

日立 KE 型 界磁喪失 継電器

Hitachi Type KE Field Failure Protection Relay

広吉 秀高*
Hidetaka Hiroyoshi

小野 邦男**
Kunio Ono

渡井 三夫***
Mitsuo Watai

内 容 梗 概

系統に連繫されている大容量の同期機に界磁喪失が発生すると、その機械を過熱するだけでなく、系統に大きな擾乱を与えて、安定な運営をそこなう結果になる。したがって界磁の確保には万全を期するとともに万一の事故に対しては合理的な保護装置によりその被害を最小にとどめなくてはならない。日立 KE 型界磁喪失継電器は界磁喪失現象の理論的解析と実験結果にてらして開発したものである。

本文においては界磁喪失現象およびこれに関連する同期外れについて理論的解析を行い、さらに KE 型継電器およびその適用について述べる。

〔I〕 緒 言

同期機の入力と出力を結び、同期を保ちつつ電力の伝送を行わせるものは界磁であり、その確保の重要性は論を待たない。

系統に連繫されている大容量機に界磁喪失故障が発生するとその同期機の固定子巻線、回転子を過熱するのみならず、さらに同期外れを起し系統電圧を極端に低下せしめて系統の安定な運営をそこなう結果になる。このため界磁の確保には特に留意することはもちろん、万一の界磁喪失に対しては合理的な保護装置を備えて安定な運営を期さなければならない。

日立製作所においてはこの目的にもつともかない、また誤動作を十分防止したオフセットインピーダンス特性を備えている KE 型界磁喪失継電器を開発し、電源開発佐久間発電所の 93,000kVA 発電機をはじめ多くの大容量発電機の保護に適用した。

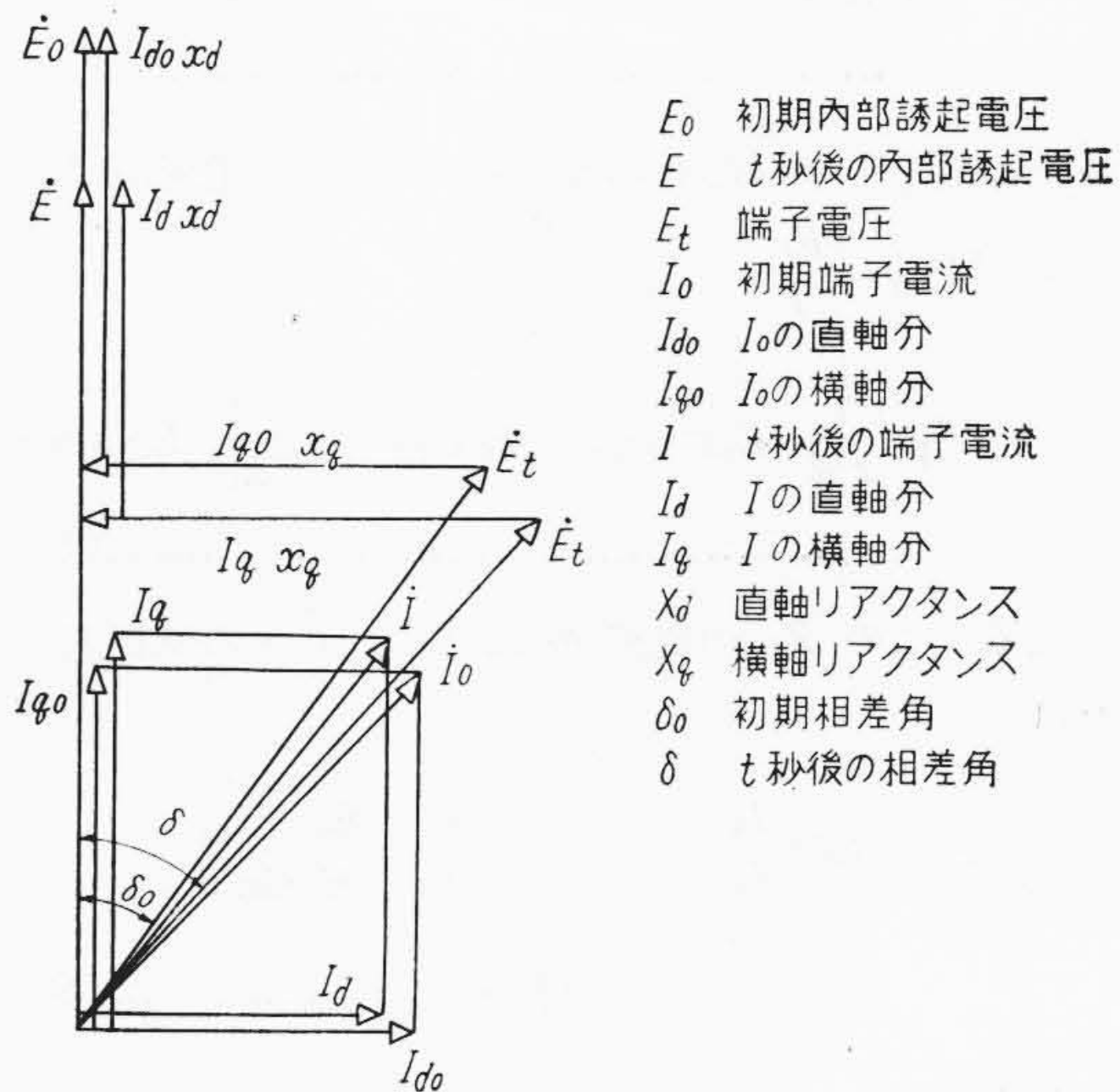
本保護継電方式は界磁の量そのものでなく、たとえ低界磁になつても、系統との並列運転を許しうる限度一杯は同期機としての使命を果させ、同期が失われる状態に至つたときにすみやかに系統より分離し、系統に与える悪影響をできる限り少くし、また機械自体の損傷を防止することを目的としている。

以下、本継電方式確立の基礎になつている界磁喪失および同期外れ現象について解析を行い、さらに KE 型継電器の構造、特性およびその適用などについて述べる。

〔II〕 界磁喪失および同期外れ現象

(1) 界磁喪失現象と同期機の出力端子よりみたインピーダンス軌跡

無限大母線に繋がれた同期機の界磁回路が突然短絡されたとする。この場合磁束は界磁の開路時定数 T'_{a0} にしたがって初期の値から次第に減少する。磁束が減少す



第1図 二反作用法による同期機のベクトル図

ると内部誘起電圧 $\dot{E}$ も減少するので内部相差角 δ が増大する。よつて電流変化をきたし、出力端子よりみたインピーダンスは変化する。以下これらの関係を定量的に検討する。

二反作用法による同期機のベクトル図を第1図に示す。これより定格運転時の出力 p_0 は

$$p_0 = \frac{E_0 E_t}{x_a} \sin \delta_0 + E_t^2 \frac{x_a - x_q}{2x_a x_q} \sin 2\delta_0 \dots (1)$$

