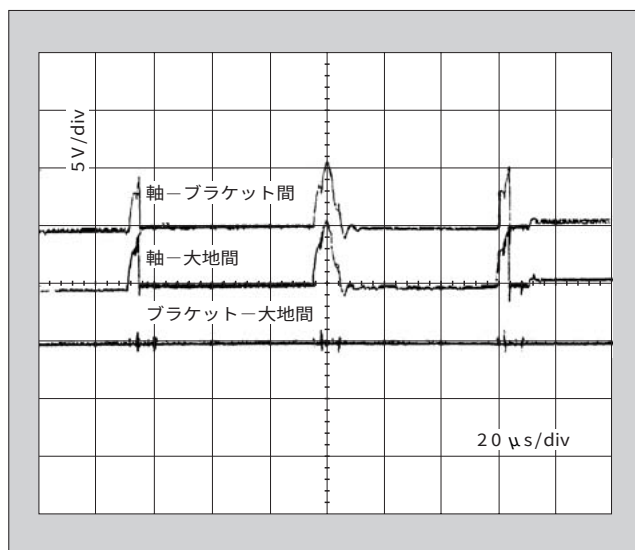


図10 軸―大地，軸―ブラケット，ブラケット―大地間電圧



3.2 測定項目

測定項目は以下の5項目である。

- (1) 電動機端子部線間電圧の測定
- (2) 直流中間回路電圧の測定
- (3) 巻線中性点電位の測定
- (4) 各種条件時の軸電圧の測定
- (5) 軸電流の測定

3.3 測定結果

測定は電動機単体ですべて基本波周波数 50 Hz にて実施した。

3.3.1 電動機端子部線間電圧

図7は線間電圧のオシログラムで髭（ひげ）状電圧はインバータサージである。サージを除く波高値は約 280 V になっており、インバータ入力電圧 200 V の $\sqrt{2}$ 倍に一致している。

3.3.2 直流中間回路電圧

図8(a)は中間回路 P-N 間電圧で、理論どおり 280 V である。図8(b)は P-n 間、図8(c)は N-n 間の電圧であり、正しく 2 等分されている。

3.3.3 巻線中性点電位

図9は巻線中性点電位のオシログラムである。中性点電位の包絡線の周波数は 3×50 Hz で最大値は 140 V になっており、図2の理論値とよく一致している。ただしインバータサージが発生しており、髭状のピーク値は 200 V 以上になっている。

3.3.4 各種条件時の軸電圧の測定

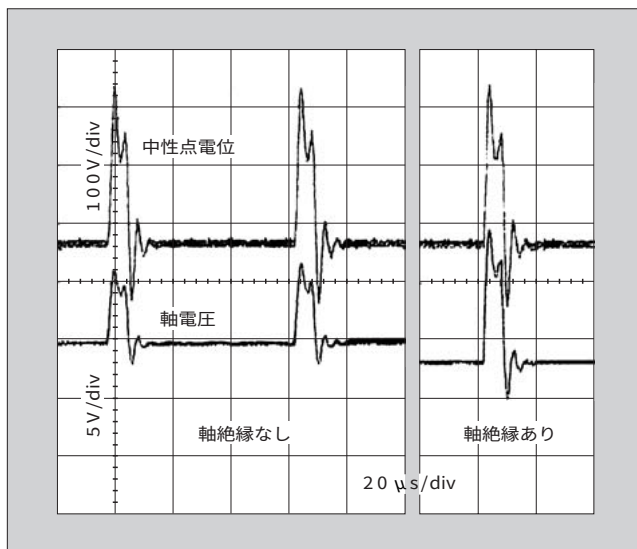
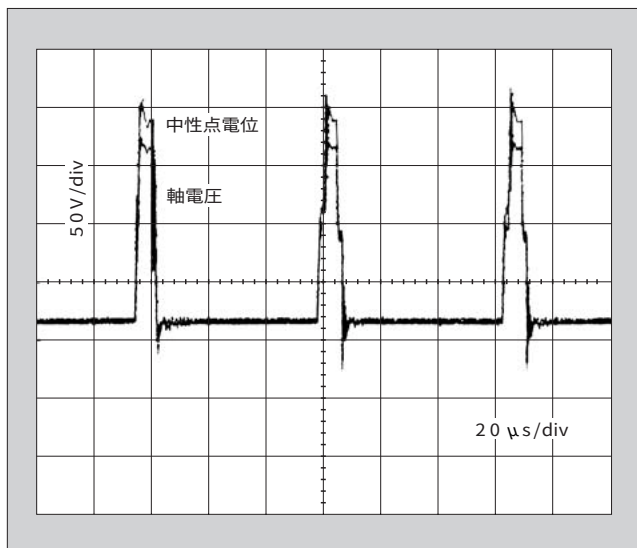
- (1) V_{s-e} , V_{s-br} , V_{br-e}

