UDC 621.313.32.018.5: 621.3.013.8.015: 621.3.018.33

論文

61-B37

非同期化同期機の特性に及ぼす励磁電圧高調波の影響

正員 坪井 和 男 (中部大)

准員 松浦 秀 実 (中部大)

1. ま え が き

本論文で取り扱う非同期化同期機(以下、ASM と略記する)とは、固定子に三相電機子巻線、回転子に互いに電気角 $\pi/2$ (rad) 隔てた二相界磁巻線を有し、制動巻線を有さない構造の同期機である。一般に電機子巻線に平衡三相電圧、界磁巻線に滑り周波数の平衡二相電圧を加え(交流励磁する)、同期速度以外の任意の非同期速度においても、固定子側と回転子側との磁界を強制的に同期させ、可変速度の同期機として運転させるものである⁽¹⁾。もちろん、原理的に回転子巻線に三相巻線を施し、滑り周波数の平衡三相電圧を加えても同じことである。

筆者らは既に時間的基本波のみを考慮した ASM の基本特性を解析し、励磁電圧の周波数、大きさおよび位相の適切な制御により、可変速度の同期機として種々の用途に有用であることを示した⁽²⁾。すなわち、揚水発電、風力発電、潮流発電などの可変速度周波発電機⁽³⁾⁻⁽⁷⁾、低速同期電動機⁽⁸⁾、周波数変換機⁽⁹⁾、フライホイール駆動用回転機⁽¹⁰⁾などの用途が考えられ、実用に向けての基礎研究が盛んに行なわれている。

回転子巻線の可変周波数励磁電源として、インバータ⁽³⁾、サイクロコンバータ⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾あるいは、2台の ASM を用いた回転機からのブラシレス励磁⁽⁹⁾が提案されている。いずれにせよ、励磁電源には時間高調波が含まれ、それが ASM の特性に悪影響を及ぼすが、筆者の知る限りその解析方法も提案されておらず、このような場合の物理現象も不明であり、しかも具体的な検討もなされていない。

本論文においては、まず任意のひずみ波電圧を二相

界磁巻線に加えたときの一般的な解析理論を展開し、電流およびトルクなどの物理現象を明確にするとともに、その定量的算定法を明らかにする。次に具体例として、試作した ASM の界磁巻線に方形波の二相電圧を加えたときの特性に及ぼす影響を定量的に解析し、ひずみ波電圧で励磁する際に問題となる振動性トルクの影響などを明らかにする。

なお、本論文は回転機研究会資料⁽¹¹⁾を基にし、更に整理、加筆したものである。また、本解析手法は回転子に三相巻線を有する、いわゆる交流励磁同期機⁽¹²⁾に対する時間高調波の解析などにも幅広く応用可能である。

2. 励磁電圧に時間高調波を含む場合の解析理論

〈2・1〉 解析上の仮定と対称軸上の過渡インピーダンステンソル ASM の巻線配置図は図1のようであり、 a 、 b および c は電機子巻線、 $f1$ および $f2$ は界磁巻線、 θ は a 相と $f1$ 相とのなす電気角である。

以下の解析において、一般の同期機の解析と同様、鉄損および漂遊負荷損を、また、円筒形であるので、空間高調波の影響を無視すれば、ASM の対称軸上の過渡インピーダンステンソルは(1)式となる⁽²⁾。

図1 ASM の巻線配置図

Fig. 1. Winding layout of an ASM.

Effects of Higher Harmonic Exciting Voltages on Asynchronized Synchronous Machine Performances. By Kazuo Tsuboi, Member & Hidemi Matsuura, Associate. (Chubu University)

坪井和男: 正員, 中部大学工学部電気工学科

松浦秀実: 准員, 中部大学大学院工学研究科, 博士前期課程

$[Z_s] =$

	1f	1b	2f	2b
1f	$R_s + L_s p$		$M_{sf} p e^{j\theta}$	
1b		$R_s + L_s p$		$M_{sf} p e^{-j\theta}$
2f	$M_{sf} p e^{-j\theta}$		$R_f + L_f p$	
2b		$M_{sf} p e^{j\theta}$		$R_f + L_f p$

 $\dots\dots\dots (1)$

但し、(1)式で 1f および 1b は電機子巻線に対する正相軸および逆相軸を示し、2f および 2b は界磁巻線に対するそれらを示している（電機子巻線の零相軸は、他の座標軸との結合を有していないので無視してある）。また、(1)式中の各定数の意味は(2)式で表わされる。すなわち、 R_s および L_s ；電機子巻線毎相の抵抗および自己インダクタンス、 R_f および L_f ；界磁巻線毎相の抵抗および自己インダクタンス、 M_s ；電機子巻線毎相間の仮想最大相互インダクタンス、 M_{sf} ；電機子巻線毎相と界磁巻線毎相間の最大相互インダクタンスとして、

$$R_s = R_s, \quad L_s = L_s + M_s/2$$

$$M_{sf} = \sqrt{3/2} M_{sf}, \quad R_f = R_f, \quad L_f = L_f$$

 $\dots\dots\dots (2)$

で表される。なお、 p は時間に関する微分オペレータ（ $=d/dt$ ）である。

2.2 対称軸上のひずみ波励磁電圧 ASM の電機子巻線に周波数 f の平衡三相電圧を、界磁巻線に滑り周波数 sf を基本波とする平衡二相ひずみ波電圧を加える一般的な場合について解析する。すなわち、各相電圧として(3)式の電圧を加えるものとする。