界磁喪失してから t 秒後には内部誘起電圧 E は

$$E = E_0 e^{-\frac{t}{T'_{a0}}} \dots (2)$$

となるから、 t 秒後の出力 p は

$$p = \frac{E_0 E_t e^{-\frac{t}{T'_{a0}}}}{x_a} \sin \delta + E_t^2 \frac{x_a - x_q}{2x_a x_q} \sin 2\delta \dots (3)$$

これより回転部の運動方程式は次のようになる。

$$\omega I \frac{d^2 \delta}{dt^2} = p_0 - p \dots (4)$$

ただし I : 回転部の慣性能率

ω : 回転部の角速度

* 日立製作所日立工場国分分工場

** 日立製作所日立工場日立研究所

*** 日立製作所多賀工場

この関係から δ の時間的变化が定まる。

また電流の直軸分 I_d は

$$I_d = \frac{E_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T'_{d0}}} - E_t \cos \delta}{x_d} \dots\dots\dots (5)$$

電流の横軸分 I_q は

$$I_q = \frac{E_t \sin \delta}{x_q} \dots\dots\dots (6)$$

よつて電流値 I は

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{x_d^2} (E_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T'_{d0}}} - E_t \cos \delta)^2 + \frac{1}{x_q^2} E_t^2 \sin^2 \delta} \end{aligned} \dots\dots\dots (7)$$

ゆえに端子よりみたインピーダンス $\dot{Z}_t$ の絶対値は

$$\begin{aligned} |\dot{Z}_t| &= \frac{E_t}{I} \\ &= \frac{E_t}{\sqrt{\frac{1}{x_d^2} (E_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T'_{d0}}} - E_t \cos \delta)^2 + \frac{1}{x_q^2} E_t^2 \sin^2 \delta}} \end{aligned} \dots\dots\dots (8)$$

となる。この $\dot{Z}_t$ の位相 θ_t は $\dot{E}_t$ と $\dot{I}$ との位相差であり、

$$\begin{aligned} \theta_t &= \tan^{-1} \frac{I_d}{I_q} - \delta = \tan^{-1} \frac{x_q}{x_d} \left(\frac{E_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T'_{d0}}}}{E_t \sin \delta} \right. \\ &\quad \left. - \cot \delta \right) - \delta \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

となる。

(4) 式の条件の下に (8) 式と (9) 式の解を求めれば界磁喪失時のインピーダンス軌跡が求められるが、この解を次の二つの極端な場合を想定して求めてみる。

(i) T'_{d0} がきわめて大きく δ の変化がきわめて徐々に (4) 式の $I \omega d^2 \delta / dt^2 = 0$ となる場合。すなわち (4) 式として

$$\begin{aligned} &\frac{E_0 E_t}{x_d} \sin \delta_0 + E_t^2 \frac{x_d - x_q}{2 x_d x_q} \sin 2 \delta_0 \\ &= \frac{E_0 E_t \varepsilon^{-\frac{t}{T'_{d0}}}}{x_d} \sin \delta + E_t^2 \frac{x_d - x_q}{2 x_d x_q} \sin 2 \delta \end{aligned} \dots\dots\dots (10)$$

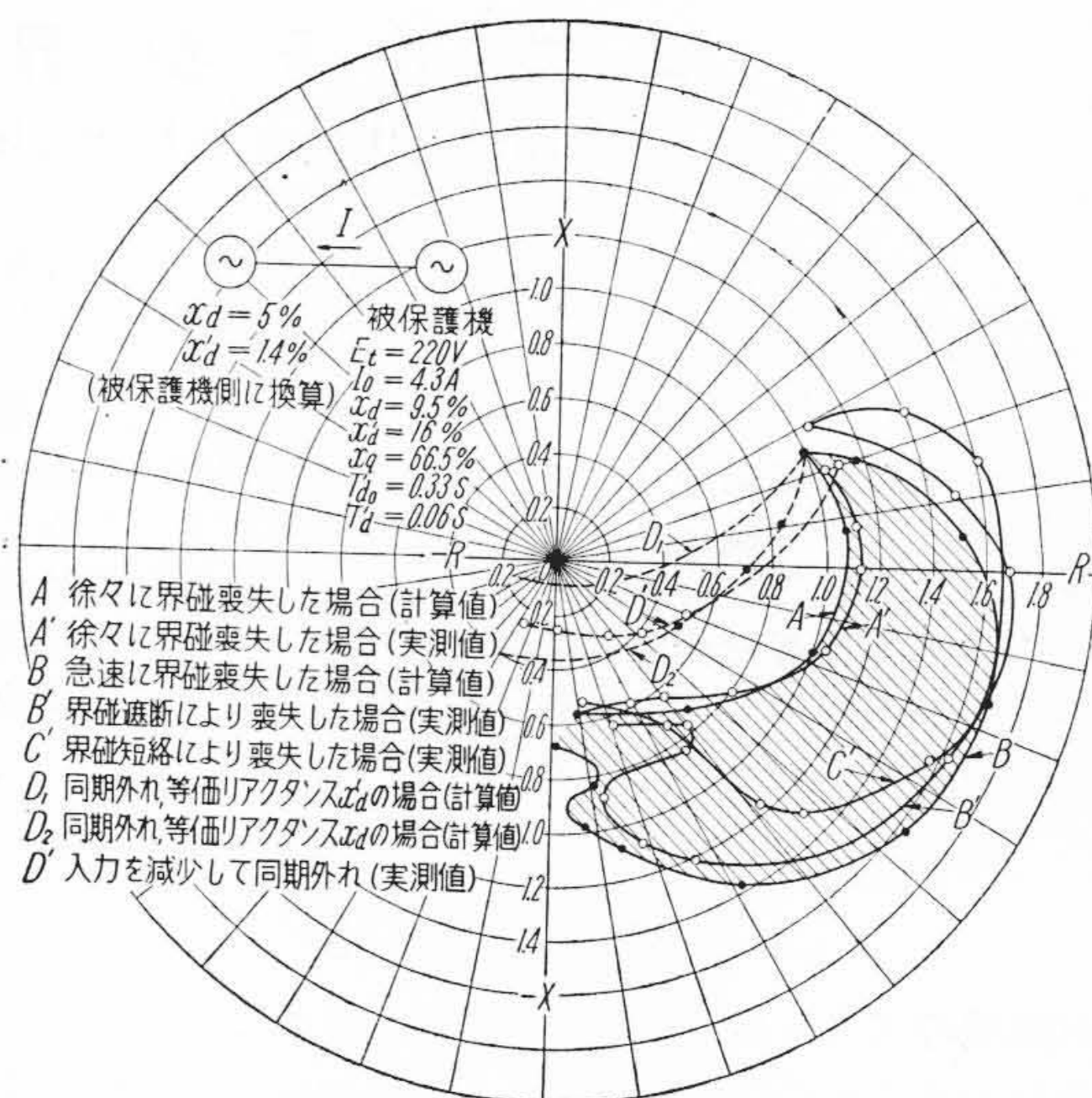
なる条件の下に (8), (9) 式を解くことになる。

(ii) T'_{d0} がきわめて小で E が減少している期間がきわめて短くその間相差角に変化がない場合。すなわち

$$\delta = \delta_0 \dots\dots\dots (11)$$

として (8), (9) 式を解くことになる。

いま力率 90% で定格運転している $x_d = 95\%$, $x_q = 66.5\%$ なる同期機が界磁喪失した場合上記 (i), (ii) の条件で計算するとインピーダンス軌跡は第 2 図 A お