図10は軸絶縁を短絡し、電動機は接地した状態での V_{s-e} , V_{s-br} , V_{br-e} (ブラケット―大地間電圧) を測定したオシログラムである。 V_{s-e} と V_{s-br} は約 5.4 V, V_{br-e} は約 1 V である。

- (2) 軸絶縁挿入有無による軸電圧

電動機は接地し、軸絶縁を挿入したときと短絡したとき

図 11 軸絶縁挿入有無による軸電圧

図 12 インピーダンス $Z (=1/\omega C)$ 挿入時の軸電圧

の軸電圧のオシログラムを図11に示す。同一の中性点電位に対し、軸絶縁挿入時の軸電圧は短絡時の軸電圧の約2倍になっている。

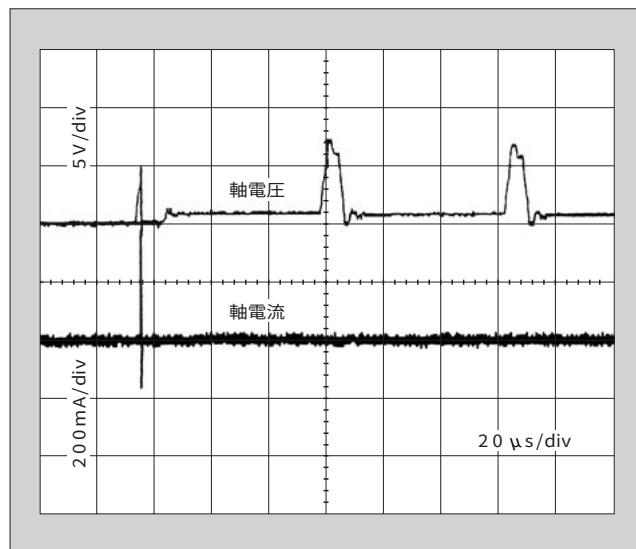
(3) 電動機非接地状態における軸電圧

3.3.1 項の(3)に述べたエポキシガラス積層板を電動機フレームと定盤間に挿入し、軸絶縁は短絡して軸電圧を測定した。図12は、この軸電圧と中性点電位を同一オシログラム上で示した測定結果である。中性点電位の約90%弱の軸電圧となっている。

3.3.5 軸電流の測定

図13は電動機を接地し、軸絶縁も短絡した状態における軸電流のオシログラムである。図には軸電圧も同時に示しているが、軸受の潤滑剤であるグリースの絶縁性が維持されているときには約40mAとわずかししか流れない。しかし局所的に潤滑剤の絶縁が破壊されたり、メタルコンタクトが発生すると、瞬間的に1A近い軸電流が観測され、このときには軸電圧は短絡され消滅する。図の軸電圧の左

図 13 軸電流と軸電圧



側が小さくひずみ、軸電流が髭状に約400mAも流れているのは、この現象を示すものである。

4 測定結果の考察⁽²⁾

上記の測定結果を基にして、軸電圧の等価回路の妥当性と回路定数の値について以下に検討する。

検討にあたって下記の仮定を置いた。

- (1) 静電容量の C_s , C_g , C_b , C_z (軸絶縁), C (エポキシガラス積層板) は計算値を採用する。なお, C_b としては, 0.2nF/個を採用する。
- (2) 静電容量のインピーダンス計算の周波数としては, 素子 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の立上り時間を 0.1 μs として, $f = 2.5$ MHz を採用した。

