誘導円板形継電器の地震時誤動作の 発生機構に関する研究*

(水平二次元加振による誤動作発生機構)

藤田 隆史**, 井上 昭彦***
Takafumi FUJITA, Akihiko INOUE
服部 忍**, 柴田 碧**
Shinobu HATTORI, Heki SHIBATA

Key Words: Vibration, Induction Disk Type Relay, Malfunction under Earthquake Condition, Mechanism of Malfunction, Horizontal Two-Dimensional Excitation

1. ま え が き

誘導円板形継電器はアルゴの円板の作動原理を応用して過電流や過電圧などが発生した場合に円板(アルミニウム製)が垂直軸を中心に回転し、軸に取付けられた可動接点が固定接点に接触して、しゃ断器を作動させる(トリップさせる)機能を有するもので、変電所、発電所等における送配電系統、発電機、変圧器などの保護継電器として広範囲に使用されているものである。しかしながら、過去の地震での誤動作例も報告されており⁽¹⁾、系統や機器の地震時機能維持の観点からその誤動作が従来から問題とされていた。しかし、その誤動作発生機構は不明であった。この形式の継電器は水平一次元加振で誤動作を起こさせるためには非常に大きな加速度が必要となるが、水平二次元加振では比較的小さな加速度で誤動作の起こることが最近判明したものである⁽²⁾。

ところで、機械工学の分野における耐震問題には、単に構造破壊に対する耐震性だけでなく機能破壊に対する耐震性の要求される場合が多く、このことが機械工学の分野における耐震工学の大きな特徴となっている。本研究が対象とする継電器の地震時誤動作の問題はその典型例といえることができる。また、後述のように、誘導円板形継電器の誤動作発生機構には水平二次元加振が本質的な役割を果たすが、従来の耐震工学では、このような現象はあまり知られていない。さらに、本現象は一種の不安定現象であるが、この種の地震時挙動もほとんど知られていない。

誘導円板形継電器は主に用途によって、過電流継電器、過電圧・不足電圧継電器、不足周波数継電器、地絡継電器、方向継電器、比率差動継電器など多種のものが製造、使用されているが、構造的にはほぼ同一のものである。そこで、本研究では対象機種として、①過電流継電器 A (短限時特性)、②過電流継電器 B (長限時特性)、③過電圧・不足電圧継電器の三機種を選定した。過電流継電器は最も代表的な継電器であるため、①と②の二機種を選定した(両者の主な違いは制動磁石(永久磁石)による減衰力が②の方が大きい)。また③は、過電流継電器をはじめ大多数の継電器では誤動作の起こる円板の回転方向が一方向に限られているのに対して、両方向の回転に対して誤動作の可能性を持っているため、対象機種に選定した。

2. 誘導円板形継電器の構造と 誤動作現象の説明

2.1 誘導円板形継電器の構造⁽³⁾ 図1に誘導円板形継電器の主要部の構造を示す。過電流継電器の場合、図1(a)の電磁石には通常状態においても電流が流れており、円板は電磁石からトルクを受けているが、このトルクは渦巻ばねのセットアップ・トルクによって相殺されており、円板は回転しない。しかし、

図1 誘導円板形継電器の主要部構造

* 昭和58年10月10日 第61期全国大会講演会において論文講演として講演、原稿受付 昭和58年3月30日。

** 正員、東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

*** 正員、新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 (〒476 東海市東海町5-3)。

異常状態において電磁石を流れる電流がある設定値を越える場合には電磁石によるトルクがばねによるトルクに打ち勝ち、円板は図1(a)に示す方向に回転し、可動接点と固定接点が接触して保護回路が作動する。過電圧・不足電圧継電器の場合には、通常状態では可動接点は中立の位置にあり、過電圧、不足電圧に応じて可動接点が左右に回転し、両方にある固定接点のいずれかに接触すると保護回路が作動する。

図1(b)に示すように、軸の上部はピンと上部軸受によって枠に支持されており、ピンと上部軸受の間にはほとんどガタはない。軸の下部はピボットになっており、ジュエル(受石)とリングを有する下部軸受を介

して枠に支持されている。ピボットとリングの間にはわずかな間隙(0.25 mm)があり、次に述べるように、下部軸受でのピボットの運動が地震時誤動作の発生機構を構成している。

2.2 誤動作現象および誤動作発生機構の概略
地震動によって円板が回転し、接点が閉じる誘導円板形継電器の地震時誤動作現象は単純な強制振動によるものではない。

図2は過電流継電器Aを正弦波によって水平一次元加振した場合の、ピボットの下部軸受に対する相対変位と円板回転角の測定結果を示したものである。ピボットは軸受内を加振方向に直線的に運動し、リング