第 2 図 界磁喪失時および同期外れ時のインピーダンス軌跡

よび B 曲線のごとくなる。

よつて、一般の界磁喪失では条件は上記 (i), (ii) の場合の中間にくるので図の斜線を施した範囲が界磁喪失時に軌跡の描く範囲と推定される。

同図の A', B', C' の各曲線は

$E_t = 220 \text{ V}$ 定格

$I_0 = 4.3 \text{ A}$ 定格

$x_d = 95\%$

$x_q = 66.5\%$

$T'_{d0} = 0.33 \text{ 秒}$

なる小型同期機について、力率約 90% の運転状態より、A' は徐々に界磁を減少した場合、B' は界磁を遮断した場合、C' は界磁を短絡した場合の端子よりみたインピーダンス変化の実測結果でいずれの場合にもほぼ推定領域内に入ることがわかる。

(2) 同期外れ現象と同期機の出力端子よりみたインピーダンス軌跡

同期外れ時の同期機の等価内部リアクタンスは、同期機の有する時定数主として T'_d , 滑り速度, 力率などによつて左右されるものである。このうち力率に関しては、本継電器に関する限り $-X$ 軸を横切る点のインピーダンス値が問題になり、この場合には直軸分電流が流れるので直軸リアクタンスが問題になる。よつて直軸リアクタンスとして x_d をとるか x'_d をとるかで $-X$ 軸を横切る点のインピーダンス値 Z_s は

$$x_d \text{ をとる場合 } Z_s = \frac{E_t}{E_0 + E_t} x_d \dots\dots\dots (12)$$

$$x'_a \text{ をとる場合 } Zs = \frac{Et}{E' + Et} x'_a \dots\dots\dots (13)$$

ただし E' は過渡インピーダンス背後の電圧となるが、これに関しては次のことがいえる。すなわち大型機の場合には x'_a に近い値となり、ごく小型機の場合には x_a に近づく傾向がある。

第2図 D_1 曲線は $x'_a = 16\%$ を等価リアクタンスとした場合の推定軌跡であり、 D_2 曲線は $x_a = 95\%$ を等価リアクタンスとした場合の推定軌跡であり D' は前記の供試同期機を同期外れさせた場合の軌跡の実測結果である。ただし供試同期機は

$$x'_a = 16\% \\ T'_a = 0.06\text{sec}$$

である。この実測結果は1.5kVAの小型機について行つたのでむしろ x_a を等価リアクタンスとした場合に近いが、大型機でははるかに x'_a に接近する。一例として

$$x_a = 115\% \\ x_q = 75\% \\ x'_a = 37\% \\ T'_a = 1.8\text{sec}$$

なる大型機について計算を行つた結果では、同期外れ時の滑り速度が0.5c/s以上ならば等価リアクタンスはほぼ x'_a となる。

以上の解析および第2図に示す結果から、界磁喪失時にはインピーダンス軌跡は $-X$ 軸上に達し、そのときのリアクタンス値は一般に x_a より小であるが $x'_a/2$ よりかはるかに大きい。上記の計算例は常時定格運転の場合であるが、軽負荷運転の場合にもこのことはいえる。また同期外れ時には上述のごとく無限大母線につながれた大型機では、そのインピーダンス軌跡は $-X$ 軸上ほぼ $x'_a/2$ の点を通るが、系統側のインピーダンスを考慮すればこれより小、または正のリアクタンス分をもつ。

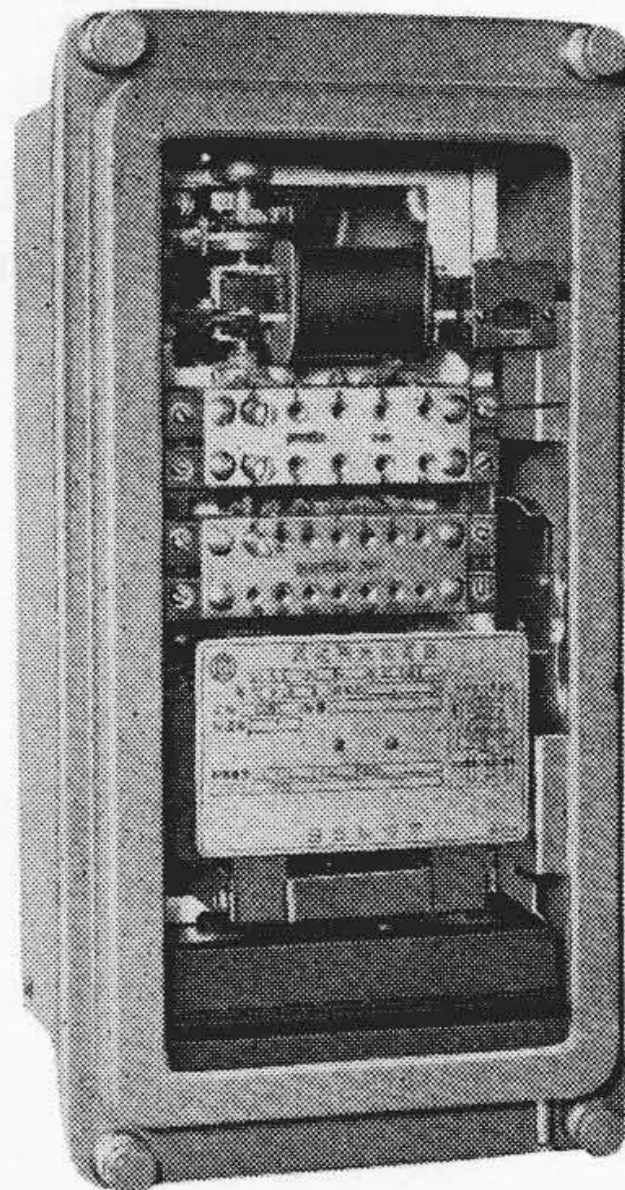
よつて同期機出力端子におけるインピーダンスによつて界磁喪失を検出するには、継電器の特性としては、 $-X$ 軸上 $x'_a/2$ と x_a の点を通るときオフセットインピーダンス特性が適しているものと考えられる。