4.1 PWM インバータ駆動時軸電圧の発生機構

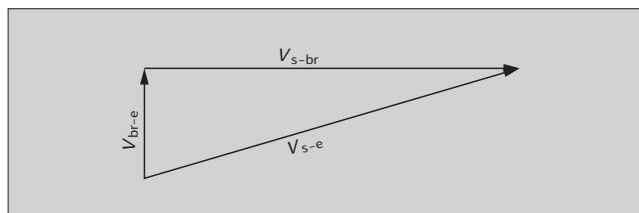
電動機と定盤間に静電容量を挿入することにより、測定結果(図12)が示すように、接地されたときに比較し軸電圧が非常に大きくなる。これは図4の等価回路から容易に推定される。すなわち、挿入静電容量 C のインピーダンス (250 Ω) が R_s (1.4 Ω) に比較して非常に大きいため、中性点電位の大部分をこの C が分担するからである。この事実は2.2節に述べたPWMインバータの軸電圧発生機構が正しいことを証明している。

4.2 各静電容量

図4の等価回路定数の静電容量は、 $C_s = 4.08$ nF, $C_g = 1.02$ nF, $C_b = 0.4$ nF である。なお、軸絶縁の静電容量 $C_z = 0.104$ nF、電動機と定盤間に挿入するエポキシガラス積層板の静電容量は $C = 0.254$ nF である。

したがって、それぞれのインピーダンス値は $f = 2.5$ MHz とすると $1/\omega C_s = 16$ Ω, $1/\omega C_g = 63$ Ω, $1/\omega C_b = 160$ Ω, $1/\omega C_z = 610$ Ω, $1/\omega C = 250$ Ω となる。これらの回路定数は既知として各種条件時の軸電圧測定結果から抵抗

図14 軸電圧ベクトル図



値を以下に求める。

4.3 抵抗値 R_{br}

図10の測定結果から、 R_{br} が特定できる。すなわち、 V_{s-e} (約5.4V強)、 V_{s-br} (約5.4V弱)、 V_{br-e} (約1V) は、等価回路から図14のベクトル図となる。したがって、次式が成り立つので既知の $(1/\omega C_b)^2 = (160)^2$ を代入すると、 R_{br} が求まる。

$$\frac{R_{br}}{\sqrt{R_{br}^2 + \frac{1}{(\omega C_b)^2}}} = \frac{1}{5.4} \quad R_{br} = 30 \, \Omega \quad \dots\dots\dots(4)$$

4.4 抵抗値 R_r

図11は軸絶縁を挿入したときの軸電圧 (11.3V) と短絡したときの軸電圧 (6.7V) の測定結果である。式(3)の仮定が成り立つとすると、両軸電圧の比は次式となる。既知の定数 $R_{br}=30 \, \Omega$ と、4.2節の静電容量から $R_r=180 \, \Omega$ が求まる。

$$\frac{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_z}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_z} + \frac{1}{j\omega C_g}} \cdot \frac{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}}{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b}} = \frac{11.3}{6.7} \quad R_r = 180 \, \Omega \quad \dots\dots\dots(5)$$

4.5 抵抗値 R_s

R_{br} と R_r が求まったので、 C_z を短絡したときの軸電圧 6.7V (図11) を式(1)に代入し $R_s = 1.4 \, \Omega$ が求まる。

$$V_{s-e} = \frac{R_s}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}} \cdot \frac{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}} = 6.7 \, V \quad R_s = 1.4 \, \Omega \quad \dots\dots\dots(6)$$

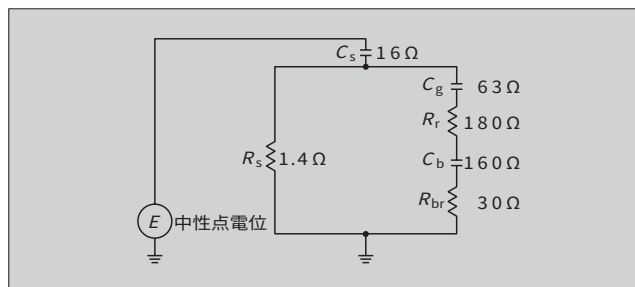
R_s と並列回路を作るもう一つのブランチのインピーダンスに比べ R_s は非常に小さく、式(3)の仮定が満足していることが証明された。