図2 水平一次元正弦波加振による応答

図3 水平二次元正弦波加振による応答

と衝突振動を繰返すが、円板は回転していない。図3は同じ過電流継電器を正弦波による水平二次元加振によって、円板の回転方向と反対方向の円運動をさせた場合のピボットの変位と円板回転角の測定結果である。この場合には、ピボットは加振入力と同じ振動数で軸受内をふれまわり、円板は回転を起こしている。このような、円板が回転する現象は次のように説明される。

理解しやすい場合として、図3と同様、継電器が水平二次元加振によって円軌道上を反時計方向に並進運動する場合を考える。このとき、リングとピボットは図4に示すような運動をする。すなわち、ピボットは遠心力によってリング内を反時計方向にふれまわることになり、その結果、ピボットはリングから図のFで示すような摩擦力を受け、Fによるトルクによってピボット、すなわち、円板は時計方向に回転することになる。この現象は回転軸の不安定現象としてよく知られている軸と軸案内間の摩擦に起因するふれまわり現象の逆の現象といえることができる。

実際の誤動作現象には、ピボットとリング間の摩擦によるトルクの他に、ピボットとジュエル間の摩擦によるトルクが大きく寄与している。後者のトルクは、ピボット先端がジュエルよりも曲率半径の短い球面であるため、ピボットがふれまわるとピボットとジュエルの接触点がピボットの中心軸上からずれ、図4と同様な理由により発生する、摩擦に起因したトルクである。

なお、誤動作の発生機構は電磁石や制動磁石による電磁力と無関係であることは実験によって確かめられている。

3. 理論解析

円板・軸の運動は剛体の拘束運動として定式化されるが、ピボットがリングに拘束されるか否かによって拘束条件が異なるため、以下のように二つの場合に分けて行う。

図4 誤動作発生機構の説明図

3.1 ピボットがリングに拘束されていない場合—**Phase I** 次の座標系とベクトルを定義する（図5参照）。

O-XYZ系：絶対静止空間に固定した座標系

O_J-xyz 系：円板・軸の支持枠に固定した座標系（ジュエル（球面）の曲率中心 O_J を原点とする）

$X_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$ ： O_J のO-XYZ系における位置ベクトル（ T は転置を示す）で地震変位に対応

$x = (x, y, z)^T$ ：ピボット先端（球面）の曲率中心 O_P の O_J-xyz 系における位置ベクトル

このとき、 x には次の拘束条件がある。

$$x^2 + y^2 + z^2 = (r_J - r_P)^2 \equiv r_1^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 r_J, r_P はおのおのジュエル、ピボット先端の曲率半径である。上式より $z (< 0)$ は次式で与えられる。

$$z = -\sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

3.1.1 ふれまわりについての運動方程式 以下では仮想仕事の原理に基づいて運動方程式を導出する。この場合、仮想変位 $\delta x = (\delta x, \delta y, \delta z)^T$ は式(1)を満たすものでなければならない。したがって、

$$x\delta x + y\delta y + z\delta z = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、 $\delta x, \delta y, \delta z$ は独立ではなく、 δz は次式で与えられる。

$$\delta z = (x\delta x + y\delta y) / \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

円板・軸に作用する力として、慣性力 f_i 、慣性抵抗モーメント M 、制動磁石と電磁石による減衰力 $f_d (=$

図5 解析モデルの座標系と円板・軸に作用する力

$f_{Dx} + f_{Dy}$), ジュエルからの抗力 N_J , ジュエルにおける摩擦力 F_J , 重力 f_G を考え (図5参照), それらが仮想変位 δx によってなす仮想仕事を求めると, おおの, 次のようになる。

$$\delta W_I = -M(l_G/l_P)\{(\ddot{X}_0 + \dot{x}l_G/l_P)\delta x + (\ddot{Y}_0 + \dot{y}l_G/l_P)\delta y + \ddot{Z}_0\delta z\} \quad (5)$$

$$\delta W_M = -J(\ddot{x}\delta x + \ddot{y}\delta y)/l_P^2 \quad (6)$$

$$\delta W_D = -(l_D/l_P)(C_y\dot{x}\delta x - C_x\dot{y}\delta y) \quad (7)$$

$$\delta W_N = -N_J(r_J/r_1)(x\delta x + y\delta y + z\delta z) = 0 \quad (8)$$

$$\delta W_F = -\mu_J N_J(r_J/r_1)\{(\dot{r}_J\dot{x} + r_{PJ}\dot{y})\delta x + (r_J\dot{y} - r_{PJ}\dot{x})\delta y + r_J\dot{z}\delta z\} / \sqrt{r_J^2(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + 2r_Jr_P(\dot{x}y - x\dot{y})\dot{a} + r_P^2(x^2 + y^2)\dot{a}^2} \quad (9)$$

$$\delta W_G = -Mg(l_G/l_P)\delta z \quad (10)$$

ただし, 式(5), (6)において, $\ddot{z}$ は他に比べて十分に小さいものとして無視してある。ここで, M は円板・軸の質量, J は円板・軸の重心における x および y 軸まわりの慣性モーメント, l_G, l_P, l_D は軸上端のピンから, おおの, 重心, O_P , 円板 (減衰力が作用する面) までの距離, α は円板・軸の支持枠に対する回転角, C_x, C_y はおおの制動磁石, 電磁石の減衰定数, N_J は抗力の大きさ, μ_J はピボットとジュエル間の動摩擦係数, g は重力加速度である。

