

日立 UHY 形 高 速 度 モ ー 継 電 器

Hitachi Type UHY High Speed Mho Relay

渡 井 三 夫* 小 熊 巖*
Mitsuo Watai Iwao Oguma

内 容 梗 概

昭和 36 年、関西電力株式会社の 154 kV 送電線に合計 27 端局分のキャリヤリレーを納入したが、この主継電器は誘導円筒形の UHY 形モー継電器である。元来モー継電器は方向選択と測距特性を併有しているため制御力はほとんどなく、ごくわずかの不整回転力にも応動し過渡時のオーバーリーチ、誤動作などが生じやすい構成になっているが、本稿では電圧回路定数の検討によりかかる過渡時の継電器の好ましからざる現象を極力回避するに至った経過を主として述べる。

1. 緒 言

日立製作所では昭和 36 年に関西電力株式会社の関西、木曾幹線など、同社の 154 kV 幹線に合計 27 端局分のキャリヤリレーを納入しすでに一年あまりの運転実績を見ている⁽¹⁾⁽²⁾。納入系統は大阪市周辺の主要変電所と山側の水力地帯を結ぶ重要幹線で、いずれもわが国有数の長距離送電線で、このキャリヤリレーは新しく開発した誘導円筒形の UHY 形モー継電器を主体とし、短絡に対しては距離方向比較方式、地絡には電力方向比較方式を採用したものである。

距離継電器は周知のように基本的にはモー特性、インピーダンス特性、リアクタンス特性の 3 種があり、おもに線路インピーダンスと負荷インピーダンスの識別、故障点抵抗の影響から考えて、それぞれ長距離、中距離、短距離送電線の保護に適している。

このうちモー継電器は方向選択と測距特性を併有しているため制御力はほとんどなく、ごくわずかの不整回転力にも応動し、過渡時のオーバーリーチ、誤動作などの原因になりやすい。したがってモー継電器における最も大きな問題はこれら不整回転力の処理にあり、またこれによって継電器の良否がきめられるともいえよう。

本稿では UHY 形継電器について過渡時の動作を主として報告する。

2. UHY 形モー継電器の構造と動作原理

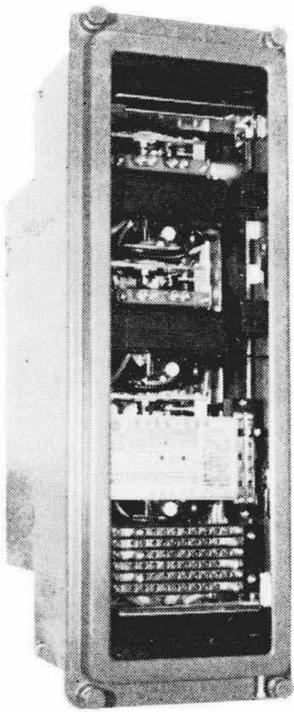
2.1 継電器の仕様と構造

定 格	110 V, 5 A, 50 または 60 連続
整 定 範 囲	第 1 段 (Y ₁) 3~30 Ω (1% Step) または 2~20 Ω (1% Step)
	第 2 段 (Y ₂) 3~30 Ω (1% Step)
	第 3 段 (OY ₃) 3~30 Ω (1% Step) 0~3 Ω (0.25 Ω Step) — オフセット
最大感度位相角	75 度

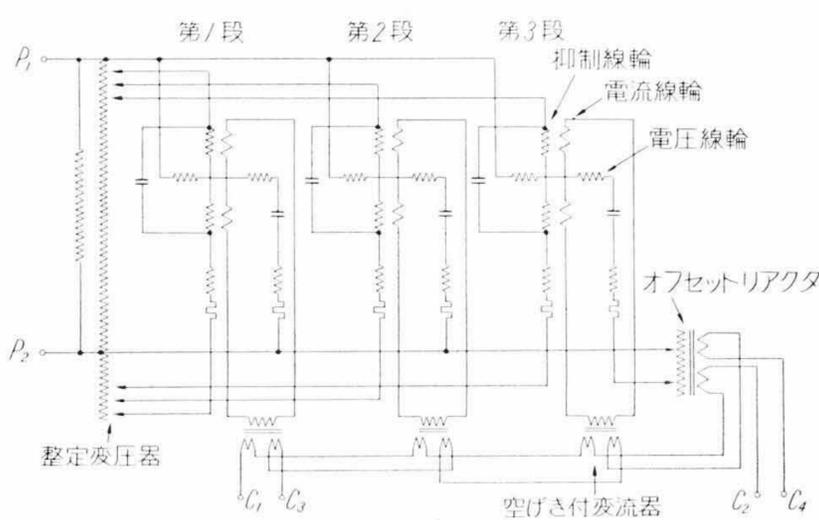
第 1 図に本継電器の外観、第 2 図に内部接続図、第 3 図に継電器要素の構造図を示す。継電器要素は図示のようにコイルを各磁極に巻いてあるので、構造が簡単で機械的精度が得やすく、また小形化できる特長を有している。

2.2 動作原理

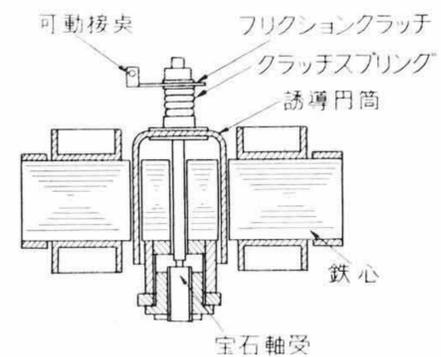
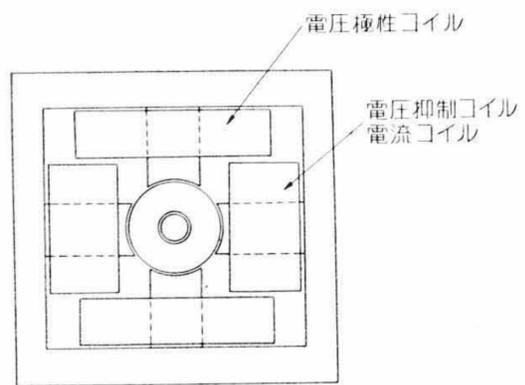
本継電器は第 1, 2, 3 段の 3 要素よりなり、1, 2 段はモー、3 段は脱調ロックの関係よりオフセットモー要素になっている。モー要素とオフセットモー要素はオフセット回路の有無が相異なるのみであるのでここではオフセットモー要素について述べる。