[III] KE型界磁喪失継電器

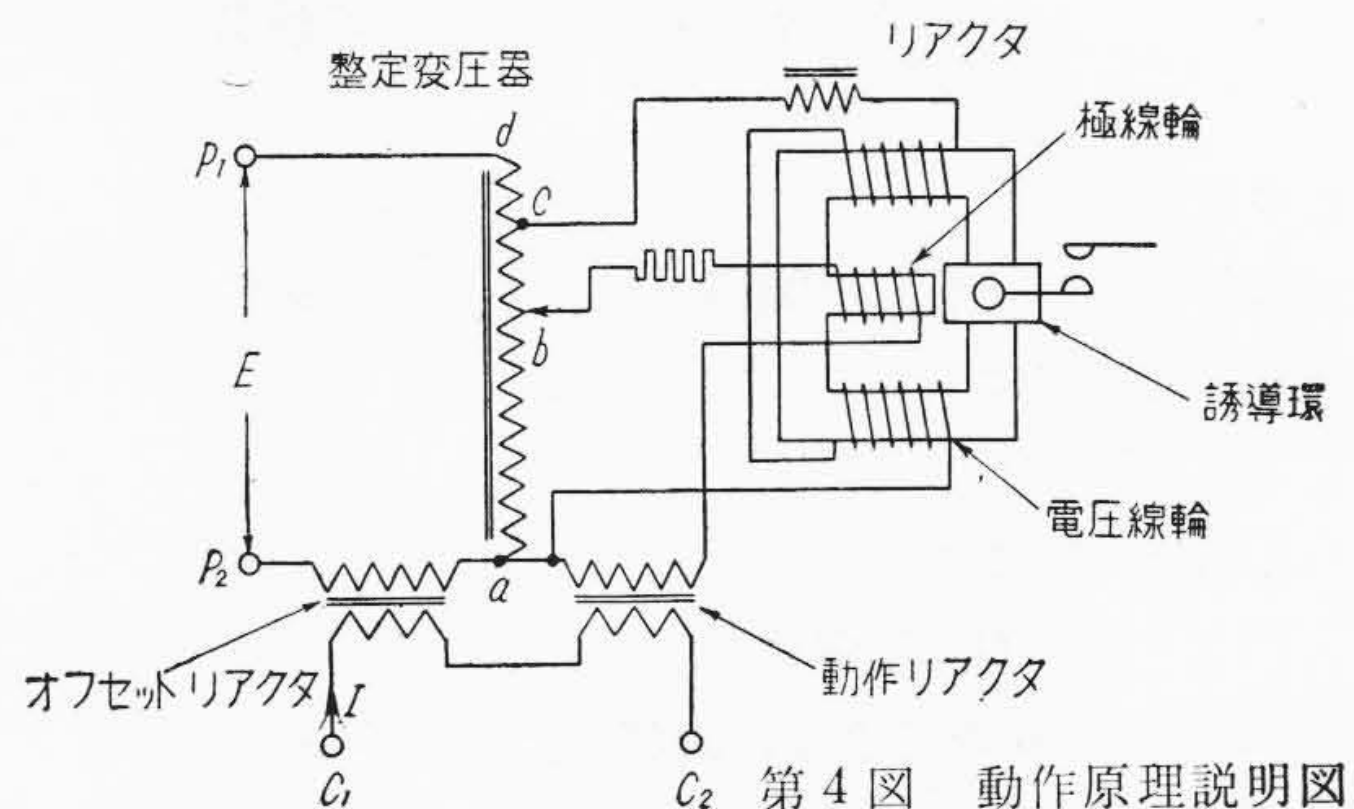
(1) 構造と動作原理

界磁喪失継電器としては、 $-X$ 方向にオフセットしたオフセットインピーダンス継電器が適していることは前述の解析によりあきらかであるが、この特性を得る継電器の構造には種々のものが考えられる。

KE型界磁喪失継電器は、日立製作所において長い経験と技術を持つ誘導環型の構造になつており、第3図は本器の外観を、第4図は動作原理説明図を示す。第4図においてオフセットリアクタおよび動作リアクタは、磁



第3図 KE型界磁喪失継電器



第4図 動作原理説明図

路の一部に空隙をもつている鉄心に電流線輪および二次電圧線輪を設けて、変流器回路の負担を少くするとともに電流が広範囲に変化しても一定の大きさのリアクタンスを得るためのものである。

本継電器の電圧回路には保護すべき同期機の端子における2線間の電圧を、電流回路にはこれと対応する線電流の差電流を加える。

いま

$$\begin{aligned} \dot{E} &= E \varepsilon^{j\omega t} \dots\dots\dots \text{電圧端子 } P_1 \rightarrow P_2 \text{ に加える計器用変圧器の二次電圧} \\ \dot{I} &= \dot{I} \varepsilon^{j(\omega t - \theta)} \dots\dots\dots \text{電流端子 } C_1 \rightarrow C_2 \text{ に流す変流器の二次電流} \\ \alpha &\dots\dots\dots \text{継電器の整定変圧器の } ad \text{ 間と } ac \text{ 間の変圧比} \\ \beta &\dots\dots\dots \text{同じく } ad \text{ 間と } ab \text{ 間の変圧比} \\ \dot{I} \dot{X}_0 &= I X_0 \varepsilon^{j(\omega t - \theta + \frac{\pi}{2})} \dots\dots\dots \text{オフセットリアクタの二次電圧} \\ \dot{I} \dot{X}_p &= I X_p \varepsilon^{j(\omega t - \theta + \frac{\pi}{2})} \dots\dots\dots \text{動作リアクタの二次電圧} \end{aligned} \quad (14)$$

とすると電圧線輪および極線輪回路の電圧 $\dot{E}e$ および $\dot{E}p$ はそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{E}e &= \alpha (\dot{E} + \dot{I} \dot{X}_0) \\ \dot{E}p &= \beta (\dot{E} + \dot{I} \dot{X}_0) + \dot{I} \dot{X}_p \end{aligned} \quad (15)$$

一方図に示すような誘導環型継電器の動作回転力は、誘導環電流およびこれを設けてある空隙の磁束密度に比例し、それらはそれぞれ電圧線輪および極線輪回路の電圧 $\dot{E}e$ および $\dot{E}p$ に比例するものとすれば、継電器の回転力は

$$T = K \dot{E}e \varepsilon^{-j\varphi} \cdot \dot{E}p \varepsilon^{-j\phi} + T_0 \dots\dots\dots (16)$$