 $[v_p] =$

a	$V_{ms} \cos(\omega t + \varphi_s)$
b	$V_{ms} \cos(\omega t + \varphi_s - 2\pi/3)$
c	$V_{ms} \cos(\omega t + \varphi_s - 4\pi/3)$
f1	$\sum_{n=1}^{\infty} V_{2n-1, mf} \cos(2n-1 s \omega t + \varphi_{2n-1, f})$
f2	$\sum_{n=1}^{\infty} V_{2n-1, mf} \cos(2n-1 s \omega t + \varphi_{2n-1, f} + 2n-1 \pi/2)$

 $\dots\dots\dots (3)$

但し、 V_{ms} ；電機子巻線に加える毎相の電圧の最大値、 φ_s ； $t=0$ における a 相電圧の位相角、 $V_{2n-1, mf}$ ；界磁巻線に加える毎相の $2n-1$ 次調波励磁電圧の最

大値、 $\varphi_{2n-1, f}$ ； $t=0$ における $f1$ 相の $2n-1$ 次調波励磁電圧の位相角、 ω ；電機子巻線電圧の角周波数、 s ；滑りである。

さて、(3)式の電圧を対称軸上へ変換すれば、対称軸上の電圧は(4)式として求められる。

 $[v_{sh}] =$

1f	$(1/2) V_{1f m} e^{j(\omega t + \varphi_s)}$
1b	$(1/2) V_{1f m} e^{-j(\omega t + \varphi_s)}$
2f	$(1/2) \sum_{n=1}^{\infty} V_{4n-3, 2f m} e^{j(4n-3 s \omega t + \varphi_{4n-3, f})}$ $+ (1/2) \sum_{n=1}^{\infty} V_{4n-1, 2b m} e^{-j(\frac{s \omega t + \varphi_{4n-1, f}}{4n-1})}$
2b	$(1/2) \sum_{n=1}^{\infty} V_{4n-1, 2b m} e^{j(4n-1 s \omega t + \varphi_{4n-1, f})}$ $+ (1/2) \sum_{n=1}^{\infty} V_{4n-3, 2f m} e^{-j(\frac{s \omega t + \varphi_{4n-3, f}}{4n-3})}$

 $\dots\dots\dots (4)$

但し、

$$\left. \begin{aligned} (1/2) V_{1f m} &= \sqrt{3} V_{ms}/2 = \sqrt{3/2} V_{sp} \\ (1/2) V_{4n-1, 2b m} &= \sqrt{2} V_{4n-1, mf}/2 \\ &= V_{4n-1, fp} \\ (1/2) V_{4n-3, 2f m} &= \sqrt{2} V_{4n-3, mf}/2 \\ &= V_{4n-3, fp} \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

である。

式中、 V_{sp} 、 $V_{4n-3, fp}$ および $V_{4n-1, fp}$ は、それぞれ毎相の実効値で表した電機子電圧、 $4n-3$ 次および $4n-1$ 次調波の励磁電圧を示している。すなわち、(4)式で表される $4n-3$ 次調波の励磁電圧は基本波および高調波正相回転磁界を、 $4n-1$ 次調波は高調波逆相回転磁界を形成することが理解できる。

2.3 定常状態における電流の一般式 いま、電機子巻線の正弦波（基本波正相）電圧によって作られる回転磁界と界磁巻線の基本波励磁電圧によって作られる回転磁界が、 $s \geq 0$ の領域で同一方向を有し、 $\theta = 1 - s \omega t + \psi$ （ ψ ： $t=0$ の瞬時における回転子位置角）で回転子が回転しているものとする。

電流の一般式は、重ねの理より、(4)式のそれぞれの電圧に対する電流を求め、各座標軸につき重ね合わせれば求まる。まず、(4)式の電圧のうち、高調波次数を示す変数 n の任意の値に対応する電圧を各座標軸について別々に加えたときの電圧方程式は、(1)式の各座標軸の結合状態を考慮すれば、それぞれ(6)～(11)式となる。

$$\begin{array}{c}
 1f \\
 2f
 \end{array}
 \begin{array}{|c|}
 \hline
 (1/2)V_{1f}m e^{j(\omega t + \varphi_s)} \\
 \hline
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 1f \\
 2f
 \end{array}
 \begin{array}{|c|c|}
 \hline
 R_s + jX_s & jX_{msF}e^{j\theta} \\
 \hline
 jX_{msF}e^{-j\theta} & R_F + jX_F \\
 \hline
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 1f \\
 2f
 \end{array}
 \begin{array}{|c|}
 \hline
 (1/2)\dot{I}_1^{1f}m \cdot s e^{j(\omega t + \varphi_s)} \\
 \hline
 (1/2)\dot{I}_s^{2f}m \cdot s e^{j(s\omega t - \bar{\varphi} - \varphi_s)} \\
 \hline
 \end{array} \quad (6)$$