4.2節および4.3～4.5節で回路定数が求まり、被試験機の軸電圧の等価回路は図15となる。

4.6 等価回路および定数の妥当性

図15の等価回路を用いエポキシガラス積層板 ($Z=1/\omega C$) を電動機フレームと定盤間に挿入したときの軸電圧 120V (図12) は、次式を用いた計算値 132V とほぼ一致し、この等価回路と回路定数が現象を正しく表しているこ

図15 被試験機の等価回路と定数



とが証明された。

$$V_{s-e} = E_z + E_s \frac{R_{br} + \frac{1}{j\omega C_b}}{R_{br} + R_r + \frac{1}{j\omega C_b} + \frac{1}{j\omega C_g}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 $E_z = \frac{Z}{Z_{sc} + Z_s + Z} E$

$$E_s = \frac{Z_s}{Z_{sc} + Z_s + Z} E$$

$$Z_{sc} = \frac{1}{j\omega C_s}$$

$$Z_s \approx R_s$$

5 寿命試験

商用電源で誘導電動機を駆動したとき、主に磁気回路の磁気不平衡により大なり小なり軸電圧が発生する。この軸電圧の許容値は一般的に0.3V (実効値) 程度である。一方、PWM インバータで駆動したときの軸電圧は前述のように6.7V (ピーク値) とけた違いに高いが、両者の値を単純には比較できない。商用電源駆動時の軸電圧の周波数は商用周波数の数倍であるのに対し、インバータ電源駆動の場合は数十kHz～MHzのオーダーとなるため、軸受潤滑剤のグリースや潤滑油の高周波絶縁耐力が大きく異なるからである。

すでに多数のPWM インバータ駆動誘導電動機がフィールドで健全に運転されている。しかし、より信頼性の高い電動機とするためだけでなく、近い将来インバータの高電圧化が予想されるので、富士電機では高周波の軸電圧に対する耐力と対策の効果を調査把握するために、16台の電動機にて寿命試験を行っている。その内訳は電圧 (200V, 400V)、接地条件 (接地の有無)、被駆動機模擬条件 (ポンプなど)、対策 (接地ブラシ、フィルタなど) などの条件を組み合わせた16台である。図16にその外観を示す。

現在まで2年弱を経過しているが、いずれも異常音などの発生もなく運転を継続中である。

6 結 論

PWM インバータ駆動時の誘導電動機の軸電圧発生機構

図 16 寿命試験の外観



を述べ軸電圧に対する電動機等価回路を提案し、実機による測定結果によってその妥当性を証明した。結論として、

- (1) PWM インバータ駆動時の軸電圧は、電動機巻線の中性点電位が電動機を構成する部品間の静電容量や抵抗にて分担することにより発生し、図 4 の等価回路にて解析することができる。
- (2) 固定子鉄心とフレームの抵抗 R_s は高周波に対し 1.4 Ω 程度である。この値は発生する軸電圧に大きく影響する。式(2)の軸電圧 V_{s-br} を低減するには、軸絶縁などの挿入により R_s 回路と並列のブランチのインピーダンス

を増加する方法も有効である。

- (3) 接地抵抗 Z は軸電流の抑止に大きく影響する。すなわち、 Z が大きいと軸電流は小さくなる。
- (4) 商用周波数に対してはインピーダンスが小さく十分な接地となり、高周波に対してはインピーダンスが大きくなる作用をするリアクトルを接地用に使用することは一つの対策であるが、電動機のフレームの電圧が上昇する。

7 あとがき

PWM インバータ駆動誘導電動機の軸電圧について述べた。本稿が誘導電動機設計技術者や電動機を使用される方々に多少でも役立てば幸いである。

本稿をまとめるにあたり、関東学院大学森安正司教授にご援助いただいたことに深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 奥山吉彦・藤井秀樹：インバータサージの挙動解析，富士時報，Vol.69，No.11，p.598-602（1996）
- (2) 奥山吉彦ほか：インバータ駆動電動機の軸電圧，電気学会回転機研究会資料 RM-98-107（1998）
- (3) Erdman, J. M. : Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages. IEEE Trans. Vol.32, No.2（1996）

~~~~~



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。