で与えられる。

ここで

K 継電器常数

φ 電圧線輪回路電圧 $\dot{E}e$ に対する誘導環電流の遅れ角

ϕ 極線輪回路電圧 $\dot{E}p$ に対する空隙磁束の遅れ角

T_0 接点を無励磁のとき開路せしめておくための渦巻パネの制御回転力と可動部の摩擦回転力の和

とする。

(16) に (14) と (15) の関係を入れさらに、継電器の動作限界においては

$$T = 0$$

とおき、ここで

(1) $T_0 = 0$ と仮定する

(2) $\varphi = \phi$ なるように回路を選定する

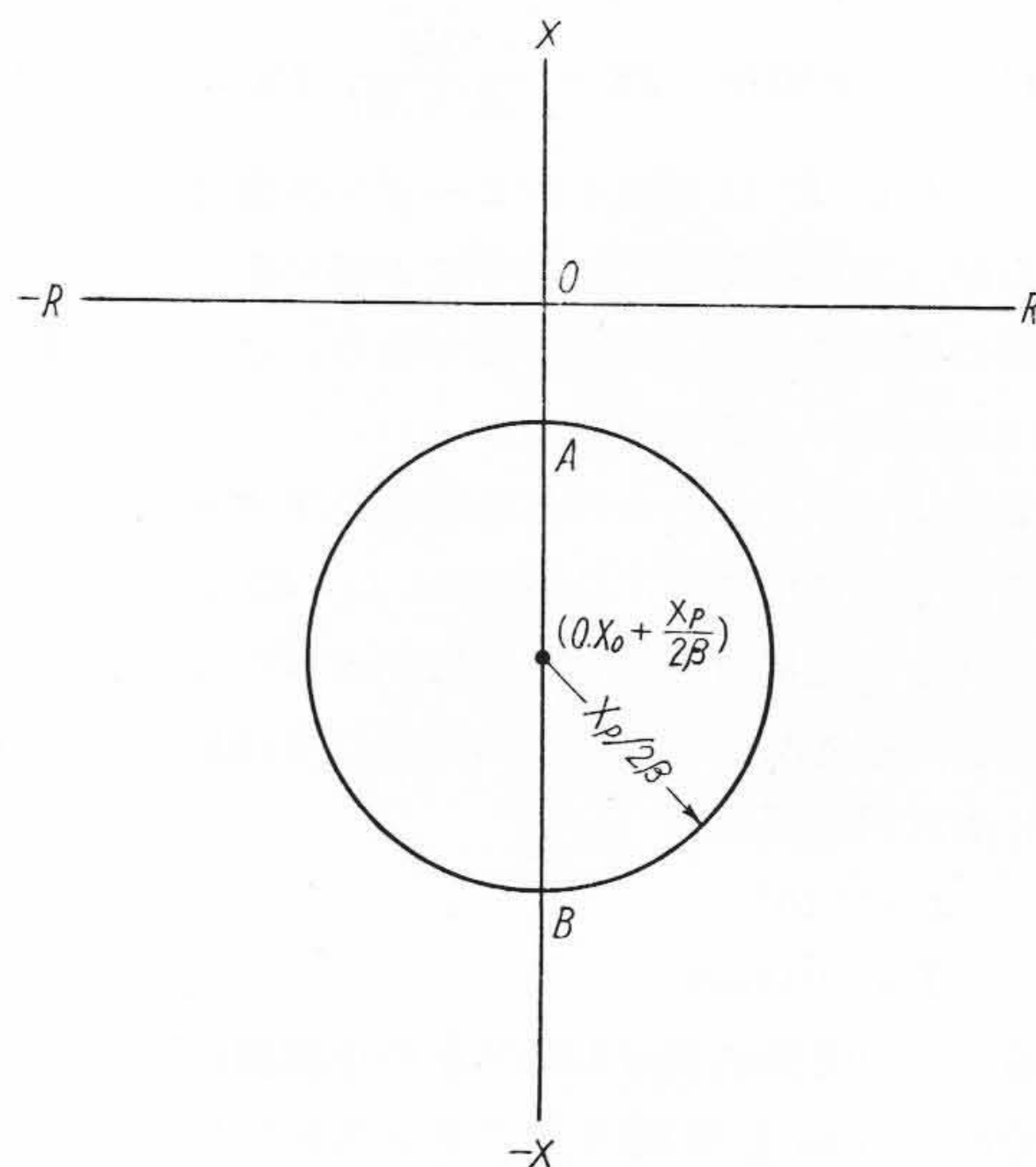
と (16) は

$$K\alpha \left[E^2 + EI \left(2X_0 + \frac{Xp}{\beta} \right) \sin\theta + \left(X_0^2 + \frac{X_0 Xp}{\beta} \right) I^2 \right] = 0 \dots\dots\dots (17)$$

となる。これは第 5 図に示すように中心 $(O, X_0 + Xp/2\beta)$ 半径 $(Xp/2\beta)$ のオフセットインピーダンス特性を示す。したがって任意のインピーダンス Z がこの動作円特性内に達したときに継電器はその接点を閉じるように動作する。

(2) 特 性

本器は前記のように第 5 図に示すオフセットリアクタンス (A 点) は保護する同期機の約 $x'd/2$ に、オフセットリアクタンスと動作インピーダンス円の直径の和 (B 点) はほぼ x_d にひとしい値に整定するため、オフセットリアクタンス X_0 および整定変圧器の変圧比 β によりオフセットリアクタンスは 0, 1, 2, 3, 4Ω に、インピーダンス円の直径は 4 ~ 26Ω の間を整定できるようなタップを設けている。