全仮想仕事 δW は,

$$\delta W = \delta W_I + \delta W_M + \delta W_D + \delta W_N + \delta W_F + \delta W_G = 0 \quad (11)$$

であり, 式(2), (4)を用い, δx と δy は独立であることから, 次の二式が得られる。

$$\begin{aligned} & \{(Ml_G^2 + J)/l_P^2\}\ddot{x} + C_y(l_D/l_P)\dot{x} \\ & + M(g + \ddot{Z}_0)(l_G/l_P)x/\sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \\ & + \mu_J N_J(r_J/r_1)[r_J\{\dot{r}_1^2\dot{x} - y(\dot{x}y - x\dot{y})\} \\ & + r_{PJ}(r_1^2 - x^2 - y^2)\dot{a}]/\sqrt{\Phi} \\ & = -M(l_G/l_P)\ddot{X}_0 \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \{(Ml_G^2 + J)/l_P^2\}\ddot{y} - C_x(l_D/l_P)\dot{y} \\ & + M(g + \ddot{Z}_0)(l_G/l_P)y/\sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \\ & + \mu_J N_J(r_J/r_1)[r_J\{\dot{r}_1^2\dot{y} + x(\dot{x}y - x\dot{y})\} \\ & - r_{PJ}(r_1^2 - x^2 - y^2)\dot{a}]/\sqrt{\Phi} \\ & = -M(l_G/l_P)\ddot{Y}_0 \quad (13) \end{aligned}$$

ただし,

$$\begin{aligned} \Phi & \equiv r_J^2(r_1^2 - x^2 - y^2)\{\dot{r}_1^2(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) - (\dot{x}y - x\dot{y})^2\} \\ & + (r_1^2 - x^2 - y^2)^2(2r_Jr_P(\dot{x}y - x\dot{y})\dot{a} \\ & + r_P^2(x^2 + y^2)\dot{a}^2) \quad (14) \end{aligned}$$

式(12), (13)の両辺に l_P を掛けると, 各々の式は上部軸受における y, x 軸まわりのモーメントのつりあい式となっていることがわかる。また, N_J は z 軸方

向の力のつりあいより, 次のように求められる。

$$N_J = M(g + \ddot{Z}_0)(r_1/\sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2})\sqrt{\Phi} / \{\sqrt{\Phi} - \mu_J r_J r_1(x\dot{x} + y\dot{y})\} \quad (15)$$

3.1.2 回転についての運動方程式 円板・軸の回転についての運動方程式は次のように書くことができる。

過電流継電器の場合:

$$I\ddot{\alpha} + C_r\dot{\alpha} + Q(\alpha) = k_I^2 - T_0 + T_J \quad (16)$$

ただし,

$$Q(\alpha) = \begin{cases} Ka_F + K_F(\alpha - \alpha_F) : \alpha \geq \alpha_F \\ Ka : 0 \leq \alpha \leq \alpha_F \\ K_S\alpha : \alpha \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

過電圧・不足電圧継電器の場合:

$$I\ddot{\alpha} + C_r\dot{\alpha} + Q(\alpha) = T_J \quad (18)$$

ただし,

$$Q(\alpha) = \begin{cases} Ka_F + K_F(\alpha - \alpha_F) : \alpha \geq \alpha_F \\ Ka : -\alpha_F \leq \alpha \leq \alpha_F \\ -Ka_F + K_F(\alpha + \alpha_F) : \alpha \leq -\alpha_F \end{cases} \quad (19)$$

ここで, I は円板・軸の軸まわりの慣性モーメント, C_r は回転に対する減衰定数, K はうず巻きばねのばね定数, K_F は固定接点のばね定数, K_S はストップのばね定数, α_F は固定接点までの回転角, k_I^2 は電流によるトルク, T_0 はセットアップ・トルク, T_J は誤動作トルクである。

誤動作トルク T_J は摩擦力 F_J により点 O_P において発生するトルク $(r_P/r_1)x \times F_J$ の内の z 軸まわり (負方向) のトルクで近似され, 次のように求められる。

$$T_J = -\mu_J N_J(r_P/r_1)(r_1^2 - x^2 - y^2) \times \{r_J(\dot{x}y - x\dot{y}) + r_P(x^2 + y^2)\dot{a}\}/\sqrt{\Phi} \quad (20)$$