第 1 図 UHY 形 1G₂ 式高速度モー継電器外観図

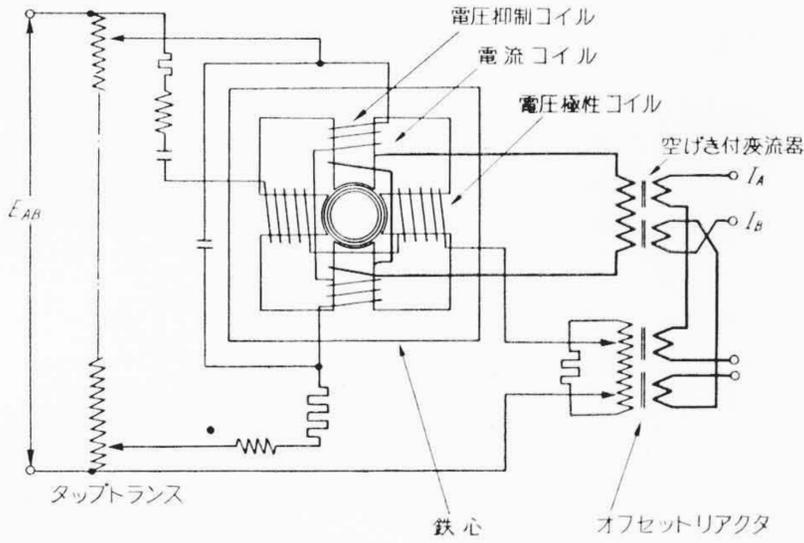


第 2 図 UHY 形 1G₂ 式モー継電器内部接続図



第 3 図 継電器要素構造図

* 日立製作所那珂工場



第 4 図 オフセットモーター要素原理説明図

第 4 図にオフセットモーター要素の動作説明図を示す。図において、

$$\left. \begin{aligned} \text{継電器入力電圧} & E_{AB} = e = E \varepsilon^{j\omega t} \\ \text{継電器入力電流} & I_A - I_B = i = I \varepsilon^{j(\omega t - \theta)} \\ \text{オフセットリアクタ二次電圧} & e_0 = k_0 I \varepsilon^{j(\omega t - \theta - \varphi)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

とすると、各コイル電流、磁束、カップ電流などは次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{極性コイル電流 } i_e & i_e = k_{ie} [E \varepsilon^{j\omega t} + k_0 I \varepsilon^{j(\omega t - \theta - \varphi)}] \varepsilon^{-\alpha} \\ i_e \text{ による磁束 } \phi_e & \phi_e = k_{\phi e} [E \varepsilon^{j\omega t} + k_0 I \varepsilon^{j(\omega t - \theta - \varphi)}] \varepsilon^{-\alpha} \\ \phi_e \text{ によるカップ電流 } i_{ce} & i_{ce} = k_{ce} [E \varepsilon^{j\omega t} + k_0 I \varepsilon^{j(\omega t - \theta - \varphi)}] \varepsilon^{-(\alpha + \frac{\pi}{2})} \\ \text{抑制コイル電流 } i_r & i_r = k_{ir} [\gamma E \varepsilon^{j\omega t}] \varepsilon^{-\beta} \\ i_r \text{ による磁束 } \phi_r & \phi_r = k_{\phi r} [\gamma E \varepsilon^{j\omega t}] \varepsilon^{-\beta} \\ \phi_r \text{ によるカップ電流 } i_{cr} & i_{cr} = k_{cr} [\gamma E \varepsilon^{j\omega t}] \varepsilon^{-(\beta + \frac{\pi}{2})} \\ \text{電流コイルによる磁束 } \phi_i & \phi_i = k_{\phi i} [I \varepsilon^{j(\omega t - \theta)}] \\ \phi_i \text{ によるカップ電流 } i_{ci} & i_{ci} = k_{ci} [I \varepsilon^{j(\omega t - \theta)}] \varepsilon^{-\frac{\pi}{2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで θ : e に対する i の遅れ角
 φ : オフセットリアクタ二次電圧の一次電流に対する遅れ角
 α : e に対する電圧極性コイル電流の遅れ角
 β : e に対する電圧抑制コイル電流の遅れ角
 γ : 入力電圧に対する抑制電圧の比

$k_0, k_{ie}, \dots, k_{ci}$: 継電器 常 数

とし、また鉄心の鉄損を無視し、カップインピーダンスは抵抗分のみとした。

したがって継電器の回転力は抑制力を正にとると

$$\tau = k \{ \phi_e (i_{cr} - i_{ci}) + (\phi_r - \phi_i) i_{ce} \} + \tau_0 \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。ここで τ_0 は可動部の摩擦回転力を含む制御回転力を示す。

これに(2)式を代入して整理すると

$$\begin{aligned} \tau = & k [k_1 \gamma E^2 \sin(\beta - \alpha) \\ & - EI [k_2 \sin(\theta - \alpha) - k_1 k_0 \sin\{(\theta + \varphi) + (\beta - \alpha)\}] \\ & - k_2 k_0 I^2 \sin(\varphi + \alpha)] + \tau_0 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし

$$k_1 = k_{\phi e} k_{cr} + k_{\phi r} k_{ce}$$

$$k_2 = k_{\phi e} k_{ci} + k_{\phi i} k_{ce}$$

となる。

(1) モーター特性

モーター特性は第 4 図の回路においてオフセット回路を除くことにより得られる。したがって回転力は(4)式において $k_0 = 0$ とし

$$\tau = k [k_1 \gamma E^2 \sin(\beta - \alpha) - k_2 EI \sin(\theta - \alpha)] + \tau_0 \dots\dots\dots (5)$$