【(6)式の f 軸を b 軸とし、全ての要素を複素共役とした式】.....(7)

$$\begin{array}{c}
 1f \\
 2f
 \end{array}
 \begin{array}{|c|}
 \hline
 (1/2)V_{\frac{4n-3}{2}f}m e^{j(\frac{4n-3}{2}s\omega t + \varphi_{\frac{4n-3}{2}f})} \\
 \hline
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 1f \\
 2f
 \end{array}
 \begin{array}{|c|c|}
 \hline
 \frac{R_s + j}{\frac{4(n-1)s+1}{X_s}} & \frac{j}{\frac{4(n-1)s+1}{X_{msF}}}e^{j\theta} \\
 \hline
 j\frac{1}{\frac{4n-3}{2}s}X_{msF}e^{-j\theta} & R_F + j\frac{1}{\frac{4n-3}{2}s}X_F \\
 \hline
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 1f \\
 2f
 \end{array}
 \begin{array}{|c|}
 \hline
 (1/2)\dot{I}_1^{\frac{1f}{2}m \cdot f} e^{j\frac{4(n-1)s+1}{2}\omega t + \varphi_{\frac{4n-3}{2}f} + \psi)} \\
 \hline
 (1/2)\dot{I}_s^{\frac{2f}{2}m \cdot f} e^{j(\frac{4n-3}{2}s\omega t + \varphi_{\frac{4n-3}{2}f})} \\
 \hline
 \end{array} \quad (8)$$

.....(8)

【(8)式の f 軸を b 軸とし、全ての要素を複素共役とした式】.....(9)

$$\begin{array}{c}
 1b \\
 2b
 \end{array}
 \begin{array}{|c|}
 \hline
 (1/2)V_{\frac{4n-1}{2}b}m e^{j(\frac{4n-1}{2}s\omega t + \varphi_{\frac{4n-1}{2}f})} \\
 \hline
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 1b \\
 2b
 \end{array}
 \begin{array}{|c|c|}
 \hline
 R_s + j\frac{1}{\frac{4ns-1}{s}}X_s & j\frac{1}{\frac{4ns-1}{s}}X_{msF}e^{-j\theta} \\
 \hline
 j\frac{1}{\frac{4n-1}{2}s}X_{msF}e^{j\theta} & R_F + j\frac{1}{\frac{4n-1}{2}s}X_F \\
 \hline
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 1b \\
 2b
 \end{array}
 \begin{array}{|c|}
 \hline
 (1/2)\dot{I}_1^{\frac{1b}{2}m \cdot f} e^{j(\frac{4ns-1}{2}\omega t + \varphi_{\frac{4n-1}{2}f} - \psi)} \\
 \hline
 (1/2)\dot{I}_s^{\frac{2b}{2}m \cdot f} s e^{j(\frac{4n-1}{2}s\omega t + \varphi_{\frac{4n-1}{2}f})} \\
 \hline
 \end{array} \quad (10)$$

.....(10)

【(10)式の b 軸を f 軸とし、全ての要素を複素共役とした式】.....(11)

但し、(6)~(11)式のリアクタンスは、周波数 f に対する値であり、それぞれの添字は、(1)式のインダクタンスのそれに対応させてある。

従って、電機子巻線に周波数 f の平衡三相電圧を、界磁巻線に滑り周波数 sf を基本波とする平衡二相ひずみ波電圧を加えたときの定常状態における電流の一般式は、

$$\begin{array}{c}
 1f \\
 1b \\
 2f \\
 2b
 \end{array}
 \begin{array}{|c|}
 \hline
 \dot{I}_1^{1f \cdot s} + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{I}_1^{\frac{1f \cdot f}{4(n-1)s+1}} + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{I}_1^{\frac{1b \cdot f}{4ns-1}} \\
 \hline
 \dot{I}_1^{1f \cdot s*} + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{I}_1^{\frac{1f \cdot f}{4(n-1)s+1}} + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{I}_1^{\frac{1b \cdot f}{4ns-1}} \\
 \hline
 \dot{I}_s^{2f \cdot s} + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{I}_s^{\frac{2f \cdot f}{4n-3s}} + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{I}_s^{\frac{2b \cdot f}{4n-1s}} \\
 \hline
 \dot{I}_s^{2f \cdot s*} + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{I}_s^{\frac{2f \cdot f}{4n-3s}} + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{I}_s^{\frac{2b \cdot f}{4n-1s}} \\
 \hline
 \end{array} \quad [i^{sh}] = \dots\dots\dots (12)$$

となる。但し、*印は複素共役であることを示しており、また、 $\dot{I}_1^{1f \cdot s}$ および $\dot{I}_s^{2f \cdot s}$; (6)式の $1f$ 軸および $2f$ 軸の電流、 $\dot{I}_1^{\frac{1f \cdot f}{4(n-1)s+1}}$ および $\dot{I}_s^{\frac{2f \cdot f}{4n-3s}}$; (8)式の $1f$ 軸および $2f$ 軸の電流、 $\dot{I}_1^{\frac{1b \cdot f}{4ns-1}}$ および $\dot{I}_s^{\frac{2b \cdot f}{4n-1s}}$; (10)式の $1b$ 軸および $2b$ 軸の電流である。すなわち、電機子および界磁巻線には、固定子基本波正相電圧による成分、回転子の $4n-3$ 次調波の基本波と高調波正相電圧による成分および回転子の $4n-1$ 次調波の高調波逆相電圧による成分の3種類に大別できる電流が流れることを明確に示している。

〈2.4〉 トルクの一般式 同期ワットトルクで表したトルクの一般式は、(1)式から得られる固定子基本波の同期速度に対する同期ワットトルクテンソル $[\omega G_{ss}]$ と(12)式の電流の一般式より導出でき、(13)式のように求まる。

$$\begin{aligned}
 \tau_{sh} &= (1/2) \{i^{sh}\}_t^* \{\omega G_{ss}\} \{i^{sh}\} \\
 &= (\tau_{sh1} + \tau_{sh1}^*) + (\tau_{sh2} + \tau_{sh2}^*) \\
 &\quad + (\tau_{sh3} + \tau_{sh3}^*) + \dots + (\tau_{sh9} + \tau_{sh9}^*) \\
 &= \tau_{sh1} + \tau_{sh2} + \tau_{sh3} + \dots + \tau_{sh9} \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

すなわち、トルクの成分は9種類に大別され、その詳細は、表1に示した通りである。表1において、時間高調波次数を示す変数 n に対し、電機子側では n_j 、界磁側では、 n_k を用いている⁽¹³⁾。なお、滑り $s=0$ なる同期速度においては励磁電圧の周波数が無限に零に近づいている場合として扱っていることになるが、実

表 1 (13)式におけるトルクの各成分
Table 1. Each component of the torque in Eq. (13).

