

漏電検出器用環状巻磁心の透磁率分布の改善*

山 本 行 雄**

1. ま え が き

配電系統における地絡事故は、零相変流器によって高感度な検出がおこなわれ、その規格はJECなどで規定されており⁽¹⁾、使用範囲は相当に広範囲になってきている。

零相変流器は、三相回路における零相電流の検出器として用いられることから、この名称がつけられているが、一次導体の構成を変えるだけで、単相回路の地絡電流の検出が可能であり、単相用零相変流器の名称も慣例として用いられている。ここでは、漏電検出器の名で記すことにする。

漏電検出器によって地絡電流検出をおこなう場合、残留電流が検出感度と信頼性を制限する一つの重要な因子となっている。残留電流は地絡の発生の有無にかかわらず、漏電検出器の二次巻線に流れる電流であり、残留電流が大きい場合は、二次負担として接続されている継電器の誤動作を招くおそれがあり、その発生をできる限り抑制する必要がある。

漏電検出器もしくは零相変流器に関しては、坪内氏や筆者らによる研究報告がすでになされてきている^{(2)~(6)}。

本論文では、漏電検出器の磁心に環状巻磁心を用いた場合、磁心の実効透磁率分布が内側継目の影響を受け、その結果、不均一分布をなすことを示し、この不均一分布をつぎのような方法によって等価的に均一分布に改善し、その結果、残留電流の効果的な減少がおこなえることを記している。

(1) 複合磁心を用いる方法。

(2) 二次巻線密度を不均一分布巻きにする方法

これらの方法は、比較的簡単な構成によって実効透磁率分布の補償ができ、漏電検出器の信頼性向上のための一つの有効な役割をはたすものと考えられる。

2. 実効透磁率の不均一分布

漏電検出器は、環状磁心に二次巻線を均一密度で巻き、図1(a)のように、一次導体を一括して磁心の窓枠内に通過させる構成がとられている。ここでは、単相2線式系統について考える。一次導体に地絡事故が発生していない場合は、図1(b)に示すような磁束 ϕ_1 、 ϕ_2 が生じる。これらの磁束はエアギャップの多い磁路を形成している。一次導体が互に対称位置に配置され、さらに磁心の実効透磁率、二次巻線密度が一定の場合、これらの磁束の合成を環状磁心の一周にわたって積分すれば、全体として打消し合って零となり、二次巻線には

* 昭和49年7月 電気学会磁気応用、磁性材料合同研究会において発表

** 電気工学科助教授

原稿受付 昭和50年9月30日

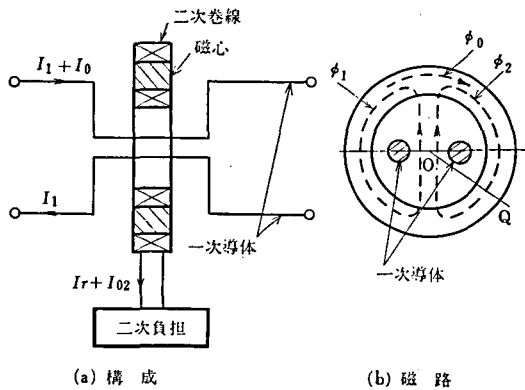


図1 漏電検出器

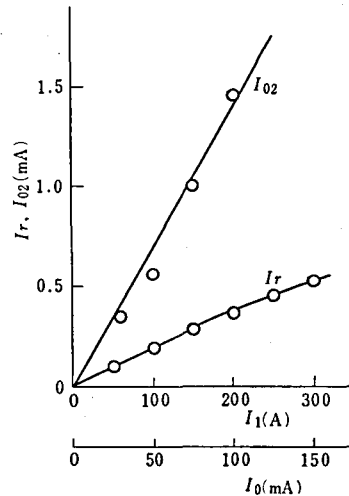


図2 漏電検出器の特性

起電力を生じないはずである。実際には、打消しが完全におこなわれず、二次巻線に起電力が発生し、二次負担に電流 I_r が流れることになる。この電流は残留電流と呼ばれている。

地絡電流 I_0 の形成する磁束 ϕ_0 は、磁心を一周するような磁路を形成し、二次負担に地絡検出電流 I_{02} を流し、一定以上のレベルに達したとき継電器を動作させる。

地絡事故検出をおこなうための磁束 ϕ_0 は磁心内のみを通過し、残留電流の原因となるような磁束 ϕ_1 , ϕ_2 はエアギャップを含んでおり、一個の磁心によって巧みな磁路構成をおこなっているといえる。ただし、一次電流 I_1 は地絡電流 I_0 に比較して非常に大きいため、その結果生じる残留電流は無視できず、図2に示すように、 $I_1=300\text{A}$ の場合の残留電流 I_r と、 $I_0=40\text{mA}$ における地絡検出電流 I_{02} とは、ほぼ等しく、地絡電流の高感度検出のためには、残留電流を減少させる必要がある。