となる。継電器の動作限界においては

$$\tau = 0 \dots\dots\dots (6)$$

となるのでこれによって(5)式を解けば継電器の動作特性が得られる。ここで

$$\tau_0 = 0 \quad \frac{E}{I} = Z$$

とおき、回路のインピーダンス角を

$$\beta - \alpha = \frac{\pi}{2}$$

と選定すると(5)式は

$$\gamma K = \frac{1}{Z} \sin(\theta - \alpha)$$

または

$$Z = \frac{1}{\gamma K} \sin(\theta - \alpha) \dots\dots\dots (7)$$

となり、これは原点を通り $\theta - \alpha = \pi/2$ にて $1/\gamma K$ を直径とする円になる。

ここで

$$K = \frac{k_1}{k_2}$$

したがってたとえば $\theta = 75^\circ$ において直径となるようなモーター特性を要する場合には極性コイル電流は進み 15 度、抑制コイル電流は遅れ 75 度にすればよい。また特性円の直径すなわち整定インピーダンスは γ すなわちタップトランスによって抑制電圧を変えてやることにより任意に選定できる。

(2) オフセットモーター特性

(4)式において $\beta - \alpha = \pi/2$, $\varphi = -\beta$ としてモーター特性と同様に整理すると動作インピーダンス特性は

$$Z^2 - \frac{Z}{\gamma} (K' - k_0) \sin(\theta - \alpha) - \frac{1}{\gamma} K' k_0 = 0 \dots\dots\dots (8)$$

ただし

$$K' = \frac{k_2}{k_1}$$

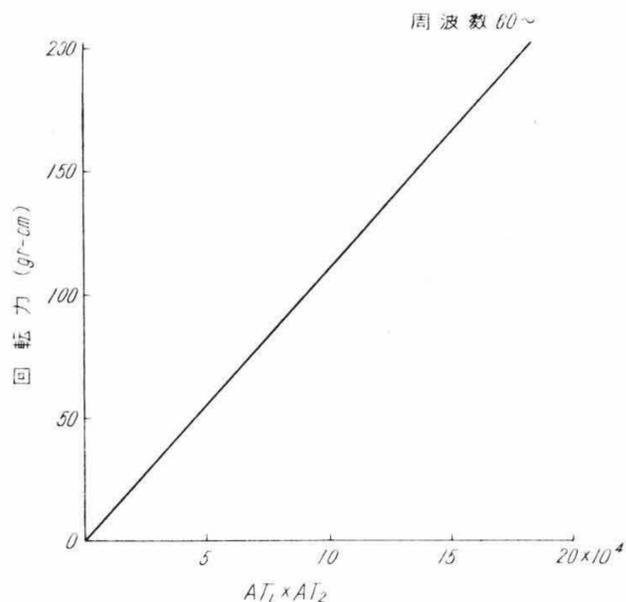
となり、これは $\frac{1}{2\gamma} (K' + k_0)$ を半径とし $\frac{1}{2\gamma} (K' - k_0)$ を原点から中心までの距離とする特性円となる。またこれは k_0 すなわちオフセット量を変えても前方距離整定は変わらず、逆に γ すなわち前方整定を変えても後方整定は変わらず両整定は完全に独立になる。

3. 静 特 性

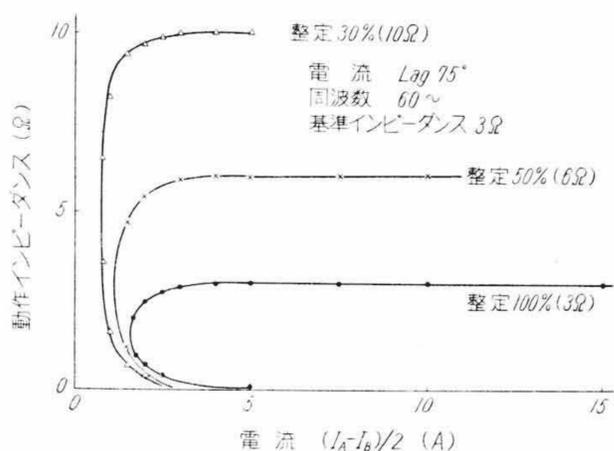
3.1 継電器要素の回転力

距離継電器の動作要素は考えられる範囲の入力における特性の直線性が継電器の動作特性をきめる。誘導円筒形継電器においては磁気回路に比較的大きな空げきを有するため磁気回路の励磁 AT と磁束密度の関係はよく比例する。

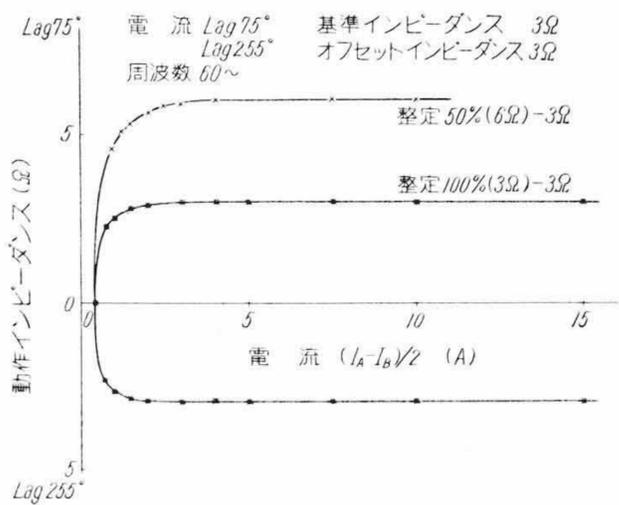
第 5 図は 2 対極の磁束の位相角を 90 度にした場合の両磁極対の AT の積と回転力の関係で、きわめて広範囲に直線性が保たれている。ここでは省略するが励磁 AT と磁束、あるいはコイルインピー