	トルクの式	種類
$\dot{\tau}_{sh1}$	$\frac{1}{4} \dot{I}_1^{1f m \cdot s} \dot{I}_s^{2f m \cdot s} jX_{mSF}$	非同期性相互トルク {s=0}
$\dot{\tau}_{sh2}$	$\frac{1}{4} \sum_{n_j=1}^{\infty} \sum_{n_k=1}^{\infty} \dot{I}_1^{1f m \cdot f} \dot{I}_s^{2f m \cdot f} \frac{1}{4(n_j-1)s-1} \frac{1}{4n_k-3s}$ $\cdot jX_{mSF} e^{j(4(n_k-n_j)s\omega t + \varphi_{4n_k-3s, f} - \varphi_{4n_j-3s, f})}$	非同期性相互トルク ($n_j = n_k$) 第2振動性相互トルク ($n_j \neq n_k$) {s=-1/4(n_j-1), 但し $n_j \neq 1$ }
$\dot{\tau}_{sh3}$	$\frac{1}{4} \sum_{n_k=1}^{\infty} \dot{I}_1^{1f m \cdot s} \dot{I}_s^{2f m \cdot f} \frac{1}{4n_k-3s}$ $\cdot jX_{mSF} e^{j(4(n_k-1)s\omega t + \varphi_{4n_k-3s, f} - \varphi_s)}$	同期性相互トルク ($n_k=1$) 第1振動性相互トルク ($n_k \neq 1$)
$\dot{\tau}_{sh4}$	$\frac{1}{4} \sum_{n_j=1}^{\infty} \dot{I}_1^{1f m \cdot f} \dot{I}_s^{2f m \cdot s} \frac{1}{4(n_j-1)s+1}$ $\cdot jX_{mSF} e^{-j(4(n_j-1)s\omega t + \varphi_{4n_j-3s, f} - \varphi_s)}$	同期性相互トルク ($n_j=1$) {s=0} 第1振動性相互トルク ($n_j \neq 1$) {s=-1/4(n_j-1)}
$\dot{\tau}_{sh5}$	$\frac{1}{4} \sum_{n_k=1}^{\infty} \dot{I}_1^{1f m \cdot s} \dot{I}_s^{2b m \cdot f} \frac{1}{4n_k-1s}$ $\cdot jX_{mSF} e^{-j(4n_k s\omega t - \varphi_s + \varphi_{4n_k-1s, f} + \varphi_s)}$	第1振動性相互トルク
$\dot{\tau}_{sh6}$	$\frac{1}{4} \sum_{n_j=1}^{\infty} \dot{I}_1^{1b m \cdot f} \dot{I}_s^{2f m \cdot s} \frac{1}{4n_j s-1}$ $\cdot jX_{mSF} e^{j(4n_j s\omega t - \varphi_s + \varphi_{4n_j-1s, f} + \varphi_s)}$	第1振動性相互トルク {s=1/4 n_j および s=0}
$\dot{\tau}_{sh7}$	$\frac{1}{4} \sum_{n_j=1}^{\infty} \sum_{n_k=1}^{\infty} \dot{I}_1^{1f m \cdot f} \dot{I}_s^{2b m \cdot f} \frac{1}{4(n_j-1)s+1} \frac{1}{4n_k-1s}$ $\cdot jX_{mSF} e^{-j(4(n_j+n_k-1)s\omega t + \varphi_{4n_j-3s, f} + \varphi_{4n_k-1s, f})}$	第2振動性相互トルク {s=-1/4(n_j-1), 但し $n_j \neq 1$ }
$\dot{\tau}_{sh8}$	$\frac{1}{4} \sum_{n_j=1}^{\infty} \sum_{n_k=1}^{\infty} \dot{I}_1^{1b m \cdot f} \dot{I}_s^{2f m \cdot f} \frac{1}{4n_j s-1} \frac{1}{4n_k-3s}$ $\cdot jX_{mSF} e^{j(4(n_j+n_k-1)s\omega t + \varphi_{4n_j-1s, f} + \varphi_{4n_k-3s, f})}$	第2振動性相互トルク {s=1/4 n_j }
$\dot{\tau}_{sh9}$	$\frac{1}{4} \sum_{n_j=1}^{\infty} \sum_{n_k=1}^{\infty} \dot{I}_1^{1b m \cdot f} \dot{I}_s^{2b m \cdot f} \frac{1}{4n_j s-1} \frac{1}{4n_k-1s}$ $\cdot jX_{mSF} e^{-j(4(n_k-n_j)s\omega t + \varphi_{4n_k-1s, f} - \varphi_{4n_j-1s, f})}$	非同期性相互トルク ($n_j = n_k$) 第2振動性相互トルク ($n_j \neq n_k$) {s=1/4 n_j }
備考	$n_j=1, 2, 3, \dots, \infty, \quad n_k=1, 2, 3, \dots, \infty$ () 内はそのトルクを発生する条件を, { } 内は振幅が零となる特定の滑りを示している。	