3.1.3 ピボットとリングの衝突による接続条件 円板・軸のふれまわりが大きくなるとピボットとリングが衝突する。この衝突は,

$$x^2 + y^2 = \{(d_R - d_P)/2\}^2 \equiv r_2^2 \quad (21)$$

において発生する。ここで, d_R, d_P はおおのリングの内径, ピボットの外径である。

ピボットの衝突直前の速度 (添字 b で示す) と衝突直後の速度 (添字 a で示す) の関係を以下のように定式化する。一般に, ピボットの速度の x 方向成分 $\dot{x}$, y 方向成分 $\dot{y}$ と半径方向成分 $\dot{p}$, 接線方向成分 $\dot{q}$ には次の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \begin{bmatrix} x & y \\ -y & x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (22)$$

衝突により, 半径方向の速度は向きが反対になり, 大きさは反発係数 e を乗じたものに減少するが, 接線方

向の速度は変化しないものとする。すなわち、

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_a \\ \dot{q}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}_b \\ \dot{q}_b \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式(21)～(23)より、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \end{bmatrix} = \frac{1}{r_2^2} \begin{bmatrix} -ex^2+y^2 & -(e+1)xy \\ -(e+1)xy & x^2+ey^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (24)$$

3.2 ピボットがリングに拘束されている場合——

Phase II ピボットがリングとの衝突を繰返すと半径方向の速度がほとんど零となって、ピボットがリングに接触したまま運動する状態になる。Phase IIでの拘束条件は式(1)の他にもう一つが加わり、次のようになる。

$$x^2+y^2+z^2=r_1^2, \quad x^2+y^2=r_2^2 \quad \dots\dots\dots (25)$$

したがって、

$$z = -\sqrt{r_1^2 - r_2^2} = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (26)$$

となり、円板・軸は平面運動を行う。

3.2.1 ふれまわりについての運動方程式 Phase IIにおけるふれまわりについての運動方程式は、Phase Iにおける式(12)、(13)に、リングから受ける抗力 N_R と摩擦力 F_R の影響を加え、式(25)の拘束条件を満たすように、

$$x = r_2 \cos \varphi, \quad y = r_2 \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (27)$$

とおいて、 φ についての方程式を求めればよい。すなわち、式(12)、(13)に

$$N_R = -N_R(\cos \varphi \sin \varphi)^T \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$F_R = -\mu_R N_R \text{sgn}(d_R \dot{\varphi} - d_P \dot{\alpha})(-\sin \varphi \cos \varphi)^T \quad \dots\dots\dots (29)$$

の影響を加え、その両式より N_R を消去すると、次の φ に関する方程式が得られる。ただし、 N_R はリングから受ける抗力の大きさ、 μ_R はピボットとリング間の動摩擦係数である。

$$\begin{aligned} & \{(M l_G^2 + J)/l_P^2\} r_2 \ddot{\varphi} - (l_D/l_P)(C_x \cos \varphi \\ & + C_y \sin \varphi) \dot{\alpha} + M(g + \ddot{Z}_0)(r_1/\sqrt{r_1^2 - r_2^2}) \\ & \times \mu_f \text{sgn}(r_1 \dot{\varphi} - r_P \dot{\alpha}) + \{[(M l_G^2 + J)/l_P^2] r_2 \dot{\varphi}^2 \\ & + (l_D/l_P)(C_x \sin \varphi - C_y \cos \varphi) \dot{\alpha} \\ & - M(g + \ddot{Z}_0)(l_G/l_P) \\ & \times (r_2/\sqrt{r_1^2 - r_2^2})\} \mu_R \text{sgn}(d_R \dot{\varphi} - d_P \dot{\alpha}) \\ & = M(l_G/l_P)\{\ddot{X}_0 \sin \varphi - \ddot{Y}_0 \cos \varphi \\ & + (\ddot{X}_0 \cos \varphi + \ddot{Y}_0 \sin \varphi) \mu_R \text{sgn}(d_R \dot{\varphi} - d_P \dot{\alpha})\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (30)$$

また、 N_R は次のように求められる。

$$\begin{aligned} N_R = & (l_P/l_R)\{[(M l_G^2 + J)/l_P^2] r_2 \dot{\varphi}^2 \\ & + (l_D/l_P)(C_x \sin \varphi - C_y \cos \varphi) \dot{\alpha} \\ & - M(g + \ddot{Z}_0)(l_G/l_P)(r_2/\sqrt{r_1^2 - r_2^2}) \} \end{aligned}$$

$$-M(l_G/l_P)(\ddot{X}_0 \cos \varphi + \ddot{Y}_0 \sin \varphi) \dots\dots\dots (31)$$