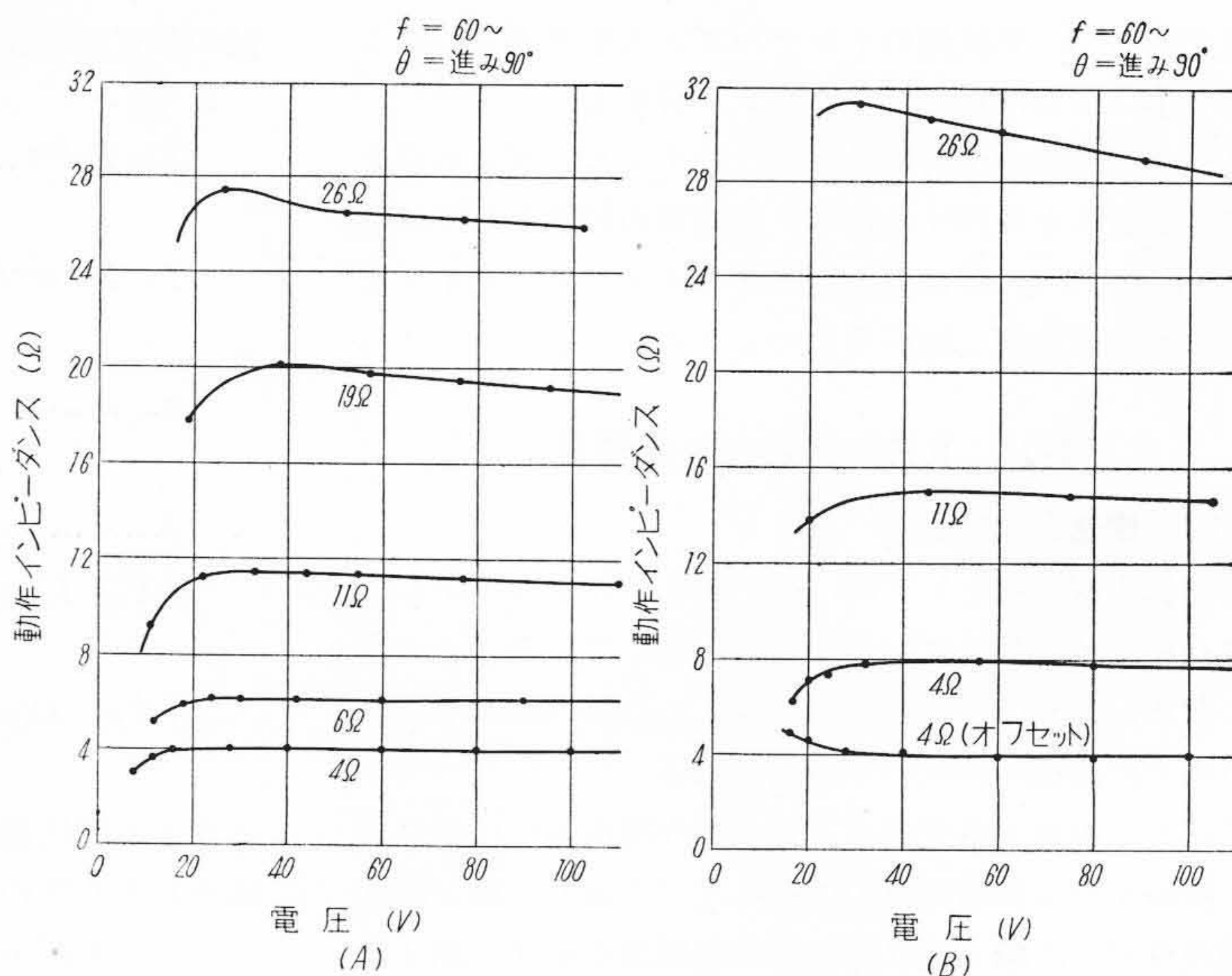


第 5 図 オフセットインピーダンス特性

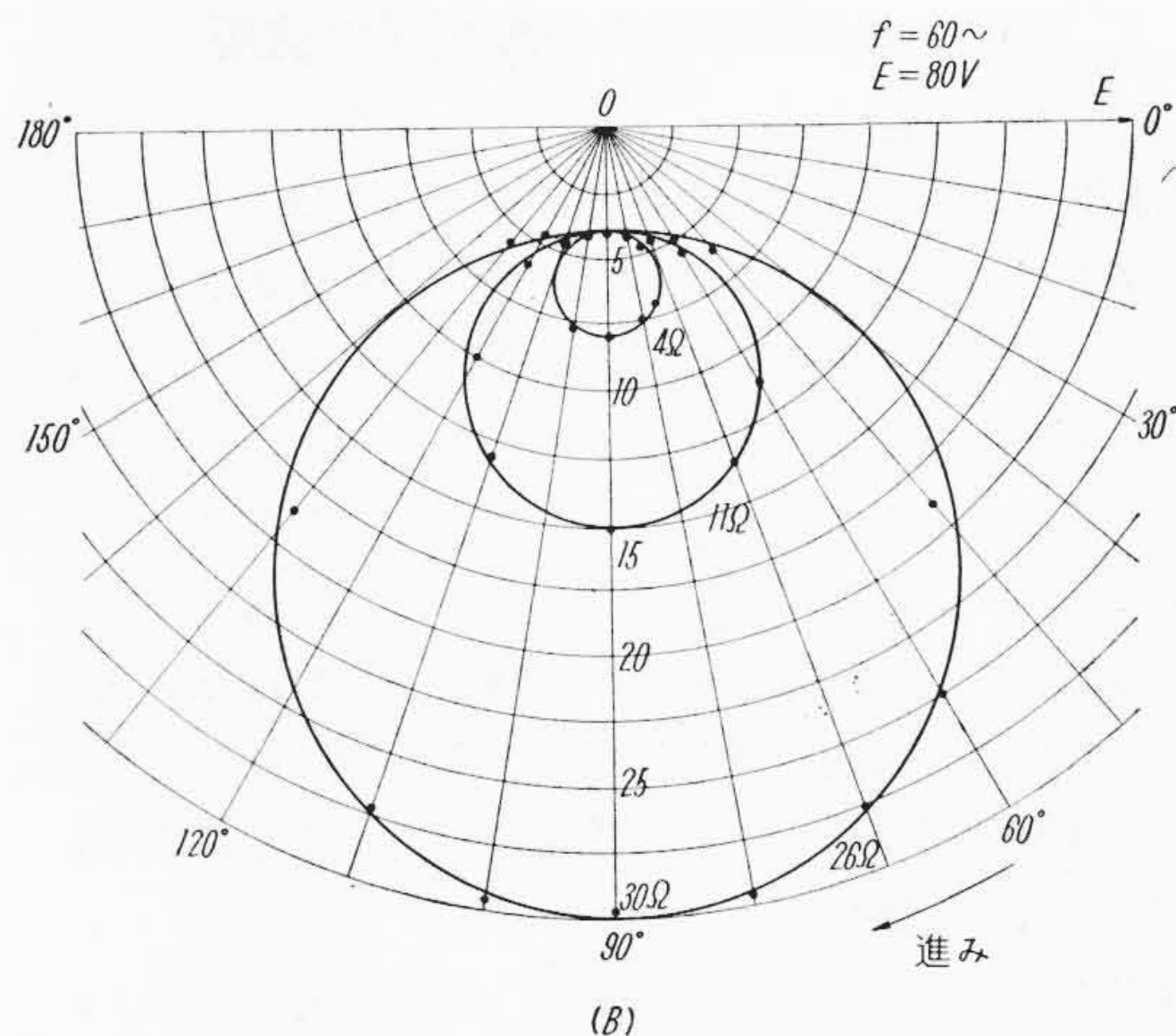
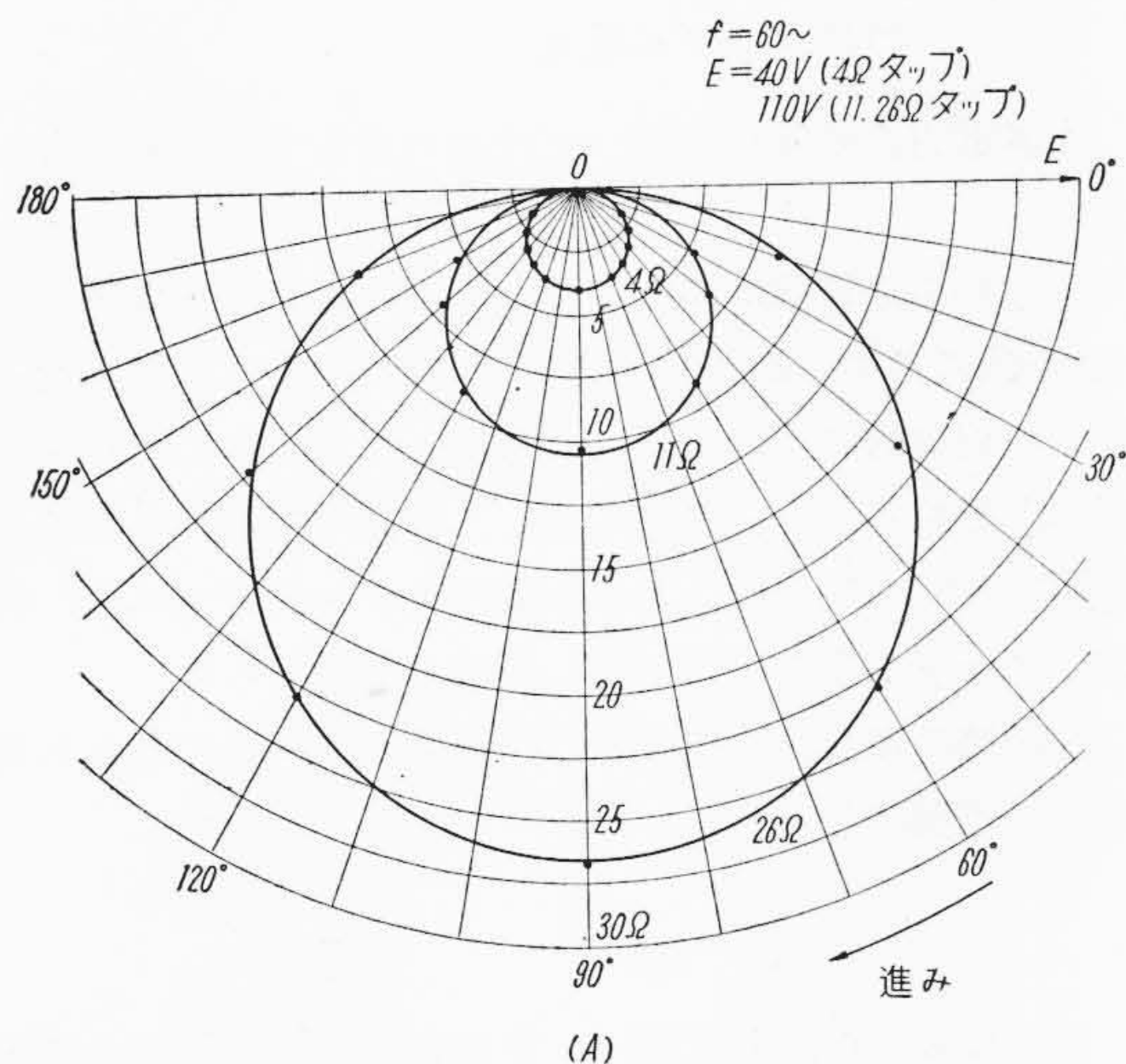
第 1 表⁽¹⁾