際は直流励磁電圧であるので、トルク特性などの算定は文献(2)に従って行なう必要がある。もちろん、 $s=0$ においてはすべての振動性トルクの振幅が零であることは言うまでもない。

$\dot{\tau}_{sh1}$ は、固定子基本波正相供給電圧自身に基づく誘導機作用(回転子側が二次巻線)としてのトルクを示しており、非同期性(有効)トルクである。 $\dot{\tau}_{sh2}$ は、

回転子の基本波および高調波正相励磁電圧(1次、5次、9次、...)自身に基づく誘導機作用(固定子側が二次巻線)としてのトルクであり、 $n_j = n_k$ の場合には、非振動性トルクとなるが、 $n_j \neq n_k$ の場合には、滑り角周波数 $4s\omega$ の整数倍で振動する振動性トルクとなる。振動性トルクのうち、振動角周波数が滑りによって変化し、ある特定の滑りで非振動的となるが、同時

にトルク自身の大きさも零となるものを第2振動性相互トルクと称する⁽¹⁴⁾。従って、 τ_{s12} は、第2振動性相互トルクとなり得る。このように、誘導機作用に基づく振動性トルクは滑りにより一義的に定まる。

τ_{s13} および τ_{s14} は、固定子基本波正相供給電圧と回転子の基本波および高調波正相励磁電圧との相互作用で生じるトルクである。 τ_{s13} は、 $n_k=1$ の場合、通常の同期機と同様に回転子位置角によってその大きさの変化する同期性トルクとなる。 τ_{s14} も $n_j=1$ の場合、同期性トルクとなる。両者とも $n_j=n_k \neq 1$ の場合、 $4s\omega$ の整数倍で振動する振動性トルクとなる。これは、同期性トルクが、非同期速度において呈するもので、その振動角周波数が滑りによって異なるので、第1振動性相互トルクと称される⁽¹⁴⁾。これらの同期機作用に基づく振動性トルクは、滑りを与えてもその振幅が、一義的に定まらず、回転子位置角 ψ にも依存する。

τ_{s15} および τ_{s16} は、固定子基本波正相供給電圧と回転子の高調波逆相励磁電圧（3次、7次、…）との相互作用で生じる同期機作用としてのトルクであり、 n_j と n_k の値に無関係に $4s\omega$ の整数倍で振動する第1振動性相互トルクとなる。

τ_{s17} および τ_{s18} は、回転子の基本波および高調波正相励磁電圧と回転子の高調波逆相励磁電圧との相互作用で生じる誘導機作用としてのトルクであり、 $4s\omega$ の整数倍で振動する第2振動性相互トルクとなる。

τ_{s19} は、回転子の高調波逆相励磁電圧自身に基づく誘導機作用としてのトルクであり、 $n_j=n_k$ の場合、高調波逆相トルクとなり、 $n_j \neq n_k$ の場合、 $4s\omega$ の整数倍で振動する第2振動性相互トルクとなる。

以上のように、定常状態における時間高調波励磁電圧によるトルクの一般式を導出し、種々の検討を加え、ASM が同期性トルク、非同期性トルクおよび $4s\omega$ の整数倍で振動する振動性トルクを生じることを明らかにした。また、表1より振動性トルクには、同じ振動角周波数のものであっても、その振幅が回転子位置角 ψ に依存する成分とそうでない成分とが存在することが明らかとなった。これは、誘導機作用と同期機作用を併せて有する ASM の極めて興味深い特異な現象である。

3. 電流およびトルクの定量算法

〈3・1〉 電流の実効値 (8)式で表される電流は $n=1$ (基本波) の場合、(6)式で表される電流の周波数と等しいことに留意すれば、電機子電流の実効値 I^a および界磁電流の実効値 I^f は、それぞれ次式のよ

うに求まる。

$$I^a = \sqrt{(2/3) \left\{ \left| (1/2) \dot{I}_1^{1f \cdot s} + (1/2) \dot{I}_1^{1f \cdot m \cdot s} \right|^2 * \right.} \\ \left. * e^{-j(\delta_s + \pi/2 - \varphi_{f0})} \right|^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \left| (1/2) \dot{I}_{4n-1}^{1f \cdot m \cdot s} \right|^2 * \right.} \\ \left. * + \sum_{n=1}^{\infty} \left| (1/2) \dot{I}_{4n-1}^{1f \cdot m \cdot f} \right|^2 \right\} \dots \dots \dots (14)$$

$$I^f = \sqrt{\left| (1/2) \dot{I}_s^{2f \cdot m \cdot f} + (1/2) \dot{I}_s^{2f \cdot m \cdot s} \right|^2} \\ * e^{j(\delta_s + \pi/2 - \varphi_{f0})} \left|^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \left| (1/2) \dot{I}_{4n-3}^{2f \cdot m \cdot f} \right|^2 * \right.} \\ \left. * + \sum_{n=1}^{\infty} \left| (1/2) \dot{I}_{4n-1}^{2f \cdot m \cdot f} \right|^2 \right\} \dots \dots \dots (15)$$