ここで、 l_R は軸上端のピンからリングまでの軸に沿った距離である。

3.2.2 回転についての運動方程式 Phase IIの場合、式(16)、(18)はそれぞれ次のようになる。

過電流継電器の場合：

$$I \ddot{\alpha} + C_r \dot{\alpha} + Q(\alpha) = k_f^2 - T_0 + T_f + T_R \quad \dots\dots\dots (32)$$

過電圧・不足電圧継電器の場合：

$$I \ddot{\alpha} + C_r \dot{\alpha} + Q(\alpha) = T_f + T_R \quad \dots\dots\dots (33)$$

すなわち、誤動作トルクはジュエルとの摩擦力によるトルク T_f とリングとの摩擦力によるトルク T_R の和になる。 T_f は式(20)より次のようになる。

$$\begin{aligned} T_f = & M(g + \ddot{Z}_0)(r_P r_2 / \sqrt{r_1^2 - r_2^2}) \\ & \times \mu_f \text{sgn}(r_1 \dot{\varphi} - r_P \dot{\alpha}) \quad \dots\dots\dots (34) \end{aligned}$$

また、 T_R は次のように求められる。

$$T_R = (d_P/2) \mu_R N_R \text{sgn}(d_R \dot{\varphi} - d_P \dot{\alpha}) \quad \dots\dots\dots (35)$$

3.3 Phase I と Phase II の接続条件

(i) Phase I → Phase II ピボットとリングの衝突後の半径方向の速度 $\dot{p}_a$ が零になったとき、すなわち、

$$\dot{p}_a = -e(x\dot{x} + y\dot{y})/r_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (36)$$

のとき、Phase I から Phase II に移り、Phase II では、

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \cos^{-1}(x/r_2) = \sin^{-1}(y/r_2) \\ \dot{\varphi} &= -\dot{x}/y = \dot{y}/x \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (37)$$

を初期条件として計算する。

(ii) Phase II → Phase I ピボットがリングか

(a)

(b)

図 6 供試体 (左から過電流継電器 A, 過電流継電器 B, 過電圧・不足電圧継電器)

ら受ける抗力 N_R が 0 になったとき、すなわち、

$$N_R = 0 \dots \dots \dots (38)$$

のとき、Phase II から Phase I に移り、Phase I では、

$$\left. \begin{aligned} x &= r_2 \cos \phi, y = r_2 \sin \phi \\ \dot{x} &= -r_2 \dot{\phi} \sin \phi, \dot{y} = r_2 \dot{\phi} \cos \phi \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (39)$$

を初期条件として計算する。

4. 水平二次元加振実験の概要

4.1 供試体 加振実験の供試体を選定した過電流継電器 A、過電流継電器 B、過電圧・不足電圧継電器を図 6 に示す。図 6 (a) は外箱に収められた状態であり、継電器はこの状態で盤に取付けられている。図 6 (b) は継電器本体を外箱から取出した状態であり、加振実験はこの状態のものについて行った。誘導円板形継電器が構造的にはほぼ同一のものであることが図 6 からよく理解されよう。

供試体の試験条件は次のとおりである。

- ① 過電流継電器 A の場合 ダイヤル開度：1 (11.9°)，タップ：4 A，通電率：80 %
- ② 過電流継電器 B の場合 ダイヤル開度：1 (23.6°)，タップ：4 A，通電率：80 %
- ③ 過電圧・不足電圧継電器の場合 ダイヤル開度：1 (10.5°)，タップ：96 V，電圧：中立点電圧
ここで、ダイヤル開度とは通常状態での可動接点と固定接点間の角度を示すものである。

4.2 実験方法 実験は電気油圧式アクチュエータ駆動の振動台上に、加振方向が直交するように地震周波数帯域用電磁加振器を設置し、電磁加振器に供試体を搭載して水平二次元加振実験を行った。実験装置を図 7 に示す。

円板・軸のふれまわり変位と回転角の測定は、図 7 に示すように、90° 離れた 2 箇所の渦電流式非接触変位計（継電器の枠に固定されており、測定方向は各加振方向に平行）によって行った。その理由は以下の通りである。継電器の円板は真円でなく、らせん形をし

図 7 実験装置

ているため、加振によって円板がふれまわると同時に回転すると、各変位計の出力にはふれまわりの変位と回転による変位の合成された変位が現れるが、前者は加振振動数と同じ振動数を持った振動変位であり、後者は非常に低い振動数のドリフト変位である。したがって、変位計の出力をハイパスフィルタとローパスフィルタに通すことによって、それぞれ、円板（すなわち、ピボット）のふれまわり変位と円板の回転角を得ることができる。ただし、回転角については、別途求めておいた変位計のドリフト成分と回転角の更正曲線を用いる。

