

密閉母線とその解析

Metal Enclosed Bus and Its Analysis

安藤卓郎*

Takuro Ando

高砂常義**

Tsuneyoshi Takasuna

内容梗概

重要な発電所の母線として密閉母線が次第に多く使用せられる傾向になった。これはその安全度が高く、建物や機器との調和もよく、附帯工事が容易であるなどの利点が認められた結果である。しかし最近の母線は短絡容量の大きなものが多く母線相互間に働く電磁力は非常に大きな値となりその設計には十分なる注意が必要である。筆者らは相分離密閉母線の電磁力の軽減について電磁遮蔽の効果と、そのメタルシースに誘起される渦電流の分布について実測ならびにその解析を行い、相分離密閉母線において母線間の電磁力が電磁遮蔽効果によりシースのない場合に比して10%にも低減される事を確認した。

本文は各種密閉母線の一般構造とその実施例について述べ、相分離密閉母線の電磁遮蔽効果の実験的、理論的效果について詳述する。

〔I〕 緒言

最近発電所用機器の単位容量はますます増大してきたが、その母線構造については従来とかく等閑視される傾向があつた。すなわち裸母線を使用して汚損、鳥獣、誤触などによる被害の例があり、またケーブルを使用しても大電流の場合はその端末処理において問題を起すなどのことがあつた。この観点から近頃大電流母線には密閉母線が使用されるようになった。これにより母線は強固なものとなり、発電所の信頼度を高め、保守も容易となつた。密閉母線はユニットごとに工場において完全に組立試験して現地に納入されるので、附帯工事が少なく総合建設費が低減されるばかりでなく、発電所の内外が簡潔となり美観も向上する。しかし最近の母線は短絡容量の大きなものが多く、この強大なる電磁力に耐えるためには金属外被による電磁遮蔽効果を十分に活用しなければならない。これに関して理論的、実験的に電磁遮蔽効果を検討し、その結果母線構造を簡素化し安全率の高い母線構造を確立した。

〔II〕 密閉母線の一般構造とその分類

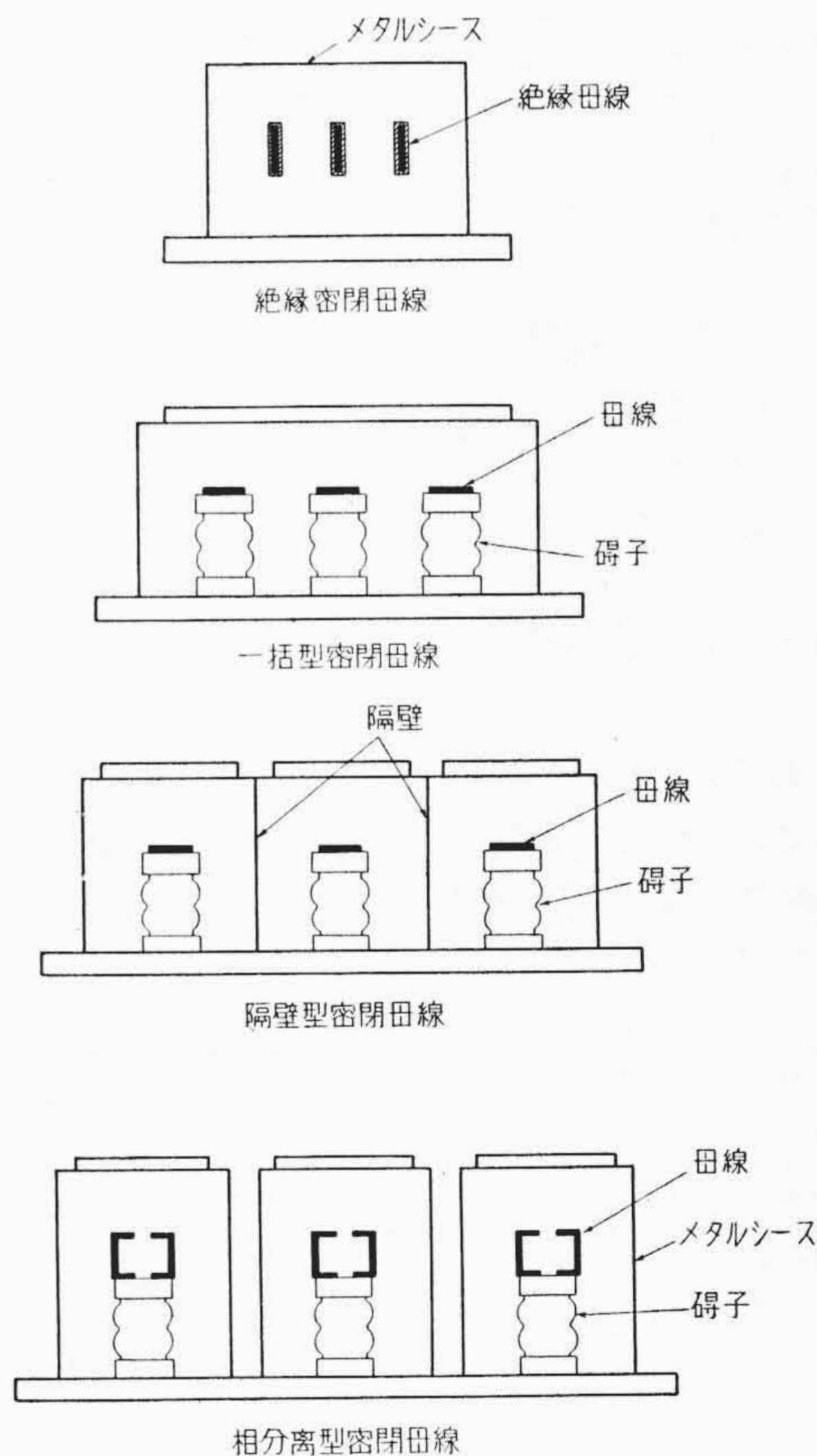
密閉母線は使用電圧、電流、短絡容量、およびその重要度によつて種々構造のものが使用される。第1図はその構造を示したものである。

