誘導機の鉄心磁化特性の一推定法

正 員 田 村 淳 二 (北見工大)

正 員 武 田 郁 夫 (北見工大)

An Estimation of Core Magnetization Characteristics of Induction Machines

Junji Tamura, Member, Ikuro Takeda, Member (Kitami Institute of Technology)

キーワード：誘導機，無負荷試験，励磁リアクタンス，磁化電流，鉄損抵抗，機械損

誘導機のより正確な特性算定を目的として鉄心の磁気飽和を考慮するための検討が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。この場合，鉄心磁化特性を実験的に求める必要があるが，この方法に関する検討例は比較的少ない。本報告は，励磁リアクタンスの磁化電流に対する飽和特性を無負荷試験により合理的に求める手法を提案する。

図1のT形等価回路において s は滑り， r_1, r_2 は一次，二次の巻線抵抗， x_1, x_2 は漏れリアクタンス， X_M, R_M は励磁リアクタンス，鉄損抵抗を表すとする(二次側量は一次側換算値)。本報告の主題は X_M と磁化電流 I_M の関係を求めることであり，更に R_M および機械損の合理的な推定法についても考察する。なお r_1, x_1 の値は，JEC-37⁽³⁾にも示されているように，既にブリッジ法や拘束試験により得られているものとし，また漏れリアクタンスにおける飽和は考察の対象外とする。以下において電圧は相電圧，電力は一相あたりの量を表すものとする。

無負荷試験時においては $s=0$ であるので

$$x_2 \ll (r_2/s) \dots\dots\dots (1)$$

が十分に成立し，よって x_2 を無視して図1の破線で囲まれた部分を抵抗のみからなる回路とみなすことができる。ここで，一次入力を P_1 とすると，各測定値より次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} R_m &= (P_1/I_1^2) - r_1 \\ X_m &= \sqrt{(V_1/I_1)^2 - (P_1/I_1^2) - x_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \therefore R_m' &= 1/\text{Real}[1/(R_m + jX_m)] \\ X_m &= -1/\text{Imag}[1/(R_m + jX_m)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで， R_m' は R_m と (r_2/s) の並列抵抗を表す。更に，磁化電流 I_M および X_M の両端の電圧 V_M は

$$I_M = I_1 R_m' / \sqrt{R_m'^2 + X_m^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$V_M = I_M X_M \dots\dots\dots (5)$$

図1 誘導機の等価回路

Fig.1. Equivalent circuit of induction machines.

と得られる。 V_M は主磁束によって発生する一次側誘導電圧に等しい。以上の計算を各 V_1 での測定値に適用して I_M と X_M の鉄心飽和特性が得られる。従来の算定法⁽³⁾⁽⁴⁾では機械損を先に分離して定数決定の計算を行う形になっているが，本法では機械損を含めて扱う点異なる。以上の展開から明らかなように，得られる算定結果は(1)式の妥当性，および r_1, x_1 の値が妥当であるとの前提(この前提はJEC-37などの算定法においても同様に必要である)のもとで回路論的に合理的である。なお，鉄心の磁化電流として一次電流の無効分を取る方法もあるが⁽⁵⁾，誘導機のベクトル図から明らかなように端子電圧に対する無効分電流は厳密には磁化電流に等しくない。

X_M の飽和特性を別個に求めることが可能な巻線形誘導機(200 V, 2.2 kW, 4極)を用いて無負荷試験を行った。本手法により求めた結果と，静止時に二次側を開路して一次電圧を変化させ(励磁リアクタンスの特性においては基本的に回転時と同じであると考えられる)，(2)～(5)式と同様な計算により求めた結果を図2に示す。両者は非常によく一致している。

図 2 実験結果
Fig. 2. Experimental results.

従来より、無負荷試験における機械損分離の具体的方法は多少あいまいであるが、以上の展開を基礎として次のような R_M および機械損の推定法を考えると、二次入力を P_2 、鉄損を P_i とすると、

$$P_1' = P_1 - r_1 I^2 = P_i + P_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

が成り立つ。 P_i は図 1 より

$$P_i = V_M^2 / R_M = (I_M X_M)^2 / R_M \quad \dots\dots\dots (7)$$

と表される。一方、 $s=0$ における機械損を P_{MLO} とし、機械損 P_{ML} が回転数の n 乗に比例するとすると

$$P_{ML} = (1-s)^n P_{MLO} \quad \dots\dots\dots (8)$$

と表すことができ、更に P_2 と P_{ML} に関して

$$P_{ML} = (1-s) P_2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

の関係があるので、以上(6)~(9)式より次式を得る。

$$P_1' = (1/R_M) V_M^2 + (1-s)^{n-1} P_{MLO} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 P_1' 、 V_M 、 s は測定値より得られ、 R_M 、 P_{MLO} が未知数となる。よって、無負荷試験データに最小二乗法を適用してこれらの値を推定することができる。 n の値は 1 [文献(3), p.96] あるいは 2 とする⁽¹⁾ ことが提言されているが、 $s \neq 0$ であるので $n=1$ として(10)式を次式のように簡略化してもその誤差は小さいと考えられる。

$$P_1' = (1/R_M) V_M^2 + P_{MLO} \quad \dots\dots\dots (11)$$

なお、従来の機械損分離法[例えば文献(5), (6)]においては、鉄損が端子電圧の 2 乗にほぼ比例するとして

$$P_i' = K_i V_1^2 + P_{ML} \quad \dots\dots\dots (12)$$

と置き、 P_{ML} が一定と仮定して P_{ML} を求めている。と

ころがこれは、(11)式との対応から、 $n=1$ であると仮定して P_{MLO} を求めることに等しい。(12)式のように鉄損が V_1^2 に比例すると仮定する根拠は、渦電流損、ヒステリシス損ともに磁束密度の 2 乗にほぼ比例することであり、このことを基礎とすれば、主磁束に比例する一次側誘導電圧 V_M を用いて鉄損を表す(11)式のほうがより合理的であると考えられる。なお、実負荷試験をもとにした本法の妥当性の検討結果については稿を改めて報告する。

最後に、日ごろより御指導いただき、北海道大学工学部長谷川 淳教授に感謝いたします。

(平成 2 年 12 月 14 日受付)

文 献

- (1) 三木、他：「磁気飽和を考慮した誘導電動機の等価回路定数決定の一手法」、電学論 B, 98, 503 (昭 53-6)
- (2) 岸本：「磁気飽和を考慮した誘導電動機のシミュレーションモデル」、同上 B, 106, 339 (昭 61-4)
- (3) 「誘導機」JEC-37 (昭 54) 電気学会
- (4) "Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators", IEEE Standard 112-1984
- (5) 「変圧器・誘導機・交流整流子機」、電気学会大学講座 (昭 42) 電気学会
- (6) S. A. Nasar: Handbook of Electric Machines (1987) McGraw-Hill

田 村 淳 二 (正員)

武 田 郁 夫 (正員)

昭和 32 年 1 月 17 日生。54 年 3 月室蘭工業大学電気工学科卒業。59 年 3 月北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。同年 4 月北見工業大学講師、61 年 4 月同助教授となり、現在に至る。工学博士。IEEE 会員。

昭和 6 年 8 月 15 日生。29 年 3 月北海道大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月北海道炭鉱汽船(株)入社。38 年 4 月北見工業短期大学講師、43 年北見工業大学助教授、49 年 10 月同教授となり、現在に至る。工学博士。