実験に用いた加振波は、実地震である El Centro (1940 年 Imperial Valley 地震) での NS 方向と EW 方向の記録および Taft (1952 年 Kern County 地震) での S 69°E 方向と N 21°E 方向の記録を用いて作成した盤の模擬応答波である。すなわち、El Centro 波の場合には 4 種類の一質点系（固有振動数が 6.5 Hz, 7.5 Hz, 10 Hz, 16 Hz, 臨界減衰比はともに 1 % の一質点系）の応答加速度波を、Taft 波の場合にも 4 種類の一質点系（固有振動数が 7 Hz, 9 Hz, 14 Hz, 19 Hz, 臨界減衰比はともに 1 % の一質点系）の応答加速度波を盤の模擬応答波として用いた。ただし、最大加速度はすべての場合を通して、二方向とも 1960 cm/s² を目標とした。

5. 実験および解析結果

5.1 過電流継電器 A の場合 図 8 は過電流継電器 A の場合の円板回転角についての実験結果と解析結果を示したものである。同図に示すような全部で 16 通りの加振実験を行ったが、その内の 2 ケースで誤動作が発生した。図 8 の結果は、誤動作現象が単に入力加速度だけに依存するものでなく、二次元入力間の位相関係に大きく依存することを明らかに示してい

図 8 過電流継電器 A の円板回転角

る。このことは前述の誤動作発生機構から容易に理解されることであり、要するに円板回転角が大きくなるかどうかは、二次元加振によって過電流継電器が反時計方向に円またはだ円に似た軌道で運動を継続する時間がどの程度あるか、また、そのときの加速度がどの程度大きいかによって依存する。

図8には解析結果も示されており、Taft波による加振の場合に適合性が悪くなっているが、ほぼ満足し得る結果が得られている。図9はEl Centro波の6.5 Hzフィルタによる加振波の場合の実験結果と解析結果を示したもので、誤動作が発生した場合のものである。

表1 過電流継電器Bの円板回転角

			ACC. ROTATION	
			(cm/s ²)	(deg.)
EL CENTRO	6.5Hz	X NS	1881	3.2
		Y EW	1872	
		X EW	1809	4.3
		Y NS	2120	
		X NS	1832	5.0
		Y EW	1879	
	7.5Hz	X NS	1702	3.0
		Y EW	1978	
		X EW	2169	
		Y NS	2020	3.7
		X NS	1833	4.6
		Y EW	2041	
T A F T	10.0Hz	X NS	1734	2.9
		Y EW	1892	
		X EW	1891	3.6
		Y NS	1887	
		X NS	1728	3.3
		Y EW	1721	
	7.0Hz	X NS	1811	3.4
		Y EW	1891	
		X EW	2013	
		Y NS	1898	3.2
		X NS	1706	
		Y EW	1810	3.0
	9.0Hz	X NS	1803	
		Y EW	1808	4.1
		X EW	1788	
		Y NS	1787	4.5
		X NS	1864	
		Y EW	2150	4.1
14.0Hz		X NS	1888	
		Y EW	2033	4.1
		X EW		
		Y NS		
		X NS		
		Y EW

図9 過電流継電器Aの応答波形例

図10 過電圧・不足電圧継電器の円板回転角

表2 卓越振動数が異なる水平二次元入力の場合の円板回転角(過電圧・不足電圧継電器の場合)

X \ Y	6Hz	7Hz	8Hz
6Hz	10.8 (deg.)	7.1	3.0
7Hz	-9.1	5.0	-3.1
8Hz	-2.6	5.0	-7.0

X: El Centro-NS, 1960 cm/s²

Y: El Centro-EW, 1960 cm/s²

図11 過電圧・不足電圧継電器の応答波形例

る。同図の解析結果に示されている誤動作トルクをみると、ピボットとジュエル間の摩擦によるトルクが約5秒間正の方向(円板を回転させる方向)に発生し、ピボットとリング間の摩擦によるトルクも約1秒間正の方向に発生している。それに対して、同じ加振波の組合せでも X, Y 方向入力が逆の場合には、トルクは負の方向(円板をストップに押付ける方向)に発生するため、円板は回転しない。

5.2 過電流継電器 B の場合 表1は過電流継電器 B の場合の円板回転角についての実験結果を示したものである。この場合には全ケースを通して円板回転角は5°以下に収っており、誤動作に要する角度の23.6°(ダイヤル開度1の場合)と比べると十分に小さな回転角である。加振入力は過電流継電器 A の場合とほぼ同じであるのに円板回転角が小さくなる理由は、