(A) 絶縁密閉母線

強力な積層絶縁物で絶縁された母線を用い、絶縁板で三相一体のメタルシース内に支持される構造である。母線の接続部も絶縁函などで絶縁されるので簡潔になり、3kW~10kW級のメタルクラッドスイッチギヤーとの連絡などに多く使用される。

* 日立製作所日立国分分工場

** 日立製作所日立工場日立研究所



第1図 密閉母線の一般構造

(B) 一括密閉母線

碍子などで支持された裸母線を三相一括して金属シース内に収めたもので、相間、大地間は気中絶縁で、比較的小容量の母線として用いられる。

(C) 隔壁型密閉母線

一括密閉母線の相間に接地金属板、あるいは絶縁隔壁

を入れたものである。

(D) 相分離型密閉母線

大電流、大短絡容量の母線に用いられ、各相母線は各々独立した非磁性シース内に収められ、互に分離されている。一般に母線相互間には短絡電流による強大な電磁力が働くため、母線およびその支持物は大きな機械的強度を必要とするが、相分離型母線はメタルシースの電磁遮蔽効果によつて、その電磁力は著しく弱められ、後述のようにシースなしの場合の約 10% にも低下される。また母線とシースとの関係位置およびその支持方法によつてはそれ以下にも低減される。したがつて母線およびその支持絶縁物の強度を軽減しうるので絶縁上の事故の機会も少くなる。勿論シース間には強大な電磁力が働く結果となるがこれは絶縁に関係のない機械構造上の問題となるので簡単に処理する事ができる。この電磁遮蔽効果はシース材料の比抵抗の小さい程有効で、この点からアルミシースがもつとも有利である。アルミシースはアルミ板をアルゴン溶接により成型され、耐候性を増すために表面を化学的処理した上塗装が施される。

〔III〕 密閉母線の使用例とその仕様

第 2 図は屋外密閉母線の一例で 2 台の発電機から主変圧器に到る鉄構の上下に取付られた 2 組の母線である。これは神通川第二発電所のもので定格 11.5kV、1,500 A である。

第 3 図は佐久間発電所に用いた 23kV、4,500 A 密閉母線の一部分を示したものである。

従来母線には短時間電流および最大耐電流が比較的等閑視されたが、最近母線の短絡容量の増大と共にその機械的構造設計も非常に重大なものとなつた。今母線に要求される仕様の一例をあげればつぎの通りである。

