同期機における零相・逆相回路間の相互干渉

正員 高瀬 冬人 (京 都 大)

非会員 朝倉 孝宜 (京 都 大)

正員 松村 年郎 (名古屋大)

正員 上田 皖亮 (京 都 大)

Mutual Interaction between Zero-Phase-Sequence and Negative-Phase-Sequence
Circuits in a Synchronous GeneratorFuyuto Takase, Member, Takanobu Asakura, Non-member (Kyoto University), Toshiro Matsumura,
Member (Nagoya University), Yoshisuke Ueda, Member (Kyoto University)

The mutual interaction between zero-phase-sequence and negative-phase-sequence circuits in a salient pole synchronous generator is proved experimentally and theoretically. In the method of symmetrical coordinates, it has been believed that positive-, negative- and zero-phase-sequence components are independent. But an experiment driving a synchronous generator with unbalanced load shows that negative-phase-sequence voltage is induced when only zero-phase-sequence current is applied. These interaction between negative- and zero-phase-sequence circuits are proved theoretically by magnetic flux distribution in the air-gap of synchronous generator. The m. m. f. by zero-phase-sequence current generates negative-phase-sequence flux distribution by the saliency of the rotor and the field current 2nd harmonics and vice versa. The revised expression for synchronous machine in the symmetric coordinate is proposed.

キーワード：対称座標法，零相，逆相，同期機，空げき磁束，パーミアンス

1. はじめに

本論文は、対称座標法で記述した同期機において、零相回路と逆相回路の間に相互干渉があることを実験と理論から示し、慣用の対称座標法における同期機の表現は、近似的な表現であることを示すものである。

対称座標法は、不平衡時の三相交流回路の電圧、電流を正相、逆相、零相の各対称成分に分解して扱う方法として知られている⁽¹⁾。同期機を対称座標法で記述すると各対称成分は独立している、すなわち正相、逆相、零相の電圧は、対応する対称成分電流のみから定まるとされている。しかし、本論文では、対称成分の独立性は厳密には成立しておらず、一つの近似であることを示す。

著者は、逆相電流のみを流した同期機において零相電圧が発生することをさきに示した⁽²⁾⁽³⁾。本論文では、逆に、零相電流のみを流した状態で、逆相電圧が発生することを実験で確かめる。この逆相電圧は、供試機では零相電圧の4割程度になり、無視できない大きさである。

次に同期機内部の空げき磁束の観点から理論的な検討を行い、この効果が電機子巻線分布の正弦波からのずれ(空

間高調波)と回転子の突極性により生じることを示す。

更に、対称座標法における同期機の表現について検討し、零相・逆相間の相互干渉を含めた新しい表現式を提案し、実験により検証する。

2. 供試発電機

〈2・1〉 供試発電機⁽⁶⁾ 実験に用いた同期発電機の断面を図1に示す。供試機は突極機であり、定格は容量6 kVA、電圧220 V、電流15.7 A、回転速度1,800 rpmである。制動巻線は装着していない。毎極毎相のスロット数は3である。電機子歯頭部には探りコイルが巻かれ、空げき磁束が観測できる。

〈2・2〉 空げき位置を表す座標系 空げきの位置を a 相巻線軸を原点とし、回転子の回転方向を正とする変数 ξ (電気角)で表す。時間の原点は、回転子直軸が a 相巻線軸に一致する時刻とする。また、回転子上からみた空げきの位置を表す座標 η を、 $\eta = \xi - \omega t$ (電気角)で定義する。 ω は電源の角周波数である。

〈2・3〉 対称座標への変換 観測した電圧、電流から以下の手順で対称成分を算出した。まず電圧、電流の瞬時

図 1 供試発電機の断面
Fig. 1. Cross section of the tested generator.