種 別	x_d	$x'd$
二極タービン発電機	$\frac{1.10}{0.95 \sim 1.45}$	$\frac{0.15}{0.12 \sim 0.21}$
四極タービン発電機	$\frac{1.10}{1.00 \sim 1.45}$	$\frac{0.23}{0.20 \sim 0.28}$
制動巻線付凸極発電機および電動機	$\frac{1.15}{0.60 \sim 1.45}$	$\frac{0.37}{0.20 \sim 0.50}$
制動巻線なき凸極発電機	$\frac{1.15}{0.60 \sim 1.45}$	$\frac{0.35}{0.20 \sim 0.45}$
同 期 調 相 機	$\frac{1.80}{1.50 \sim 2.20}$	$\frac{0.40}{0.30 \sim 0.60}$

数値は単位法による



第 6 図 インピーダンス感度特性



第 7 図 力 率 特 性

各種同期機のリアクタンスは第 1 表のようになっているのでこれらの整定タップによりほとんどすべての機械に適用することができる。

(A) インピーダンス感度特性

本器はその使用目的上電圧、電流の大小によつて動作インピーダンスが変化することは望ましくない。また本継電器は動作原理上整定変圧器の二次電圧、オフセットおよび動作リアクタの二次電圧などを比較動作するものであるから、これらは特性のすぐれているものを使用しなくてはならない。

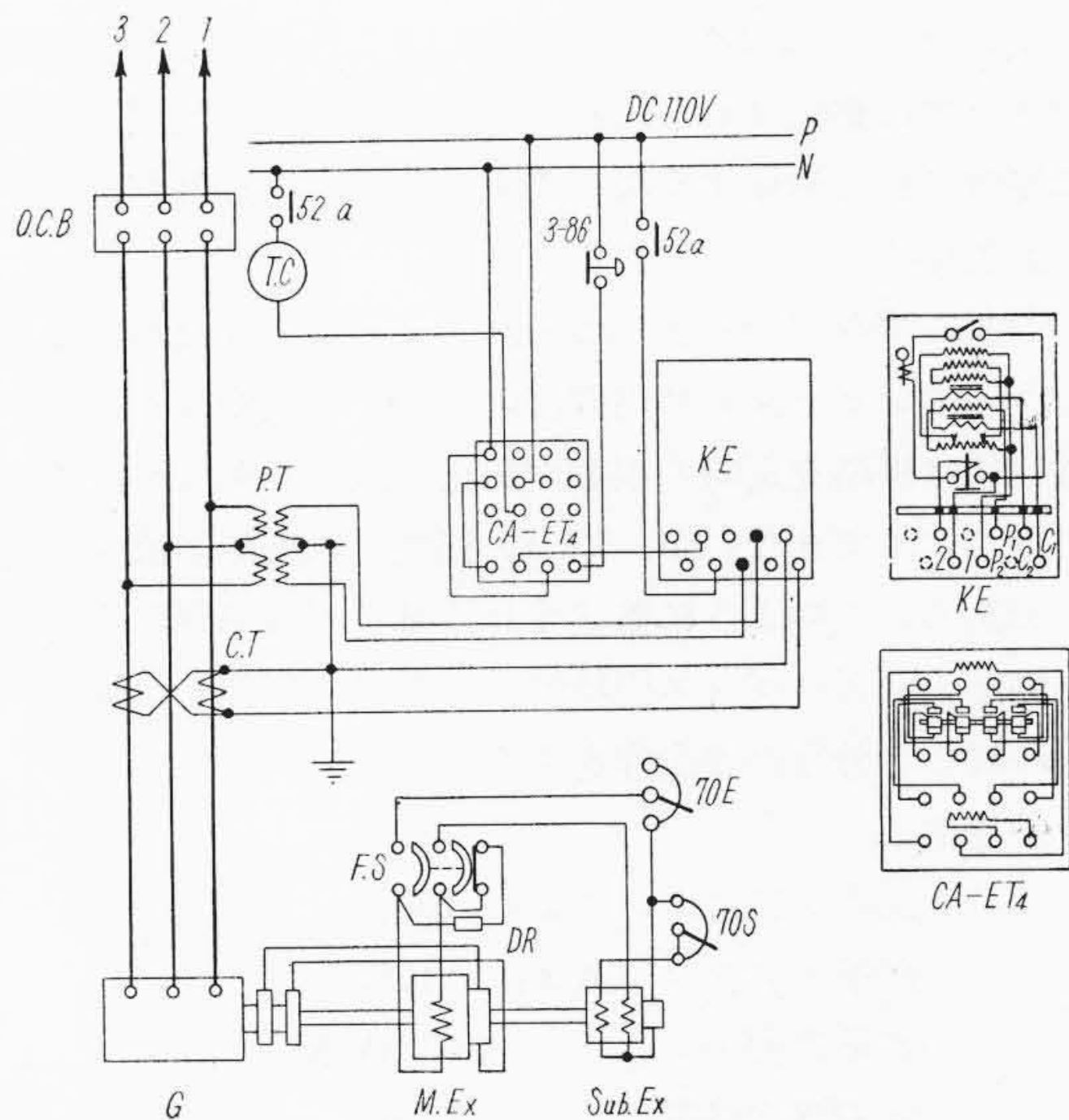
第 6 図は本器の感度特性を示し (A) はオフセットを 0Ω , (B) は 4Ω に整定し動作インピーダンス円の直径の整定値を変えたときのインピーダンス感度特性である。(A) と (B) を比較することによりオフセット値を変えても円の直径はほとんど影響をうけないことがわかる。同様に図では省略しているが、オフセット値も円の直径の整定値による影響は少なく、わずか数%以下になっている。