第 5 図 継電器要素のアンペアターンと回轉力の関係



第 6 図 第 1 段要素動作インピーダンス特性



第 7 図 第 3 段要素動作インピーダンス特性

ダンスも同様である。

3.2 継電器の動作特性

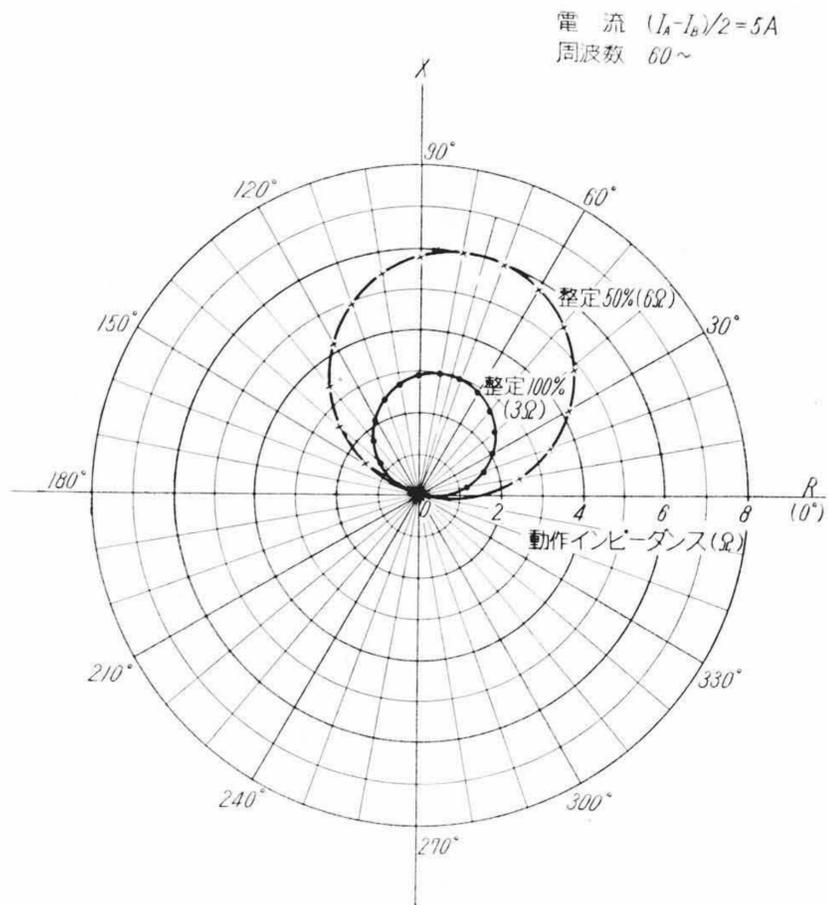
3.2.1 動作および復帰インピーダンス特性

第 6 図に第 1 段、第 7 図に第 3 段要素の動作インピーダンス特性を示す。第 2 段要素は 1 段とほぼ同じである。図に示されるように最小動作電流は 1~1.5 A、電流 2.5 A 程度以上においては距離測定はほぼ正確になる。また電流 5 A においては電圧が 0.5 V 残っていればメモリ効果にたよらなくても動作できる。