値をフーリエ変換し、基本波成分の振幅 E および位相 $\angle E$ を求めて、ベクトル表示する(電圧についてのみ示すが、電流も同様)。

$$e(t) = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \angle E) + \text{高調波成分} \quad \cdots (1)$$

$$\dot{E} = E \exp(j \angle E) \quad \cdots (2)$$

対称成分へは、次式に従って分解する⁽¹⁾。

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_0 \\ \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_a \\ \dot{E}_b \\ \dot{E}_c \end{bmatrix} \quad \cdots (3)$$

ただし、 $a = \exp(j2/3\pi)$

3. 実験方法と実験結果

〈3・1〉 零相電流による逆相電圧の発生 図 2 に実験回路を示す。電機子巻線は三相分を直列にして、単相電源に接続する。各巻線の電流は位相を含めて同一であるから、零相電流のみが流れる。この接続は、零相インピーダンスの測定法(直列法)として知られている⁽⁶⁾。同期機の運転法としては特殊であるが、ここで問題としている零相・逆相間相互作用の検証には適している。

界磁巻線短絡、定格回転速度の状態で、測定した零相電圧 E_0 、逆相電圧 E_2 を、零相電流 I_0 に対して、図 3 (a) に示す。電機子電流は零相成分のみであるが、電機子電圧には、零相成分のみならず逆相分も現れる。逆相電圧と零相電流は比例しており、その比は $E_2/I_0 \approx 0.33 \Omega$ であった。この比は、逆相電流により発生する零相電圧の比⁽³⁾と等しい。

次に、零相電流を 19 A に保ち、同期機の回転位相を電源系統にして変化させる⁽³⁾。このとき、逆相、零相電圧の振幅は一定であった。これらの電圧の位相 $\angle E_2$ 、 $\angle E_0$ を、零相電流の位相 $\angle I_0$ に対して、(b) 図に示す。零相電圧と零相電流の位相差は一定である。一方、逆相電圧と零相電流の位相は、和が一定 ($\angle E_2 + \angle I_0 \approx -91^\circ$) となっている。

またこの実験では、短絡した界磁巻線に第 2 および第 4

図 2 実験回路
Fig. 2. Experimental circuit.

(a) 電圧

(b) 電圧の位相

図 3 零相電流により生じる零相、逆相電圧
Fig. 3. Zero- and negative-phase-sequence voltages and phases induced by zero-phase-sequence current.

調波電流が発生する。この界磁電流 $i_f(t)$ を次式で表す。

$$i_f(t) = \sqrt{2} I_{f2} \sin(2\omega t + \angle I_{f2}) + \sqrt{2} I_{f4} \sin(4\omega t + \angle I_{f4}) \quad \cdots (4)$$

実験によると I_{f2} 、 I_{f4} は I_0 に比例し、位相は $\angle I_{f2} + \angle I_0 \approx 6^\circ$ 、 $\angle I_{f4} - \angle I_0 \approx 179^\circ$ となっている。

〈3・2〉 空けき磁束の観測⁽⁵⁾ 電機子歯頭部の探りコイルを用いて、空けき部の磁束密度を観測する。観測した空けき磁束のうち、固定子からみた時間基本波成分を、空間高調波成分の和に展開する⁽³⁾。

$$B(\xi, t) \sim \sum_m B_m \sin(\omega t + \angle B_m - m\xi) \quad \cdots (5)$$

B_m : 空間第 m 次・時間基本波成分

(a) 振幅

(b) 位相

図 4 零相電流により発生する磁束密度成分
Fig. 4. Air-gap flux density by zero-phase-sequence current.

実験より求めた空げき磁束の空間高調波成分を、図 4 (a) に示す。零相電流に比例して、空間 3 倍波成分 B_3 、 B_{-3} 、空間基本・逆回転成分 B_{-1} 成分、空間第 5 調波成分 B_5 が発生している。これら以外の成分は微小である。

零相電流と空げき磁束の空間高調波成分の位相の関係は、(b) 図に示すように、 $\angle B_3 - \angle I_0$ 、 $\angle B_{-3} - \angle I_0$ 、 $\angle B_{-1} + \angle I_0$ 、 $\angle B_5 + \angle I_0$ が、それぞれ一定となっている。

4. 零相電流による逆相電圧の発生機構

零相電流から逆相電圧が生じる機構を、空げき磁束とパーミアンスモデル⁽⁷⁾に基づいて説明する。

<4・1> 発生機構の概略 発生機構の概略を図 5 に示す。零相電流 I_0 と、電機子巻線分布の空間第三調波成分によって、空げきに空間第三調波起磁力が発生する。これは、回転子の突極性によりひずみ、磁束分布に空間基本逆回転成分 B_{-1} を発生する。また零相磁束は、界磁電流に第二調波 I_{f2} を誘導し、これも B_{-1} を発生させる。磁束分布の空間基本逆回転成分は、電機子巻線に逆相電圧を誘導する。以下、各部を説明する。

<4・2> 零相電流による起磁力 電機子電流を、零相電流のみが流れた次のかたちにおく。

$$i_a(t) = i_b(t) = i_c(t) = \sqrt{2} I_0 \sin(\omega t + \angle I_0) \dots \dots (6)$$

図 5 零相電流による逆相電圧の発生機構
Fig. 5. Induction of negative-phase-sequence voltage from zero-phase-sequence current.