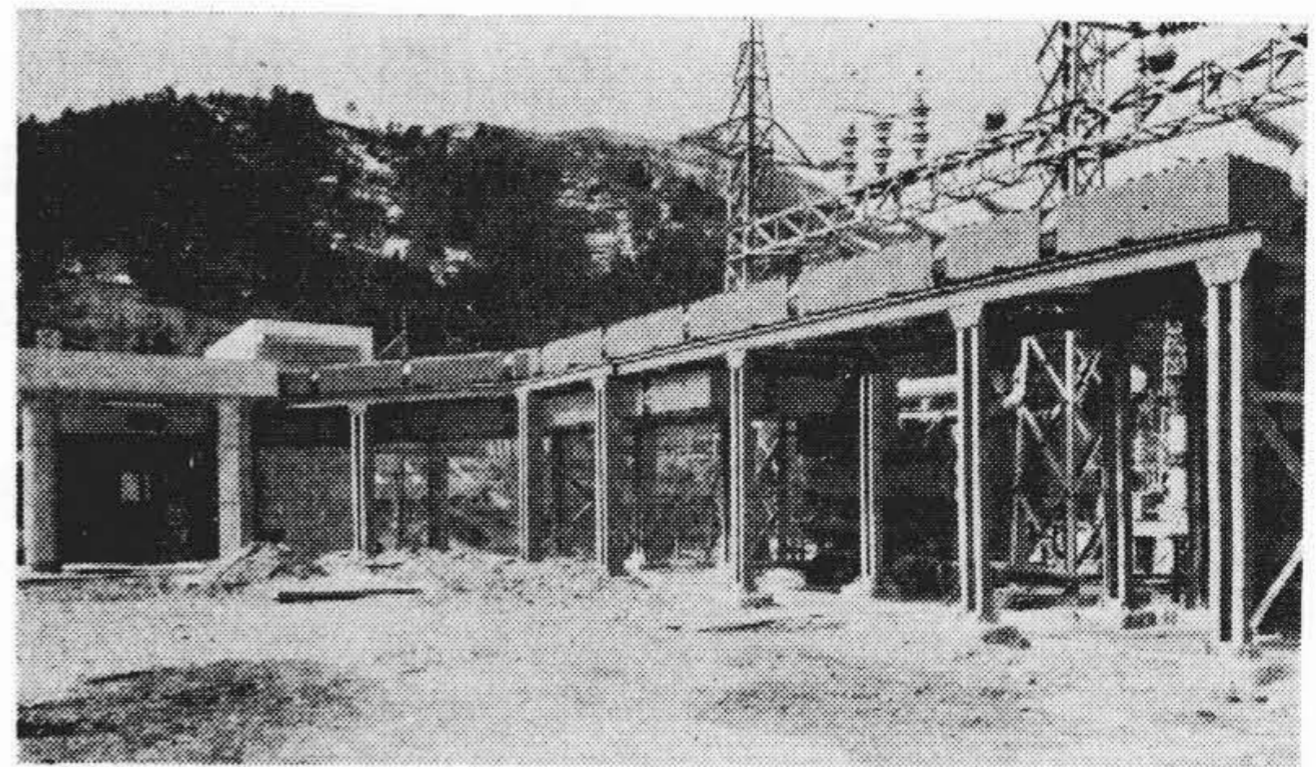
| 使用回路 | 発電機主回路 | 所内一次回路 |
|-----------------|---------|---------|
| 使用電圧 (kV) | 13.2 | 13.2 |
| 定格電流 (A) | 4,500 | 100 |
| 衝撃試験電圧 (kV) | 120 | 120 |
| 短時間電流 2 秒 (A) | 43,000 | 75,000 |
| 最大耐電流 (波高値) (A) | 110,000 | 190,000 |