但し、上式中の各電流値は(6)式、(8)式および(10)式を変形した2行2列の複素行列方程式を解くことによって求まる。また、負荷角 δ_s を文献(2)と同様な値として(16)式のように定義している。

$$\delta_s = 3\pi/2 - \psi - \varphi_{1f} + \varphi_s + \varphi_{f0} \left\{ \dots \dots \dots (16) \right.} \\ \varphi_{f0} = \tan^{-1}(sX_F/R_F)$$

〈3・2〉 非振動性(有効)トルク 次に、任意の滑りで電動機または発電機の有効トルクとして利用する非振動性トルクは、誘導機作用としての非同期性相互トルクと同期機作用としての同期性相互トルクからなるので、滑りと回転子位置角 ψ (または負荷角 δ_s) を与えないと定まらない。

まず、合成非同期性トルク τ_{asy} であるが、 $s \neq 0$ において表1の条件を満足するときの τ_{s11} 、 $\tau_{s12(asy)}$ および $\tau_{s19(asy)}$ の和として求まる。合成同期性トルクは $\tau_{s13(asy)}$ と $\tau_{s14(asy)}$ の位相関係も考慮したベクトル和として求まるが⁽¹⁵⁾、励磁電圧高調波はこの非振動性トルクに寄与せず、振動性トルクとなる(添字(asy)および(sy)は非同期性トルクおよび同期性トルクであることを示す)。有効トルクとして利用できる同期性トルクの最大値を τ_{sym} とすると、 $s \leq 1$ で電動機および発電機として利用できる非振動性トルクの最大値 $\tau_{sm}(M)$ および $\tau_{sm}(G)$ は次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{asy} &= \tau_{s11} + \tau_{s12(asy)} + \tau_{s19(asy)} \\ \tau_{sm}(M) &= \tau_{asy} + \tau_{sym} \\ \tau_{sm}(G) &= \tau_{asy} - \tau_{sym} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (17)$$

なお、 $\tau_{s13(asy)}$ および $\tau_{s14(asy)}$ のそれぞれの最大値は物理的意味が少なく、 τ_{sym} の値が重要である。

〈3・3〉 振動性トルク 振動性トルクは、表1に示したように滑り周波数の4の整数倍の振動角周波数を有し、その合成値を求めることは極めて複雑で注意を必要とする。すなわち、この量は固定子供給電圧および励磁電圧の大きさに依存するのみならず、 τ_{s12} 、 τ_{s17} 、 τ_{s18} および τ_{s19} のような滑りと励磁電圧の位相

関係に依存する成分と、 τ_{sh3} , τ_{sh4} , τ_{sh5} および τ_{sh6} のような滑り、励磁電圧の位相関係、固定子供給電圧の位相および回転子位置角（負荷角）に依存する成分とが存在するためである（添字（4 ω ）は4 ω で振動する成分を示す）。各トルク成分の振幅は回転子位置角を与えることなく決定することができる。しかし、物理的には、各振動角周波数に対する合成振動性トルクの振幅を決定することが最も重要である。

従って、固定子供給電圧および回転子励磁電圧の大きさ、位相、滑り、更に回転子位置角が決定されてASMの振動性トルクの合成振幅の決定が可能となる。このことは、誘導機としての作用と同期機としての作用を併せて有するASMのほかに例の見られない特異な現象であり、ここではその取り扱い方を明確にしておく。

例えば、4 ω で振動するトルクについて考えてみることにする。

いま、固定子および回転子に印加される電圧の大きさおよび位相が与えられ、電流の各成分が求まれば、各トルク成分（ τ_{sh1} は非振動性トルクであるので除く）の4 ω で振動するものについて、例えば

$$\left. \begin{aligned} \tau_{sh2(4\omega)} &\equiv \dot{A}_{\tau 2} e^{j4\omega t} \\ \tau_{sh3(4\omega)} &\equiv \{\dot{B}_{\tau 3} e^{j\psi}\} e^{j4\omega t} \\ \tau_{sh5(4\omega)} &\equiv \{\dot{C}_{\tau 5} e^{j\psi}\} e^{-j4\omega t} \\ \tau_{sh7(4\omega)} &\equiv \dot{A}_{\tau 7} e^{-j4\omega t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

などのように表すことができる。但し、 $\tau_{sh2(4\omega)}$, $\tau_{sh3(4\omega)}$, ...などは τ_{sh2} , τ_{sh3} , ...などのうち、4 ω で振動するトルクの各成分におけるベクトル和を示したものである。従って、ある回転子位置角 ψ に対し、その合成振幅 $\tau_{4\omega m}$ は(14)式を参照して(19)式のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \tau_{4\omega m} &\equiv 2|(\dot{A}_{\tau 2} + \dot{A}_{\tau 7}^* + \dot{A}_{\tau 3} + \dot{A}_{\tau 5}^*) \\ &\quad + (\dot{B}_{\tau 3} + \dot{B}_{\tau 4}^*) e^{j\psi} \\ &\quad + (\dot{C}_{\tau 5}^* + \dot{C}_{\tau 6}) e^{-j\psi}| \\ &\equiv 2|\dot{A}_{\tau} + \dot{B}_{\tau} e^{j\psi} + \dot{C}_{\tau} e^{-j\psi}| \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

すなわち、 $\tau_{4\omega m}$ は滑りによって定まるベクトル $\dot{A}_{\tau}$ と滑りと回転子位置角 ψ の双方によって定まる二つのベクトル $\dot{B}_{\tau} e^{j\psi}$ と $\dot{C}_{\tau} e^{-j\psi}$ とのベクトル和の長さに比例することになる。特に興味あることは回転子位置角（負荷角）によっても複雑に変化し、負荷の増大に比例しないことである。