残留電流を示す式は⁽⁶⁾

$$I_r = \frac{E_r}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

$$E_r = S \int_0^{2\pi} \mu_0 n_\theta H_\theta d\theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

H_θ : I_1 の形成する磁界の円周方向成分, L : 二次巻線のインダクタンス, R_L : 負担抵抗, S : 磁心の断面積, μ_0 : 実効透磁率, n_θ : 二次巻線密度 (一般には均一分布巻きとする) であり、一次導体が対称に配置されていれば、磁界 H_θ は⁽⁶⁾

$$H_\theta = \frac{I_1}{\pi r_a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{d}{r_a} \right)^{2n-1} \cos(2n-1)(\theta - \Theta) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $2d$: 一次導体間隔, r_a : 磁心の平均半径, θ : 磁心軸上の位置, Θ : 一次導体と基準線 OQ との角度 (図1参照)

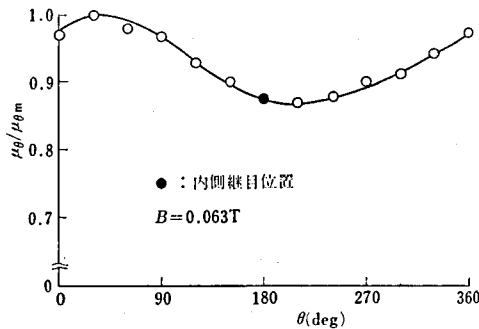


図3 実効透磁率分布

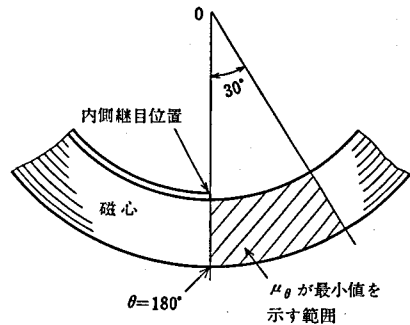


図4 内側継目の影響

磁心軸上に形成される磁束密度の円周方向成分を B_θ とするとき、磁心の実効透磁率を

$$\mu_\theta = B_\theta / H_\theta \quad \dots\dots\dots(4)$$

で定義する。

実効透磁率は、図3に示すように、磁心軸上の位置 θ によって、かなり大きな変動を示している。なお、図3では μ_θ の最大値を $\mu_{\theta m}$ としている。この変動の原因は図4のように、磁心の内側継目位置（テープの巻始め位置）において、断面が急激に変化するため、磁界が乱されるものと考えられる。

外側継目位置（テープの巻終り位置）では、磁界が小さいと考えられるため、外側継目による影響はほとんどみられなかった。

図3の測定は、いずれの点も、磁界 H_θ が最大の位置 ($\theta=0$) でおこなってある。これは各部が同一の磁化条件で測定されるようにするためである。多くの磁心の測定結果から、実効透磁率の最小値は図4のように、内側継目位置から 30° の範囲に入っていることが認められた。

以上のように、実効透磁率分布の不均一が磁心の内側継目の影響を受けることが明らかであり、(2)式に示したように、実効透磁率分布と磁界分布とが重なり合う結果、残留電流が発生することになる。

3. 透磁率分布の改善

巻磁心を漏電検出器用磁心に用いた場合、実効透磁率の不均一分布が問題となるので、これを等価的に改善し、残留電流を減少させる方法について述べる。以下において改善の状況は、主として(2)式で示した起電力 E_r の大きさによって判断することとする。

<3・1>複合磁心を用いる方法

実効透磁率の不均一分布は内側継目が原因となっているから、同一寸法の二個の巻磁心を重ね合せて複合磁心とし、重ね合せるとき、磁心のテープの巻方向が同じであるように配置する。この場合、二個の磁心の内側継目位置間の角度を重ね角 δ とする。

重ね角 $\delta=180^\circ$ 、すなわち内側継目位置が磁心の窓枠の中心に対して、互いに反対側になるような場合の実効透磁率分布を図5に示す。磁心一個の場合は、かなり不均一であるが、