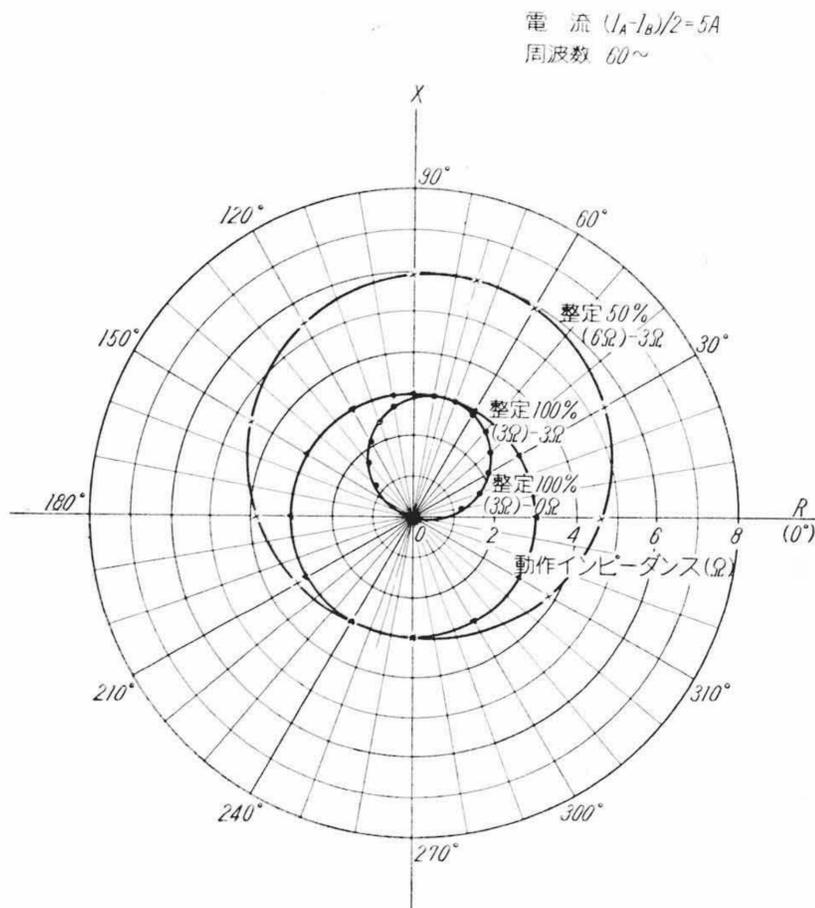
復帰値は動作値の +2% 程度以下でまったく差異はないものと考えてよい。

3.2.2 位相角特性

第 8 図は第 1 段、第 9 図は第 3 段要素の位相角特性で、最大感度位相角は 75 度になっている。



第 8 図 第 1 段要素力率特性



第 9 図 第 3 段要素力率特性

4. 過 渡 特 性

4.1 過渡特性の一般的問題点

モー継電器は不整回轉力に対して応動しやすく過渡特性の検討が最も重要であることは既述のとおりであるが、過渡特性における問題点をあげると次のようになる。

- (1) 動作時間 0.1 秒遮断を必要とする超高圧送電線の保護にも適用できる程度の高速度動作を要する。
- (2) メモリ効果 モー継電器は至近端故障では常にメモリ効果によって動作するので十分信頼できるものでなくてはならない。

- (3) オーバリーチ 第1段要素は区間の80~90%程度に整定するので多少動作時間をぎ性にしてもオーバリーチは許されない。逆に第2段要素はキャリヤ方式においてはキャリヤ制御を行なう関係上若干のオーバリーチがあっても高速動作が望まれる。
 - (4) 外部故障における誤動作 これは方向距離継電器としては絶対に許されない。
 - (5) 電源遮断時の動作 電源が遮断(停電)された場合遮断器の不必要遮断を避ける意味で動作しないことが望ましい。
- このうち(1)(2)は

- (1) 駆動トルクの大小—一定の故障電流に対して最小整定インピーダンス値が大きいほど大きい。
- (2) 極性電圧回路の時定数。
- (3) 可動部の慣性モーメント。

などに関係するとともに(3)~(5)とともに

- (4) 故障電流に含まれる直流分の処置。
- (5) 極性, 抑制電圧コイル磁束の急変に伴う不整回転力の処置。
- (6) 回転力の急変に伴う可動部のはね返り。

などに関係する。これらを要約すると動作時間とオーバリーチ, 誤動作などは表裏の関係にあるといえよう。

UHY形継電器においては直流分に対しては空けき付変流器を設け直流分を継電器コイルに入れない。不整回転力に対しては極性, 抑制両回路の時定数の検討, 機械的反跳に対しては可動部およびストップパの弾性をなくするなどの対策がとられている。

4.2 不整回転力の検討

モー継電器の動作において最も問題になるオーバリーチ, 誤動作などでは過渡時における不整回転力の処置が基本的問題であるので以下これについて若干説明する。

4.2.1 磁束の急変による回転力

故障時における極性および抑制コイル電流の急変に伴う抑制力の変化を見るに

$$\left. \begin{aligned} \text{極性コイル磁束} \\ \phi_e = \Phi_e \sin(\omega t - \theta) \varepsilon^{-\lambda t} \\ \text{抑制コイル磁束} \\ \phi_r = \Phi_r \sin(\omega t - \theta - \varphi) \varepsilon^{-\mu t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

とし, 駆動回転力(抑制力を正)

$$\tau = k \left(\phi_e \frac{d\phi_r}{dt} - \phi_r \frac{d\phi_e}{dt} \right) \dots\dots\dots (10)$$

なる関係式に代入すると

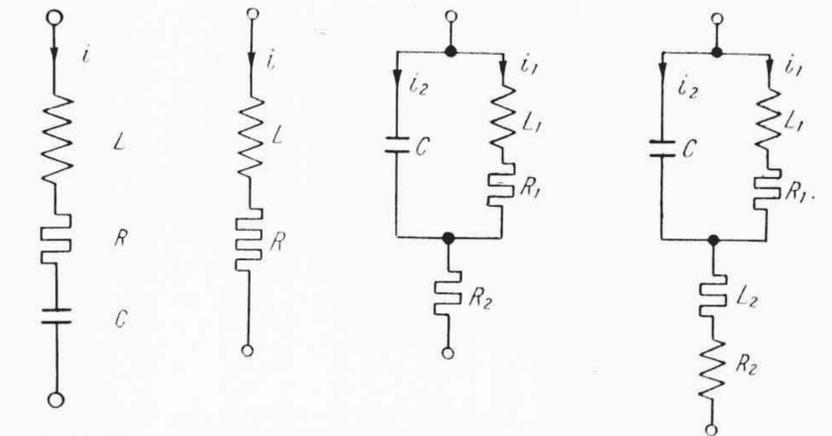
$$\tau = k\Phi_e\Phi_r \left[\omega \sin \varphi + \frac{1}{2}(\lambda - \mu) \times \{ \cos \varphi - \cos(2\omega t - \theta - \varphi) \} \right] \varepsilon^{-(\lambda + \mu)t} \dots\dots\dots (11)$$

となる。この第2項は両磁束の減衰常数が相異なることによる不整回転力で, この発生は最小に止めなければオーバリーチ, 誤動作の原因となる。

$\mu = \lambda$ において不整回転力はゼロになるが, これは抑制回路に極性回路と同じメモリ効果をもたせることでありそれだけ動作時間を遅らせることになる。したがって抑制回路の時定数はこれら相反する条件を勘案してきめられなければならない。

4.2.2 電圧回路常数の検討

誘導円筒形継電器においては2磁束の位相差が90度のとき最大回転力が得られ, モー継電器では位相角特性を遅れ75度とし, かつメモリ効果を持たせるため電圧極性回路に直列共振回路を用いる。したがって抑制回路にメモリ効果を持たせないならばコイルのみ, または直列リアクタを接続し, 持たせる場合には抑制