制動磁石による減衰力がこの場合には非常に大きく、発生する誤動作トルクが同じであっても円板回転角がこのような小さくなると考えられる。

5.3 過電圧・不足電圧継電器の場合 図10は過電圧・不足電圧継電器の場合の円板回転角についての実験結果と解析結果を示したものである。16通りの加振実験の内、その半分の8ケースで誤動作が発生しており、この継電器は誤動作の起こりやすい継電器といえることができる。

図10に解析結果が示されているが、この場合には過電流継電器 A の場合よりも実験結果との良好な一致が得られている。図11(a), (b)は El Centro 波の10 Hz フィルタによる加振波の場合の実験結果と解析結果を示したものである。この継電器の場合には、(b)のように誤動作トルクが負の方向に発生してい

図12 卓越振動数が異なる水平二次元入力の場合の応答波形例(過電圧・不足電圧継電器の場合)

図 12 卓越振動数が異なる水平二次元入力の場合の応答波形例 (過電圧・不足電圧継電器の場合)

も円板は負の方向に回転して誤動作に至ってしまう。また、(a)と(b)を比較すると、円板の回転角や誤動作トルクがほぼ対称になっていることがわかる(入力が(a)と(b)で正確に対称なら、解析上は応答も対称となる)。

5.4 卓越振動数の異なる二次元加振の場合 以上に示した実験および解析結果は、すべて二次元加振入力の卓越振動数が一致している(同一の固有振動数を持つ一質点系フィルタによる)場合であった。継電器が卓越振動数の異なる二次元加振入力を受ける場合については、以下に述べるように解析によって検討した。

対象には過電圧・不足電圧継電器を選定した。表2は、X方向入力にEl Centro-NS波の6, 7, 8 Hzの

一質点系フィルタ(臨界減衰比はすべて1%)の応答加速度波(最大加速度1960 cm/s²)を、Y方向入力にEl Centro-EW波の同じく6, 7, 8 Hzの一質点系フィルタ(臨界減衰比はすべて1%)の応答加速度波(最大加速度1960 cm/s²)を用いた場合の、すべての組合せに対する円板回転角(その絶対値が最大となる回転角)を示したものである。表2では、6 Hz-6 Hzの組合せだけが10.5°を越えて誤動作に至っている。そして、X, Y入力のいずれか一方が7, 8 Hzと離れるに従って回転角の絶対値は減少している。この傾向は8 Hz-8 Hzの組合せの場合も同様である。しかし、7 Hz-7 Hzの組合せから一方が6, 8 Hzとなる場合には、逆に回転角(絶対値)が大きくなる場合もある。したがって、二次元入力の卓越振動数が一致している場合に円板の回転角は最大となり、卓越振動数の違いが大きくなるにつれて回転角は小さくなるということは、常に期待できることではない。

つぎに、表2において、6 Hz-6 Hzの組合せから一方の入力の卓越振動数が離れる場合に回転角の正負が反転する場合がある。図12(a), (b), (c)に示したのがこの場合の解析結果である。Y方向入力の卓越振動数が1 Hzだけずれた(b)での円板の回転挙動は(a)でのそれから大きく変化している。すなわち、二次元入力の卓越振動数がずれる場合の円板の回転挙動の変化は決して連続的なものではない。したがって、この知見からも、卓越振動数の違いが大きくなるにつれて円板の回転角が小さくなるとは限らない、といえる。

以上の議論から、誘導円板形継電器の地震時挙動の検討を同一の卓越振動数を持つ水平二次元入力によって行うことが、一応、安全側の検討として妥当なものと考えられる。

6. あとがき

本研究では、誘導円板形継電器の地震時誤動作について、加振実験と理論解析により研究した結果、次のような結論を得ることができた。

(1) 誘導円板形継電器は、水平二次元正弦波加振により、従来の水平一次元正弦波加振によって調査された誤動作限界よりもはるかに低い加速度で誤動作の発生することが確認された。

(2) 誤動作発生機構が以下のように判明した。すなわち、水平二次元加振により軸下端のピボットが下部軸受内をふれまわり、ピボットとジュエル(受石)間およびピボットとリング間の摩擦によりトルクが発生し、それによって円板の回転することが明らかとなっ

た。

(3) 誤動作が発生するかどうかは単に入力加速度の大小だけでなく、水平二次元入力間の位相関係が非常に重要であることが明らかにされた。

(4) 卓越振動数の異なる水平二次元入力の場合、わずかな卓越振動数の違いが円板の回転挙動に大きな変化を与える場合があり、また、必ずしも、卓越振動数の違いが大きくなるにつれて円板の回転角が小さくなるとは限らないことが示された。

(5) 水平二次元加振を受ける継電器の円板・軸のふれまわり変位、円板回転角、誤動作トルクなどを、ほぼ満足し得る精度で解析可能な解析モデルが作成された。

文 献

- (1) 通産省公益事業局・地震対策小委員会, 電力流通設備の地震対策, (昭45).
- (2) 柴田・ほか2名, 機講論, No. 810-14 (昭56-10), 200.
- (3) 福田, 保護継電器ハンドブック, (昭42), 17, オーム社.