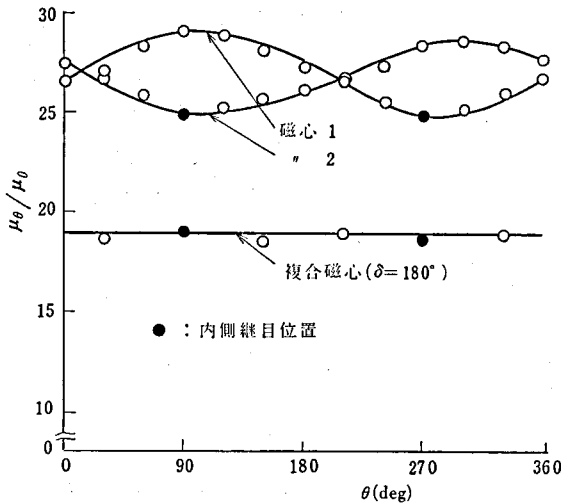


図5 複合磁心による実効透磁率の改善

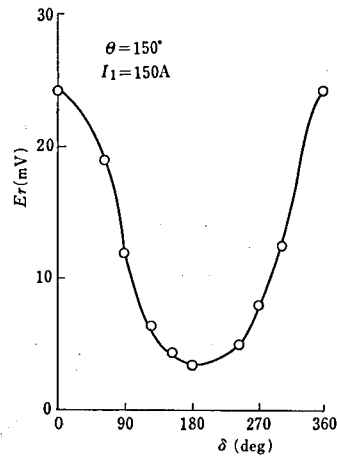


図6 重ね角の影響

複合磁心としたことによって、改善がおこなわれているのがみられる。

漏電検出器として用いる場合は、この複合磁心を一括して二次巻線を施す。重ね角 δ を変化させた場合の漏電検出器の起電力 E_r の変化を図6に示す。重ね角と共に実効透磁率の不均一分布が補償されていく状況が見られている。

重ね角 δ を 180° とし、相対角度 θ を変化させた場合の、起電力 E_r の変化を $\delta=0$ の場合と比較して図7に示す。複合磁心にした結果、起電力 E_r が非常に小さくなっている様子がわかる。

これを残留電流の補償法として、従来かなり一般的な方法として用いられている強磁性体によるシールド補償法と比較すると、シールド法によって起電力 E_r は、補償前の約半分程度（後出第1表参照）までしか減少していないのに対し、複合磁心では $1/8$ 程度まで減少できており、効果は大きい。

<3・2>二次巻線密度を不均一にする方法

実効透磁率の不均一分布は、二次巻線密度を変化することによっても補償できる。

図8に示すように、実効透磁率の大きさが最小の位置を中心にして、巻幅 $2a$ の範囲で巻線密度が大きくなるように、A点から巻始め、B点で巻終るように二次巻線を施すとき、二次巻線密度 n_θ は

$$n_\theta = n_2 + \frac{a}{\pi} n_c + \frac{2n_c}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m} \sin ma \cos m\theta \quad \dots\dots\dots(5)$$

で表わせる。

実効透磁率 μ_θ と磁界 H_θ の分布を次式で近似する。

$$\mu_\theta = \bar{\mu} + \Delta\mu \cos \theta \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$H_\theta = H_m \cos(\theta - \Theta) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $\bar{\mu}$: μ_θ の平均、 $\Delta\mu$: μ_θ の変動幅、 H_m : H_θ の最大値