第10図 電圧極性回路
回路A 回路B 回路C
第11図 電圧抑制回路

回路は並列共振またはその変形回路でなければならない。

したがって電圧極性回路としては第10図の回路が, 抑制回路としては第11図A, Bの回路と本継電器で採用したC回路が考えられる。

以下これらの回路について入力端子で短絡された場合を考える。

(1) 電圧極性回路

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = Lp + R + \frac{1}{Cp} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} \right)^2 < \frac{1}{LC}$ の場合

$$p_1, p_2 = -\alpha \pm j\beta = -\frac{R}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} \right)^2} \dots\dots\dots (13)$$

(2) 抑制回路A

$$L \frac{di}{dt} + Ri = Lp + R = 0 \dots\dots\dots (14)$$

$$p = \alpha = -\frac{R}{L} \dots\dots\dots (15)$$

(3) 抑制回路B

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + R_2 (i_1 + i_2) = 0 \\ L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = \frac{1}{C} \int i_2 dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

$$\therefore p^2 + \left(\frac{1}{R_2 C} + \frac{R_1}{L_1} \right) p + \frac{1}{L_1 C R_2} (R_1 + R_2) = 0 \dots\dots\dots (17)$$

$\frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_2 C} - \frac{R_1}{L_1} \right)^2 < \frac{1}{L_1 C}$ の場合

$$p = -\alpha \pm j\beta = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_2 C} + \frac{R_1}{L_1} \right) \pm j\sqrt{\frac{1}{L_1 C} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_2 C} - \frac{R_1}{L_1} \right)^2} \dots\dots\dots (18)$$

もし $\frac{1}{R_2 C} = \frac{R_1}{L_1}$ ならば

$$p_1 \cdot p_2 = -\alpha \pm j\beta = -\frac{R_1}{L_1} \pm j\sqrt{\frac{1}{L_1 C}} = -\frac{1}{R_2 C} \pm j\sqrt{\frac{1}{L_1 C}} \dots\dots\dots (19)$$

(4) 抑制回路C

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + L_2 \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) + R_2 i_2 = 0 \\ L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = \frac{1}{C} \int i_2 dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

$$\therefore p^3 + \left(\frac{R_1}{L_1} + \frac{R_2}{L_2} \right) p^2 + \left(\frac{1}{L_1 C} + \frac{1}{L_2 C} + \frac{R_1 R_2}{L_1 L_2} \right) p + \frac{R_1 + R_2}{L_1 L_2 C} = 0 \dots\dots\dots (21)$$

ここで

$$\frac{R_1}{L_1} = \frac{R_2}{L_2} = \frac{R_1+R_2}{L_1+L_2} = \frac{R}{L}$$

とすれば(21)式は

$$\left(p + \frac{R}{L}\right)\left(p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{L_1C} + \frac{1}{L_2C}\right) = 0 \dots\dots\dots(22)$$

$\frac{1}{4}\left(\frac{R}{L}\right)^2 < \frac{1}{L_1C} + \frac{1}{L_2C}$ の場合

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -\frac{R}{L} \\ p_2, p_3 &= -\alpha \pm j\beta = -\frac{R}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{(L_1+L_2)C} - \frac{1}{4}\left(\frac{R}{L}\right)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(23)$$

以上の結果を見るに

抑制回路Aではもちろんのことながら非振動的で不整回転力を生じやすい。

抑制回路Bは振動回路であるが極性回路と同等程度の時定数を得るには R_2 を相当大きくしなければならない。

抑制回路Cは最も容易に極性回路と同程度のメモリ効果を得やすい。

ことがわかる。

この結果に基づいて UHY 形継電器の抑制回路ではC回路を採用している。

4.3 継電器の特性

4.3.1 オーバリーチと背後故障時の誤動作

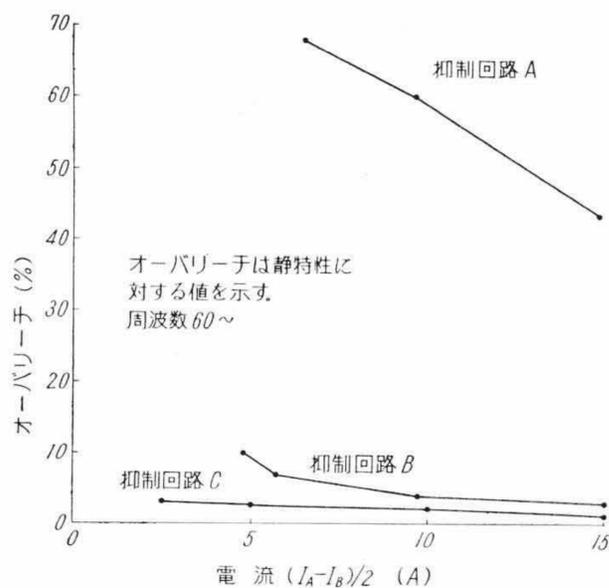
故障時の電圧急変に伴う不整回転力は内部故障に対してはオーバリーチ、外部故障に対しては故障条件によっては誤動作という形で現われる。

第12図は抑制回路を第11図のA, B, C回路にした場合の故障電流とオーバリーチの関係を示し、回路A, B, Cの順にオーバリーチが減少している。ここでオーバリーチはその電流値における静的動作値に対する値を示しており、これらの回路常数はそれぞれの回路においてオーバリーチは一応最小と考えられる状態に選定されている。

また第13図は背後故障における誤動作の有無を測定したもので回路Aによるものでは実系統において十分考えなければならない故障条件でも誤動作することを示し、回路Bではやや実用に耐える程度に近くなっている。回路Cにおいてはこの懸念はまったくない。