もちろん、8 ω で振動する振動性トルクの振幅なども同様な方法で求め得る。

以上のように、励磁電圧に時間高調波が含まれる場合のASMの電流およびトルクの物理的な意味が更に明確になり、定量算定も可能となった。

4. 試作機に対する特性算定例

〈4.1〉 試作機の定格と定数および励磁電圧 試作機の定数と定格は、表2に示した通りである⁽²⁾。特性算定する一例として正弦波の実効値に等しい実効値を有する図2に示すような方形波（フーリエ級数展開の際の第6項までを考慮。方形波励磁電圧の基本波は正弦波励磁の91.6%，ひずみ率43.8%）を平衡二相電圧として界磁巻線に加える場合を取り扱うことにする。この例は高調波の影響が顕著な場合であるが、文献(3)のインバータ電源で界磁巻線を励磁する場合に対応することになる。

但し、正弦波電圧励磁時の基準電圧の実効値 V_{fpr} は、

$$V_{fpr} = \sqrt{R_F^2 + \{s(X_F - X_{msf})\}^2} V_{fp0} / R_F \dots\dots\dots (20)$$

与えられ、各定数の意味は表2の通りである。

本試作機に対しては、 $s=0$ において $V_{fpr} = V_{fp0} = 11.0$ V(直流)、 $s=1$ なる静止時において $V_{fpr} = 207.0$

表2 試作機の定数と定格

Table 2. Rated values and constants of an ASM made on an experimental basis.

定 格		定 数 (単位: Ω)	
項 目	定格値	定数名	定数値
電機子電圧 $V_{s\phi}$	200/ $\sqrt{3}$ V	R_s (75°C)	0.497
電機子電流 I_{a0}	12.3 A	X_s	9.79
励磁電圧 V_{fp0}	11.0 V	X_{msf}	11.8
励磁電流 $I_{f10} = I_{f20}$	13.6 A	X_{msf}	14.5
軸出力 P_{m0}	3.7 Sy. kW	R_F (75°C)	0.809
極 数	4 極	X_F	27.0
周 波 数 f	60 Hz		
力 率 P_f	1.0

図2 回転子励磁電圧波形（方形波）

Fig. 2. Wave form of the rotor exciting voltage. (square wave)

図 3 滑りに対する電流特性

Fig. 3. Current characteristics vs. slip.

図 4 滑りに対する合成非振動性 (有効) トルク特性

Fig. 4. Resultant non-vibrating (effective) torque characteristics vs. slip.

V ($sf=60\text{ Hz}$) となる。文献(2)に示したように、この電圧は電機子電流および界磁電流共に少ない値となる電圧に対応している。もちろん、界磁励磁電圧 V_{fp} を(20)式の基準電圧よりやや多めとすると電機子電流が最小となり、電機子側の力率が100%となる。反対に、やや少なめとすると界磁電流が最小となり、界磁側の力率が100%となる。このように電機子側も界磁側も励磁電圧の大きさによって普通の同期機のようなV曲線を描くものである⁽²⁾。

〈4.2〉 方形波電圧励磁の場合の電流特性 図3は、ASM を電動機として方形波および正弦波励磁した場合の滑りに対する電機子電流 I^a および界磁電流 I^f を示したものである。電動機運転の例であり、滑りにかかわらず定格軸トルク (同期速度において定格軸出力 3.7 kW と機械損 0.275 kW を供給できるト

ルク) 一定の条件で比較したものである。

方形波励磁の場合、 I^a は $s=1\sim0$ において、 I^f は $s=1\sim0.4$ 付近において、正弦波励磁の場合より増加しており、しかもその増加割合は滑りによっても異なっている。この現象は、例えば、かご形誘導機をひずみ波電源で駆動する場合と著しく異なり、ASM の特異な現象である。すなわち、かご形誘導機の場合、基本波を含めた各高調波の電圧の大きさに対応した電流が流れるのであるが、ASM の場合、単に励磁電圧の大きさに比例した電流とならず、主として励磁電圧の基本波成分の減少により力率が変化することに起因しているのである。このように ASM の電流は励磁電圧の基本波の大きさにほぼ比例して増減するのではないので、励磁電圧の大きさを検討する場合、この点も十分に配慮する必要がある。

〈4.3〉 方形波電圧励磁の場合の非振動性トルク特性 図4は、(17)式で述べたような合成非振動性 (有効) トルク特性を求めたものである。

方形波励磁の場合、正および負の最大トルク共に減少する。これは、 $\tau_{s2(a,y)}$ の減少が主原因であり、負の最大トルクの減少が若干大きくなるからである。すなわち、 $s\leq 1$ で発電機として利用する際の最大トルクが減少することとなり、特に $s=0.2\sim0$ 付近で用いる場合、注意を必要とする。

以上のように方形波励磁の場合、基本波の減少が主原因で非振動性トルクが減少するが、正のトルクの減少割合と負のトルクのそれとは ASM に誘導機作用としてのトルクと同期機作用としてのトルクが存在するため一様でないことが明らかとなった。

〈4.4〉 方形波電圧励磁の場合の振動性トルク特性

図5は方形波励磁の場合の合成振動性トルクの振幅を(19)式に従って求めたものであり、 τ_{4ism} 、 τ_{8ism} および τ_{12ism} はそれぞれ滑り周波数の4倍、8倍および12倍で振動する合成振動性トルクの振幅である。