この短時間電流、最大耐電流に対して十分なる安全度を得るため各種の基礎的研究を行つたがつぎの一部を述べる。

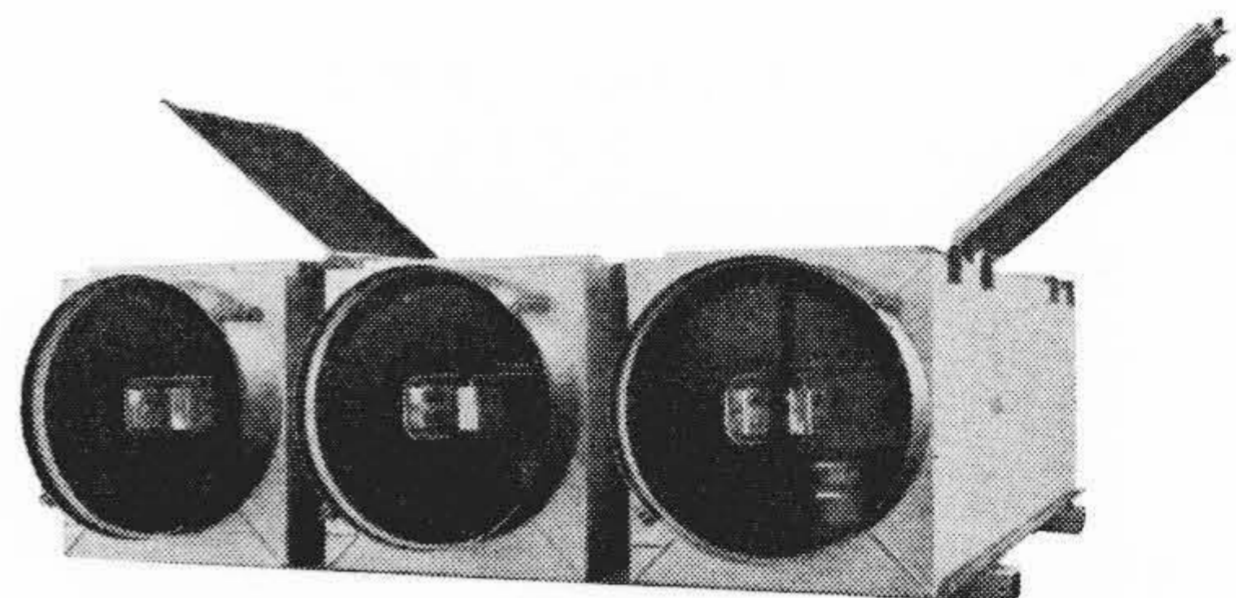
〔IV〕 電磁遮蔽と電磁力の理論的考察

(1) 電磁遮蔽

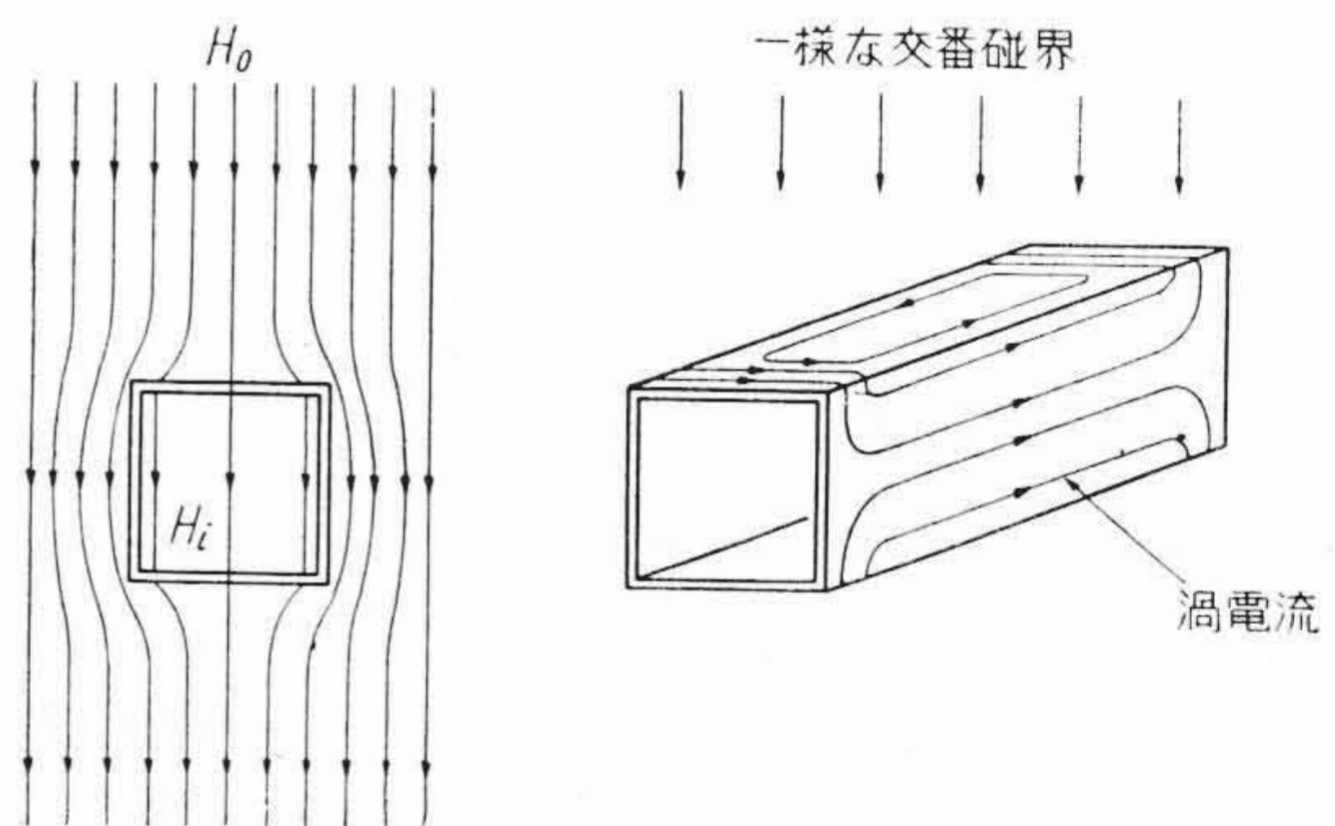
交番磁界の遮蔽方法として金属板で周囲を蔽う方法は古くから知られているが、その遮蔽効果の解折は静電遮