この電流から生じる電機子起磁力 F_{am} は、時間基本・空間第三調波成分(正および逆方向回転)である。

$$F_{am}(\xi, t) = \sqrt{2} I_0 a_3 \frac{3}{2} \{ \sin(\omega t + \angle I_0 + 3\xi) + \sin(\omega t + \angle I_0 - 3\xi) \} \dots \dots \dots (7)$$

係数 a_3 は、電機子 a 相巻線の巻線分布の空間第三調波の係数である⁽⁷⁾。

<4・3> 突極性により生じる空間 3 倍波 空げき部のパーミアンス分布と電機子起磁力を用いて、空げき磁束密度は次式で表される。

$$\begin{aligned} B(\xi, t) &= F_{am}(\xi) P(\eta) \\ &= \sqrt{2} I_0 a_3 \frac{3}{2} P_0 \sin(\omega t + \angle I_0 - 3\xi) \\ &\quad + \sqrt{2} I_0 a_3 \frac{3}{2} P_0 \sin(\omega t + \angle I_0 + 3\xi) \\ &\quad + \sqrt{2} I_0 a_3 \frac{3}{4} P_2 \sin(\omega t - \angle I_0 + \xi + \pi) \\ &\quad + \sqrt{2} I_0 a_3 \frac{3}{4} P_2 \sin(\omega t - \angle I_0 - 5\xi + \pi) \\ &\quad + \text{時間に関する高調波成分} \end{aligned} \dots \dots \dots (8)$$

$P(\eta)$ は空げきのパーミアンス、 P_0 は $P(\eta)$ の空間分布の平均値、 P_2 は突極性を表す係数である⁽³⁾。(8) 式の第 1、第 2 項は空間 3 倍波 B_3 、 B_{-3} を表す。第 3 項は空間基本波・逆回転成分 B_{-1} 、第 4 項は空間 5 倍波 B_5 を表す項であり、突極性 P_2 から生じることがわかる。

<4・4> 界磁電流高調波の影響 界磁電流の第二調波からも、磁束成分 B_{-1} が発生することを示す。まず、界磁巻線を直流励磁したときの空げき磁束を、無負荷試験の結果から次式で表す。

$$B(\eta) = i_f \{ b_1 \cos \eta + b_3 \cos 3\eta + b_5 \cos 5\eta \} \dots \dots (9)$$

界磁巻線に高調波電流(4)式が流れると、次の磁束が発生する。

$$\begin{aligned} B(\xi, t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} I_{f2} b_3 \sin(\omega t - \angle I_{f2} - 3\xi + \pi) \\ &\quad + \frac{\sqrt{2}}{2} I_{f4} b_3 \sin(\omega t + \angle I_{f4} + 3\xi) \\ &\quad + \frac{\sqrt{2}}{2} I_{f2} b_1 \sin(\omega t + \angle I_{f2} + \xi) \\ &\quad + \frac{\sqrt{2}}{2} I_{f4} b_5 \sin(\omega t - \angle I_{f4} - 5\xi + \pi) \\ &\quad + \text{時間に関する高調波成分} \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

第1, 第2項は空間3倍波成分 B_3 , 第3項は空間基本波・逆回転成分 B_{-1} , 第4項は空間5倍波成分 B_5 を表している。逆相磁束成分である第3項は I_{fz} により生じることがわかる。 I_{fz} は零相電流に比例するので, 逆相磁束成分も零相電流に比例する。

〈4・5〉 空げき磁束の生成 以上をまとめて, 零相電流により発生する磁束密度成分 B_3, B_{-3}, B_{-1} を計算する。表1に示す諸定数から, 磁束成分のパーミアンス寄与分(8)式, 界磁電流寄与分(10)式とそれらの和(零相電流1A当たり)を計算し, 実測値とともに表2に示す。位相に関して(8), (10)式より $\angle B_3 - \angle I_0$ などの和または差が一定となる。この傾向は実験結果と一致するので, これらの値を表に示す。理論的に求めた空げき磁束密度が, 実測値とよく一致していることがわかる。

以上より, 空げき磁束分布に, 逆回転成分 B_{-1} が発生することを, 理論的に説明できた。

〈4・6〉 電圧対称成分と磁束分布 空げき磁束と電機子巻線鎖交磁束の関係をを用いると, 逆回転成分 B_{-1} から逆相電圧が生じ, 空間3倍成分 B_3, B_{-3} から零相電圧が生じることがわかる⁽⁷⁾。

磁束密度分布の測定値より電機子電圧を計算し, 実測値

表1 供試機の諸定数
Table 1. Constants of the tested generator.