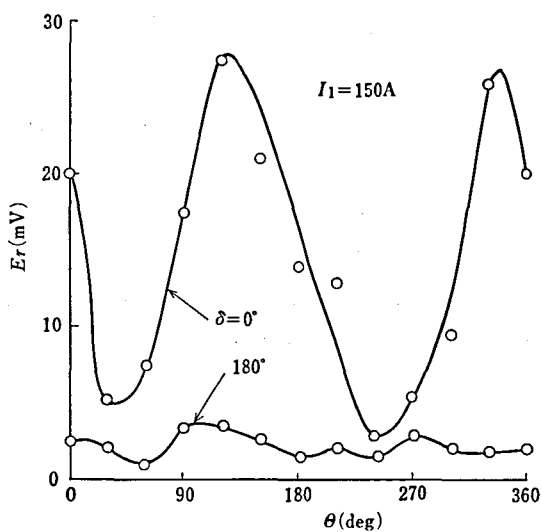


図7 複合磁心の特性

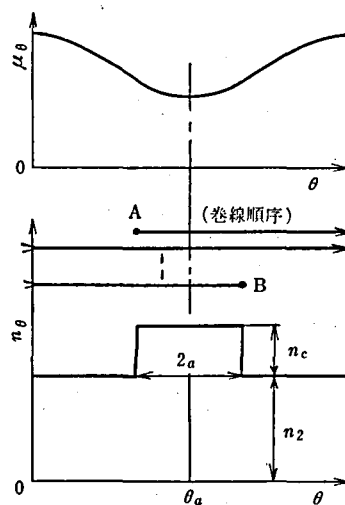


図8 不均一密度二次巻線

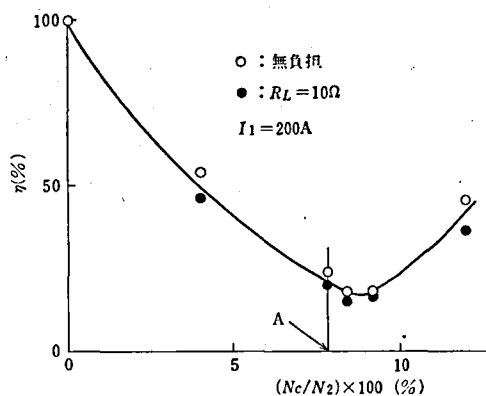


図9 二次巻線による補償

表1 補償効果の比較

摘 要	$E_{rmax}(mV)$
補 償 な し	24.0
シールド補償	11.5
複 合 磁 心	3.5
シールド付複合磁心	1.8
不均一二次巻線補償	3.4
シールド付二次巻線補償	2.4

起電力 E_r は(2)式から

$$\begin{aligned}
 E_r = & H_m \frac{2n_c \bar{\mu}}{\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m} \sin ma \cos(\theta - \Theta) d\theta \\
 & + H_m \Delta\mu \left(n_2 + \frac{a}{\pi} n_c \right) \int_0^{2\pi} \cos \theta \cos(\theta - \Theta) d\theta \\
 & + H_m \Delta\mu \frac{2n_c}{\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m} \sin ma \cos \theta \cos ma \cos(\theta - \Theta) d\theta \quad \dots\dots\dots(8)
 \end{aligned}$$

と書ける。

$$\frac{2n_c \bar{\mu}}{\pi} \sin a \cos \theta = \Delta\mu \left(n_2 + \frac{a}{\pi} n_c \right) \cos \theta \quad \dots\dots\dots(9)$$

とすれば、起電力 E_r の発生に最も影響の大きな $m=1$ の項を零にできる。

$$n_2 = kn_c, \quad \Delta\mu/\bar{\mu} = \zeta \quad \dots\dots\dots(10)$$

で表わせば, (9)式から

$$k = \frac{2 \sin a - a\zeta}{\pi\zeta} \quad \dots\dots\dots(11)$$

なる結果を得る.

すなわち, (11)式によって n_c の巻幅と不均一密度を決定すれば, 等価的に実効透磁率の不均一分布を補償できる.

実際には $m=1$ の項の補償だけでは完全とはいえないが, 補償前後の比を η とすれば図9に示すように, これだけでも相当に良好な特性が得られている. 図9において,

$$N_2 = \int_0^{2\pi} n_\theta d\theta, \quad N_c = \int_{\theta_a - a}^{\theta_a + a} n_c d\theta$$

である.

実効透磁率を(6)式で近似して求めた補償の最適値は図9のA点であり, 実験とも比較的よく一致しているといえる.

表1に, これまでに示した補償方法による起電力 E_r の最大値 $E_{r, \max}$ の大きさの比較を示した. なお, 漏電検出器は機械的な保護と磁気的なシールドを兼ねて, 鉄製のケースに収納するのが普通である. この場合についても合わせて示した. この表からもわかるように, シールドをした場合に比較して, 複合磁心を用いた場合と二次巻線密度を不均一にした場合共に, 残留電流を減少させる効果が大きく, 実効透磁率分布の不均一を補償するのに役立っている.

これまでに述べた補償方法をシールドと併用した場合, 起電力 E_r がさらに小さくなっているのは当然のことといえる.

4. あ と が き

漏電検出器の残留電流を減少させることは, 感度, 信頼性の向上にとって極めて重要なことである. ここでは, 漏電検出器の磁心として最も一般的な環状巻磁心を用いた場合, 内側継目によって生じる実効透磁率の不均一分布を改善することによって, 残留電流を減少させる方法とその結果について述べた.

これらの方法は, 構造が簡単であり, 補償効果が大きい特長がある.

本研究にあたって, ご指導いただいた信州大学 山田一 助教授ならびに, 有益な討論をいただいた, 電気学会磁気応用, 磁性材料両研究会の各位に感謝の意を表する次第である.

参 考 文 献

- (1) JEC-190 (1973)
- (2) 坪内: 電試研報 No. 664 (昭41)
- (3) 山本, 山上他: 昭42電気四学会連合大会 No. 731
- (4) 山田, 山本: 昭43電気四学会連合大会 No. 2295
- (5) 湯本, 山本他: 昭47電気四学会東海支部連合大会 17p-H-3
- (6) 山本, 山田: 電気学会雑誌 vol. 91, No. 6, p 1101 (1971)