振動性トルクの振幅 τ_{4ism} が最も大きく、 $s=1\sim0.3$ 付近まではほぼ一定値であるが $s=0.25\sim0.2$ で最小値をとる。これは主として、固定子基本波供給電圧と回転子第3調波励磁電圧との相互作用によって生じる τ_{s15} および τ_{s16} 並びに回転子励磁電圧の基本波と第3調波との相互作用によって生じる τ_{s17} 、 τ_{s18} が零または極めて小さな値となるからである。ちなみに、 τ_{s16} および τ_{s18} は $s=1/4$ において零である⁽¹¹⁾。滑りが更に小さくなると再び τ_{4ism} は増大し $s=0.03$ 付近で最大となり定格軸トルクの約60%程度となる。

τ_{8ism} および τ_{12ism} についても最小値をとる滑りがそれぞれ $s=1/8$ および $1/12$ より若干小さな値とな

図 5 滑りに対する合成振動性トルクの振幅
Fig. 5. Amplitudes of the resultant vibrating torques vs. slip.

図 6 負荷角に対する合成振動性トルクの振幅
Fig. 6. Amplitudes of the resultant vibrating torques vs. load-angle.

る。

図 6 は滑りをパラメータとして負荷角に対する振幅を求めたものであり、(19)式で示したような三つのベクトル和からなっているので δ の 2 倍で変動し、滑りによってもその様子が異なることが理解できる。

このように負荷の大きさに振動性トルクの振幅は比例しないので、この点も ASM の特異な現象であり、振動性トルクを評価するうえで重要となる。

5. あとがき

本論文は、非同期化同期機の界磁巻線に供給する二相励磁電圧に含まれる時間高調波の特性に及ぼす影響を明らかにしたものである。まず、解析理論を展開し、電流および非振動性トルクのみならず振動性トルクも滑りによって一義的に定まる成分と滑りと負荷角の双方に依存する成分とからなることを定性的に明確にし

た。これは、誘導機作用と同期機作用を併せて有する ASM の興味ある特異な現象であり、特に振動性トルクは滑り周波数の 4 の整数倍で振動することが明らかとなった。

次に、電流およびトルクの定量算定法を明らかにするとともに、試作した ASM の界磁巻線を平衡二相方形波電圧で励磁する場合を例にとって特性算定を行ない、正弦波励磁の場合との比較も行なった。特に振動性トルクは回転むら、軸ねじれ現象などの原因となるもので実用上重要であり、励磁電圧高調波による特徴、定量的大きさなどが具体的に明らかとなった。

なお、本論文で展開した理論的手法は回転子に三相巻線を有する、いわゆる交流励磁同期機⁽¹²⁾の解析の基礎ともなり得る。この場合、振動性トルクの振動角周波数は滑り周波数の 6 の整数倍になる。

本研究がこの種の電動機の特性的みならず、励磁電源の検討の一助となれば望外の幸せである。

(昭和 60 年 3 月 25 日受付)

文 献

- (1) B. W. Hogg, et al.: "Power-control characteristics of an asynchronous synchronous machine: a computer study", *Proc. Instn. Elect. Engrs.* 115, 507 (1968-4)
- (2) 坪井・井口: 「非同期化同期機の基本特性解析」電学論 B, 101, 643 (昭 56-11)
- (3) Andrew Yu, et al.: "Pulse controlled thyristor excitation regulator for a two-axis synchronous machine", *IEE Conf. Rec. Annu. Meet. Ind. Appl. Soc.* 9 (Pt 1), 405 (1974)
- (4) N. N. Blotsky et al.: "Tests of machines with direct-quadrature axis excitation and prospects of their application in power system", *CIGRE*, 1980, 11-05 (1980-8)
- (5) W. B. Gish, et al.: "An adjustable speed synchronous machine for hydroelectric power applications", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-100, 5, 2171 (1981-5)
- (6) M. S. Morsy, et al.: "Transient stability of synchronous generators with two-axis slip frequency excitation", *ibid.*, PAS-102, 4, 852 (1983-4)
- (7) 中村, 他: 「電力系統における 2 軸励磁同期発電機の非同期同期運転の解析と試験」電学論 B, 104, 365 (昭 59-6)
- (8) K. P. Bausu, et al.: "Very low speed drive with doubly fed induction motor", *IEEE Trans. Ind. Electron & Control Instrum.* IECI-24, 2, 220 (1977-5)
- (9) Thomas H. Ortmeier, et al.: "Control of cascaded doubly fed machines for generator applications", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-103, No 9, 2564 (1984-9)
- (10) 田村, 他: 「交流励磁同期機の定常安定性に関する解析」電学論 B, 105, 605 (昭 60-7)
- (11) 坪井・松浦: 「非同期化同期機の特性に及ぼす励磁電圧高調波の影響」電気学会回転機研究 RM 84-29 (昭 59-6)
- (12) 田村・長谷川・藤原: 「交流励磁同期機の解析一定常運転状態」電学論 B, 103, 25 (昭 58-2)
- (13) 野中・坪井: 「電源電圧の波形ひずみがコンデンサ電動機の特性に及ぼす影響」電学論 B, 97, 135 (昭 52-3)
- (14) 加藤: 「電磁機器に於けるトルクの分類の一例」電工論, 4, 185 (昭 27-4)
- (15) 加藤・坪井: 「極間の導体棒の有無による突極同期機の非同期始動時における振動性トルクの比較」電学論 B, 92, 515 (昭 47-9)