$P_0=0.214$	mT/A
$P_2=0.064$	mT/A
$b_1=147$	mT/A
$b_3=-25$	mT/A
$b_5=2.6$	mT/A
$I_{fz}/I_0=1.92 \times 10^{-3}$	A/A
$I_{fz}/I_0=1.86 \times 10^{-3}$	A/A
$\alpha_3=-5.88$	ターン

表2 空げき磁束密度の理論値と実測値
Table 2. Air-gap flux density by zero-phase-sequence current.

	パーミアンス 寄与分 (mT/A)	界磁電流 寄与分 (mT/A)	理論値 (和) (mT/A)	実験値 (mT/A)
B_3/I_0	2.67	0.03	2.64	3.63
$\angle B_3 - \angle I_0$	π	0	π	-179°
B_{-3}/I_0	2.67	0.03	2.64	3.59
$\angle B_{-3} - \angle I_0$	π	0	π	178°
B_{-1}/I_0	0.40	0.20	0.60	0.66
$\angle B_{-1} + \angle I_0$	0	0	0	-1°
B_5/I_0	0.40	0.003	0.40	0.41
$\angle B_5 - \angle I_0$	0	0	0	2°

表3 零相電流による逆相, 零相電圧
Table 3. Negative- and zero-phase-sequence voltages.

	計算値 (Ω)	実測値 (Ω)
E_0/I_0	0.64	0.85
E_2/I_0	0.29	0.33

とともに表3に示す。計算値は実測値とほぼ一致している。 E_0 について誤差が大きいのは, 計算値が漏れ磁束を考慮していないためと考えられる。

以上のように, 零相電流から逆相電圧が生じる機構として, 零相電流から空げき部に空間第三調波起磁力分布が発生し, これが回転子の突極性や界磁高調波電流によって空間基本波の磁束分布に変換されて, 逆相電圧となることを示した。

5. 対称座標法における同期機の表現式の修正

〈5・1〉 同期機の表現式の修正 以上の結果をまとめて, 対称座標法における同期機の表現式を修正する。

同期機の端子電圧の対称座標成分 $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E}_0$ と, 電機子電流の対称座標成分 $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ の関係を, 次式(対称座標法における同期機の表現式)で表す。 $\dot{Z}_{02}, \dot{Z}_{20}$ が, 新たに追加された項であり, 零相・逆相間の相互作用を表している。

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{E}_{10} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 \\ \dot{E}_2 &= -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 - \dot{Z}_{20} \dot{I}_0 \\ \dot{E}_0 &= -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 - \dot{Z}_{02} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

相互作用の係数は, 双方向で等しいので, $|\dot{Z}_{02}| = |\dot{Z}_{20}|$ である。また $\overline{}$ は, 複素共役であり, 電流と電圧の位相の和が一定となる位相関係を表現している。供試機では $Z_2 = 3.96\Omega, Z_0 = 0.85\Omega, Z_{02} = Z_{20} = 0.33\Omega$ である。

〈5・2〉 同期機の表現式の検証 対称座標法における同期機の表現式(11)式の妥当性を検証するため, 図6に示す回路で実験を行った。電機子巻線の b 相- c 相間に負荷 Y_{bc} , a 相-中性点間に負荷 Y_a (ともに力率0.1遅れ)を接続する。

図6の回路で, 界磁を一定電圧で励磁し, 同期機を定格速度で運転する。 $|Y_{bc}|$ を変化させながら, 各部の電圧, 電流を測定する。このとき, I_a の実効値が一定となるように $|Y_a|$ を調整する。 $I_f = 1.5$ A, $I_a = 15$ A の場合を図7に示す。

この回路では $I_a = 3 \cdot I_0$ となるので, 零相電流 I_0 は一定に保たれる。しかし, 実測した零相電圧 E_0 は, 図7に示すように変化する。これは, 零相・逆相相互作用から説明できる。 I_0, I_2 の実測値を(11)式に代入して, 従来の表現式と, Z_{02} を考慮した式による E_0 の計算値を図7に併せ

図6 実験回路
Fig. 6. Experimental circuit.