以上の結果本継電器で採用している抑制回路方式が他の方式に比べ、きわめてすぐれていることが示される。

第14図は本継電器において抑制回路の直列リアクタ L_2 を変え

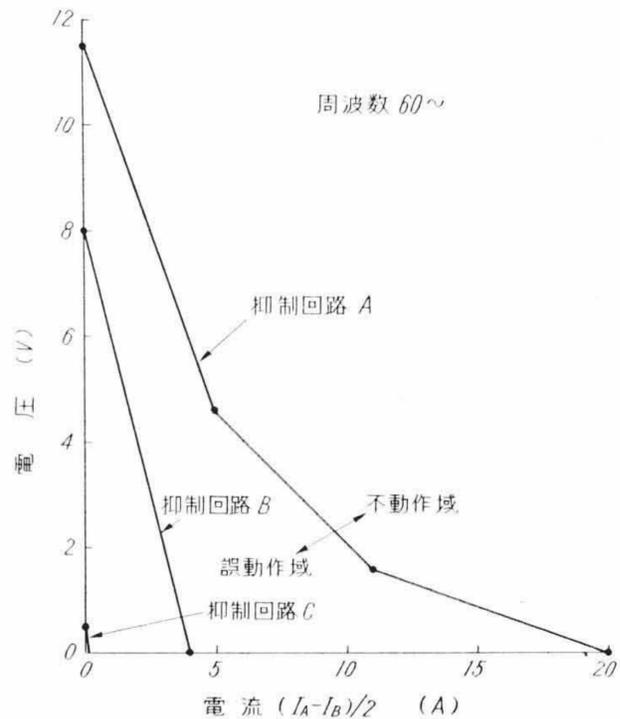


第12図 抑制回路とオーバリーチの関係

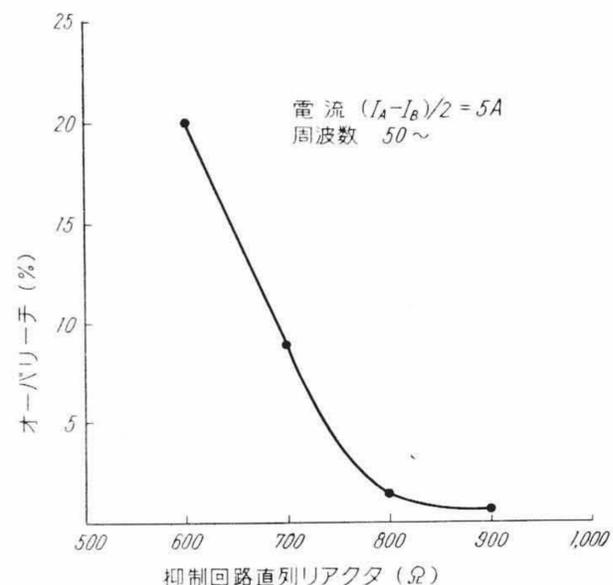
た場合のオーバリーチの変化を示し、(23)式に示す時定数、共振周波数の選定によりオーバリーチが支配されていることを示している。またそれとともに本継電器はリアクタの調整により、オーバリーチ、動作時間が自由に調整できることを示している。

4.3.2 動作時間

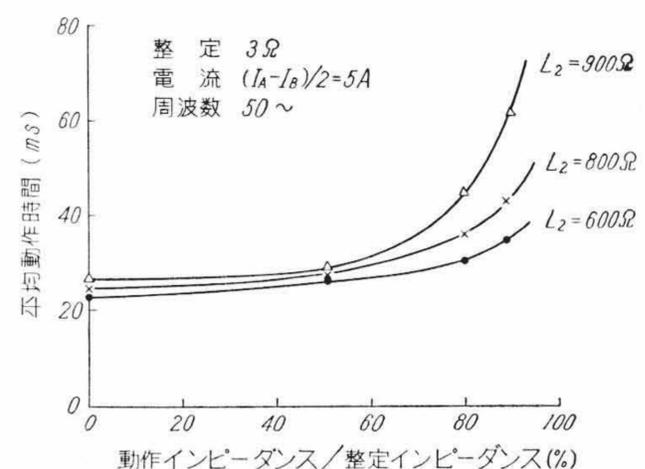
動作時間とオーバリーチは表裏の関係にあることは既述のとおりであるが、第15図は本継電器の第1段要素において直列リアクタを種々変えて動作時間とオーバリーチを測定したもので、この関係を示している。