討 論

〔質問〕 原文 雄〔東京理科大学工学部〕

機能的機器の耐震機能性について興味ある研究に深い関心をもった。次の諸点について質問する。

(1) 図2, 3での加振振動数はどのように選定されたか。また加振振動数と継電器の誤動作の発生との関係があるか。

(2) 5・1節で二次元入力間の位相関係が重要であると述べているが、これを適確に示す実験事実があれは示されたい。

(3) このような誤動作を防止するには設計上どのような点に配慮すべきか。

〔回答〕 (1) 図2, 3での加振振動数は20 Hzであるが、この振動数に特別な意味はない。

円板・軸のふれまわりは剛体運動であるから、振動系のような意味での加振振動数に対する依存性はない。しかし、加振振動数が高くなれば、ふれまわりによって生じる遠心力が大きくなり、ピボットとジュエルあるいはリングとの接触力が大きくなり、その結果、誤動作トルクも大きくなる。したがって、図3のような位相条件で加速度一定の正弦波加振実験では、振動数の高い方が誤動作時間の短くなることが確かめられている。

(2) 「位相関係が重要」という記述は、発生トルクの大きさだけでなく、その向きも含めて述べたものであり、後者については、図8のX, Y方向入力を入れかえた場合の結果から明りようと思われる。なお、ご質問の回答には、水平二次元正弦波加振において、二入力の加速度振幅と加振振動数を等しくし、位相だけを変化させた場合の実験結果を示すのがよいかと考えられるが、直接的には、この実験はやっていない。

(3) 本研究に引続き、継電器の誤動作限界と誤動作防止に関する研究を行っており、次報において、具体的な対応策を明らかにしたいと考えている。

〔質問〕 長松 昭 男〔東京工業大学〕

(1) 本論文の解析モデルは、複雑な現象をかなり精度よく表現していると判断される。そこで、このモデルによるシミュレーションを繰返すことにより、誤動作が発生するための二次元入力間の位相関係と、卓越周波数の関係について、結論の(3)と(4)よりもさらに具体的な知見が得られるのではないかと、推定される。もしこの点について、すでに実行されているなら、お教えいただきたい。

(2) 本論文では、水平二次元入力のみについて論じられているが、垂直入力加わる場合について、解析モデルの作成の可能性と、誤動作の発生の可否について、ご意見をお知らせいただきたい。

〔回答〕 (1) 二入力間の卓越振動数の違いが円板の回転角に及ぼす影響は元の実地震波の性質に大きく影響されるので、一般的な結論は得にくいと思われる。本研究の後、種々の継電器の誤動作限界を求める研究も行っているが、その場合、各継電器の誤動作限界を、数種類の実地震波に対して、二入力の卓越振動数のマトリックスについて求めるには膨大な計算量が必要とするので、両方の卓越振動数が等しい場合を、一応、厳しい側の条件と考えて、卓越振動数ごとに誤動作限界となる入力加速度（二入力の最大加速度は等しいとする）を求める方法を取っている。この結果については次報で報告する予定である。

(2) 鉛直方向地震加速度が1g以下でピボットがジュエルと接触している範囲では、現在のモデルにも鉛直方向地震加速度の影響は考慮している〔式(5), (15)などの $\ddot{Z}_0$ は鉛直方向地震加速度〕。鉛直方向地震加速度はピボットとジュエル間の接触力、摩擦力、したがって誤動作トルクに直接的な変動〔式(34)などを参照〕を与えるが、円板の回転に関する振動系は非常に長周期（固有周期3秒以上）で減衰の大きい（減衰

比100%以上)系であるから、それらの変動分はすべて積分されてしまい、円板の回転角には重力加速度の影響だけが残るように考えられる。したがって、現実には考えられる大きさの鉛直方向地震加速度に対しては、その影響はあまりないと思われる。

〔質問〕 国 技 正 春〔石川島播磨重工業(株)〕

縦形回転機械の耐震問題など、同種の問題への応用が考えられ、すぐれた研究である。

ただ、発生機構が解明されたからには、その防止法

が提案されることが望まれる。機器全体を免震装置に乗せる方法もあるが、そのほかに何かお考えがあるか。

〔回答〕 本研究に引続き、誤動作防止方法の研究を行っている。そこでは、ピボットと下部軸受の形状を改良し、誤動作トルクを減少させる方法を試みている。また、ご指摘のように、免震装置による効果も検討することになっている。これらの結果は次報で報告する予定である。