図 7 修正した表現式と従来の表現式の比較
Fig. 7. Comparison between revised expression and conventional expression.

て示す。従来理論では E_0 の変化を説明できないが、零相・逆相相互作用を考慮すると実測値の変化を説明できることがわかる。

6. む す び

同期機において零相回路と逆相回路の間に、相互干渉が生じることを実験的・理論的に示した。

従来の対称座標法では、同期機の逆相成分と零相成分は独立しているとされてきた。しかし、同期機を不平衡状態で運転した実験の結果、ある突極機において、零相回路と逆相回路が相互干渉することが明らかになった。すなわち、電機子巻線に零相電流のみを流した状態で逆相電圧が発生することを示した。この現象と、さきに示した逆相電流による零相電圧の発生を考え合わせると、逆相、零相回路間に相互作用があることが明らかになった。このとき、逆相電流から零相電圧への比例係数と、零相電流から逆相電圧への比例係数は等しくなる。

次に、この干渉の発生機構について、同期機内部の空けき磁束の観点から理論的な検討を行った。すなわち、電機子巻線分布が空間第三調波成分を含むとき、零相電流から時間基本・空間第三調波起磁力が発生する。この起磁力から、回転子の突極性および界磁電流第二調波により、空けき磁束に時間基本・逆回転成分が発生する。この磁束分布成分が、電機子線に鎖交して逆相電圧となることを理論的に示した。理論的に計算された値は、実験値とよく一致し理論の妥当性を示している。

更に、対称座標法における同期機の表現について、本論文の効果を表す項を付加した表現式を提案し、実験により検証した。なお、本論文は制動巻線がない場合を述べた。制動巻線があると逆相磁界に対する突極性が小さくなるため、逆相・零相間の相互作用は小さくなると予想される。

その検証は今後の課題である。

(平成 5 年 1 月 26 日受付, 同 5 年 6 月 3 日再受付)

文 献

- (1) 例えば, 上之園: 現代電機工学 (昭 55) オーム社
- (2) 上田・朝倉・引原: 「不平衡負荷時における同期発電機の特性に関する一考察」, 電気学会回転機研究, RM 88-12 (昭 63)
- (3) 高瀬・朝倉・引原・松村・上田: 「同期機の逆相電流により生じる零相電圧」, 電学論 D, 113, 381 (平 5)
- (4) 上田・朝倉・引原: 「突極型同期機の電機子巻線構造から生じる対称分回路間の相互干渉」, 昭 63 電気関係学会関西支部連大, G 163
- (5) 上之園・上田・七原・金子: 「定態時における同期発電機の空けき磁束とそれに基づく特性解析」, 電学論 B, 102, 281 (昭 57)
- (6) 「同期機試験法要綱」, 電学技報 (II 部), No. 18 (昭 47)
- (7) 高瀬・松村・上田: 「パーミアンスによるギャップ磁束密度算定手法に基づく同期発電機モデル」, 電学論 D, 111, 865 (平 3)

高瀬 冬 人 (正員) 1956 年 3 月 3 日生。1983 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。同年 (株) 日立製作所入所。1986 年京都大学助手。工学博士。主として、電子回路の非線形現象の研究、メカトロニクスの制御系の研究、同期機の空けき磁束の研究に従事。

朝倉 孝 宜 (非会員) 1964 年 5 月 8 日生。1989 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。在学中、同期機の不平衡運転時の特性を研究。現在、関西電力 (株) 勤務。

松村 年 郎 (正員) 1951 年 5 月 1 日生。1979 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学助手、1987 年同講師、1989 年京都大学講師、1992 年名古屋大学助教授、現在に至る。工学博士。主として、大電流および電気エネルギーの有効利用に関する研究。回転機空けき磁束の挙動に関する研究に従事。

上田 院 亮 (正員) 1936 年 12 月 23 日生。1964 年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学助手、1967 年講師、1971 年助教授、1985 年教授。工学博士。主として、電気・電子回路における非線形現象の研究、空けき磁束からみた回転電気機械の諸特性に関する研究に従事。