(B) 力率特性

本器の特性はオフセットインピーダンス特性になっているので動作インピーダンス円は真円であることが望ましく、これが整定値によつて歪んではならないとともにその中心は $-X$ 軸上になくてはならない。

本器の力率特性は前項で述べた $\varphi = \phi$ なる条件によつて支配され、これは電圧線輪の直列リアクタおよび極線輪の直列抵抗によつてみたされるようになっている。したがつてこれらが電圧によつて変化するようなことがあると特性がそこなわれる。そのために継電器の鉄心直列アクタなどについては特に意を払つてある。

第 7 図は力率特性を示し、(A) はオフセットを 0Ω , (B) は 4Ω に整定しておき動作インピーダンス円の直径



第 8 図 外 部 接 続 図

を種々に変えた場合の特性で、円の歪がきわめて少いとともにその中心も正しく $-X$ 軸上にあることを示している。

(C) 動作時間そのほか

大容量同期機においては界磁喪失が発生した場合、その出力端子におけるインピーダンスの変化は初期は比較的緩慢であるが、終期において同期外れに至る前後では急激な変化がごく短時間のうちに起るので継電器は高速度動作であることが必要である。本継電器の動作時間は電圧、電流、整定値によつて差異はあるがほぼ 20~50 ミリ秒である。

また消費 VA は整定値、電圧電流の位相角によつて変化するが、電圧回路の最大消費 VA は 110V において約 20VA、電流回路のそれは 8.66A にて約 15VA になつてゐる。

〔IV〕 KE型界磁喪失継電器の適用

(1) 接 続

本KE型継電器は上記の通り、単相のオフセットインピーダンス継電器で、同期機端子のいずれかの2線間の電圧と、これに対応する線電流の差電流をもつて、インピーダンスを測定し、測定値が整定値以内となれば動作する。したがって動作特性よりあきらかなとおりインピーダンスベクトルが+X成分を有する外部短絡に対しては全然誤動作の心配はない。この代表的接続は第8図のとおりである。主変流器が専用できない時はその二次回路に $5/5$ A補助変流器を用いて差電流を得るようにする。

(2) 整 定

動作インピーダンス円の整定は、保護能力の確保と、誤動作防止の両者をあわせ考え第5図のインピーダンス特性において次のようにする。

オフセット値 OA は $1/2 x'_a$ またはこれに近く大きい値のタップに整定する。これは被保護同期機が無限大母線に接続されて運転する場合の電力動揺、同期外れに対する誤動作防止のためである。

つぎに OB は x_a またはそれより若干大きな値になるようにインピーダンス円直径のタップを選定する。この整定値は線路充電時の誤動作防止の点よりあまり大きくとることはできないが、 $1.1 x_a$ 程度が保護能力確保上適当である。このように整定すれば継電器は AB なる直径の動作インピーダンス円特性にしたがい動作し、界磁喪失に対し十分な保護動作をする。

計算例

過渡リアクタンス $x'_a = 16\%$

同期リアクタンス $x_a = 115\%$

基準出力 = 63MVA

同期機定格電圧 = 13.2kV

CT = $4,000/5$ A = 800:1

PT = $13,200$ V/ 110 V = 120:1

基準リアクタンス = $\frac{kV^2}{MVA} \times \frac{CT \text{ 比}}{PT \text{ 比}}$

$$= \frac{13.2^2}{63} \times \frac{800}{120} = 18.15\Omega$$

過渡リアクタンス (二次側) = (基準リアク

$$タンス) \times \frac{16}{100} = 2.9\Omega$$

したがってオフセット $OA = 1/2 \times 2.9 = 1.45\Omega$

2 Ω タップに整定

同期リアクタンス = (基準リアクタンス) $\times$

$$\frac{115}{100} = 20.9\Omega$$

インピーダンス円直径 = $20.9 - 1.45 = 19.45\Omega$

21 Ω タップに整定

本継電方式の適用に当つては次の点を考慮せねばならない。

すなわち発電機についてはこれが単に自体の保護よりも、系統に対する影響を考慮して、大容量機または系統に対して相対的に大容量の主要電源となるものに対し適用すべきである。小容量機に対しては先の同期外れ現象の解析において明らかなとおり動作インピーダンス値、特にオフセット量の決定に対し留意せねばならない。

発電機の場合、凸極機と非凸極機とに関してなんら適用上の差異はない。

〔V〕 結 言

日立KE型保護継電器は、界磁喪失故障に対し、従来は後備の限時過電流継電器に頼る以外なかつたわが国の同期機保護継電方式に新威力を加え、単に同期機自体の保護のみでなく、系統の安定な運営に対する責務もまっとうするよう両者の合理的な協調を図つたすぐれた特性を備えている。

本継電器はすでにわが国の電力系統に数多く採用されており、過度安定度向上のための速応励磁方式、あるいは高能率送電のための発電機低励磁運転方式の採用など励磁系統の有効かつ広範囲の使用に対し、同期保持になんらの不安なく、主機の安全と、系統の維持とに大きく貢献することが期待される。

参 考 文 献

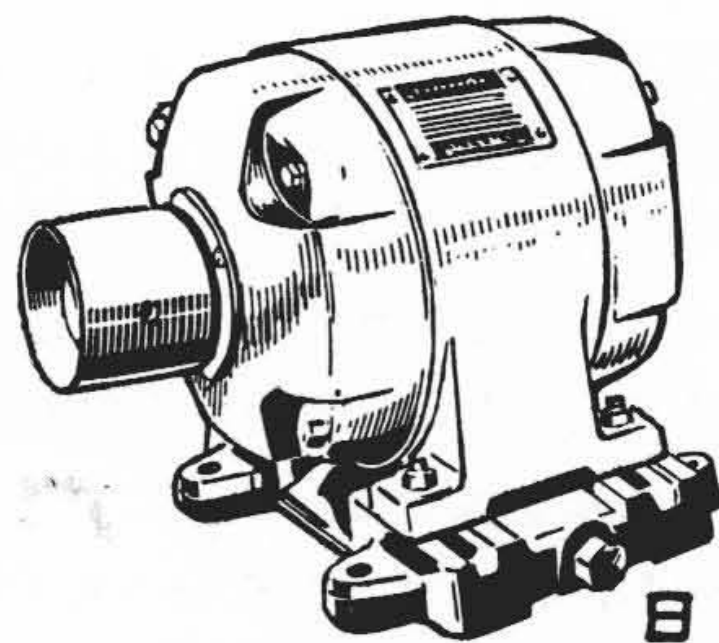
- (1) 電気工学ハンドブック P613

日立モートルの評判は どこへ行つても絶対です。



日立モートルは各方面に於ける愛用者の方々へのゆきとどいたサービスと共に独特の一貫作業により安心して使つて頂ける力の強いそして寿命の永い優秀品であります

日立モートルの生産高と販売高がモートル界の第一位にある事によつてもその評判はおわかりでしょう



日立製作所