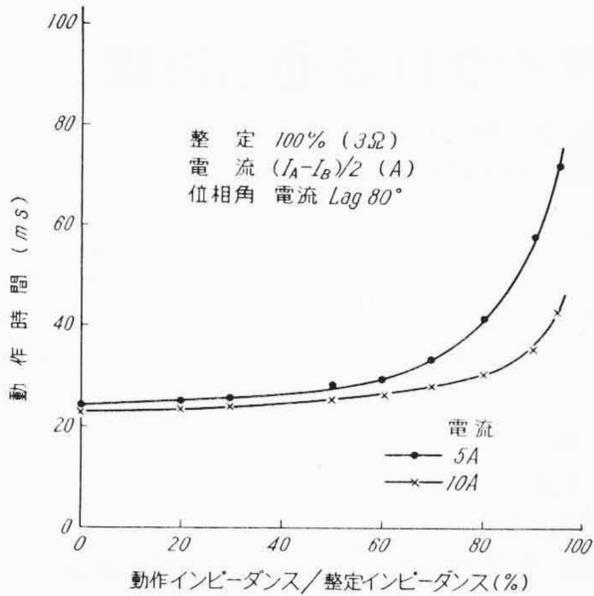
第13図 抑制回路と背後故障時の誤動作関係



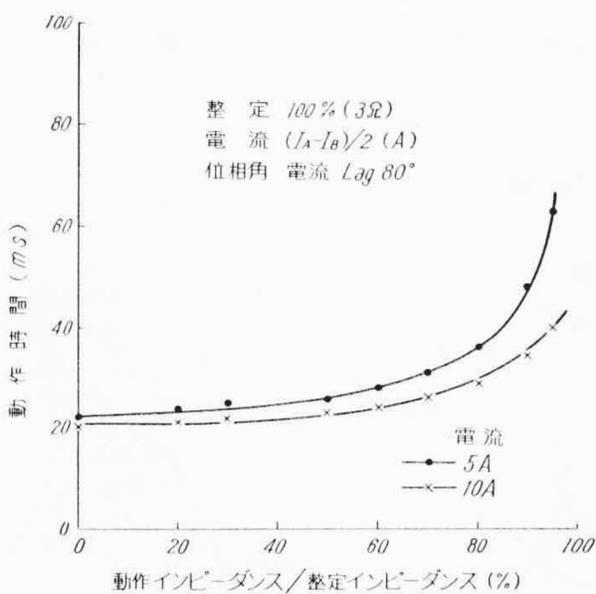
第14図 抑制回路直列リアクタとオーバリーチとの関係



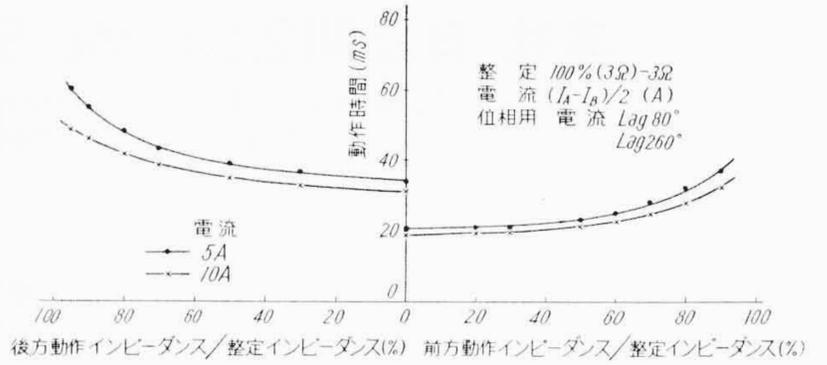
第15図 抑制回路の直列リアクタと動作時間との関係



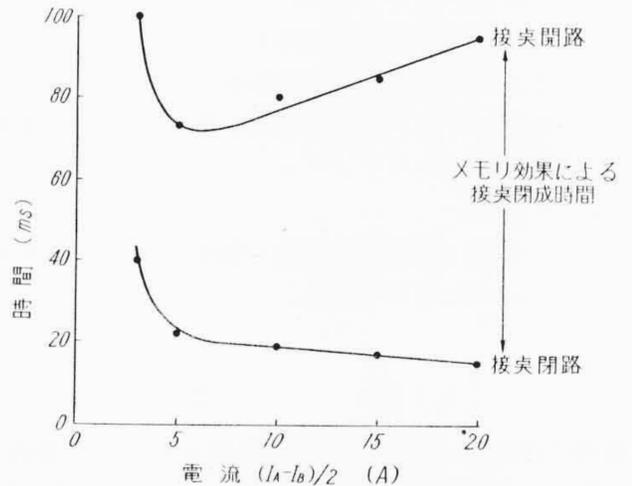
第 16 図 第 1 段要素動作時間特性



第 17 図 第 2 段要素動作時間特性



第 18 図 第 3 段要素動作時間特性



第 19 図 メモリ効果による接点閉成時間

第 16, 17, 18 図は各要素の平均動作時間を示し、距離継電器として必要な動作時間が得られているものと思う。復帰時間は動作時の条件により若干の変化はあるが故障状態から定格電圧に復帰する場合の復帰時間は 5~15 ms である。

4.3.3 メモリ効果

モー継電器は至近端故障に対しては常にメモリ効果で動作することになるが、静特性より見られるように 5 A 以上の故障電流では 0.5 V 以上の電圧が残ればメモリ効果に関係なく動作する。

第 19 図は電圧を完全に 0 V にした場合の動作時間、接点閉成時間を測定したもので十分な閉成時間が得られている。

4.3.4 電源遮断時

至近端故障と電源遮断、停電にはいずれも無電圧になるが、電圧回路から見ると前者では回路に蓄えられたエネルギーは故障点を通して放電されるが、後者ではエネルギーはタップトランスの励磁インピーダンスまたは他の電圧回路を通して放電されるので本質的に大きな差異を有している。したがって前者で誤動作しないように調整されている継電器でも後者では不整回転力により瞬間的に接点を閉路する。これで誤動作しないようにするためにはできるかぎり故障時に近い回路条件にすることが必要である。この点より本継電器ではタップトランスと並列にリアクタを接続し

て放電回路を設け継電器単体では電源を開いた場合でも動作しないようにしてある。

しかし PT の二次回路に他の多数の継電器と一緒に接続される場合には電圧回路の相互の干渉を考えなければならないので、動作をまったく許さない場合には別になんらかの対策が必要になる。

5. 結 言

長距離送電線用短絡距離継電器として誘導円筒形の UHY 形モー継電器を開発し関西電力株式会社の 154 kV 幹線に納入し、すでに多くの動作実績を得ており、本報告においては本継電器についての過渡特性を主として説明した。

モー継電器においては原理上方向選択と距離測定を同一要素で行なうので制御回転力はほとんどなくごくわずかな不整回転力にも応動してオーバリーチ、誤動作の原因になりやすい。本継電器においては特に電圧抑制回路を検討した結果、過渡特性のすぐれた継電器を完成することができ、オーバリーチを目的に応じ任意に調整することさえ可能になっている。

本継電器は引続いて関西電力株式会社に納入される予定であり、この技術を基にして開発された UHX 形変形リアクタンス継電器が四国電力株式会社の松山—西条間の 187 kV 超高压送電線用キャリアリレー装置の主継電器として納入された。

最後に本継電器は関西電力株式会社関係各位の深いご理解とご指導に負うところが大きいことを付言し厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 加藤：電力, Vol. 46, No. 1, 192 (昭 37-1)
- (2) 三田ほか：日立評論, 44, 695 (昭 37-5)