第 2 図 神通第二発電所の屋外密閉母線



第 3 図 23kV 4,500 A 密閉母線の 1 ユニット



第 4 図 金属角筒による遮蔽作用説明図

蔽および磁気遮蔽に較べてかなり複雑であり、定量的には不明の点が多い。第 4 図は一様な交番磁界中に正方形断面の金属筒 (sheath) をおいた場合の遮蔽作用を説明したものである。すなわち金属筒には Lenz の法則に従い渦電流が発生する。この渦電流は図に示すように流れ、内部磁界は外部磁界より減少する。

一様な交番磁界に直角に置いた無限長金属円筒の遮蔽効果⁽¹⁾⁽²⁾は次式で与えられる。

Hi/Ho = 1 / (1 + j * (pi * mu0 * f * d * D) / (2 * rho)) (1)

- ここに Hi: 円筒内部の磁界の強さ
Ho: 円筒なき時の磁界の強さ
D: 円筒の直径 d: 円筒の厚さ
rho: 金属の比抵抗 f: 磁界の周波数

μ_0 : 空気の導磁率

この比の大きさは遮蔽と呼ばれるが、ブス電流の交流分に対する遮蔽係数を k_a で表わせば、

$$k_a = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f T_e)^2}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $T_e = \frac{\mu_0 d D}{4\rho}$ でシース (sheath) における渦電流の時定数である。

地球磁界のような一定磁界に対しては遮蔽作用はないが、短絡電流の直流分は短絡時に急激に発生するため Lenz にの法則にしたがつた渦電流を生じ遮蔽作用が行われる。この直流分に対する遮蔽係数 k_a は次式で示される。

$$k_a = \frac{h_i}{H_0} = \frac{e^{-\frac{t}{T_d}} - e^{-\frac{t}{T_e}}}{1 - \frac{T_e}{T_d}} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 h_i = シース内部の磁界の瞬時値

H_0 = シースのない時の磁界の初期値

T_d : 短絡電流直流分の減衰時定数

(2) および (3) 式から交流、直流いずれの場合も T_e が大きい程遮蔽効果が大きい。すなわち、 ρ の小さい材料を用い、 d および D を大きくすればよいことになる。しかし、 D は実際上限度があり、また厚さ d はある値以上大きくしても表皮効果のためにそれ程効果がなくなる。

いままではシースを円筒形としたが、正方形断面のシースに対しては同じ厚さで同一の周囲を持つ円筒に等しいことが見出されている⁽²⁾。すなわち一辺の長さ W の正方形シースは直径 $\frac{4}{\pi}W$ の円筒形シースに等しい。

(2) 電 磁 力

線導体の並行 2 線間に働らく電磁力は式 (4) で示される。

$$F_0 = 2.05 \times \frac{I_1 I_2 L}{S} \times 10^{-8} \text{ (kg)} \dots\dots\dots (4)$$

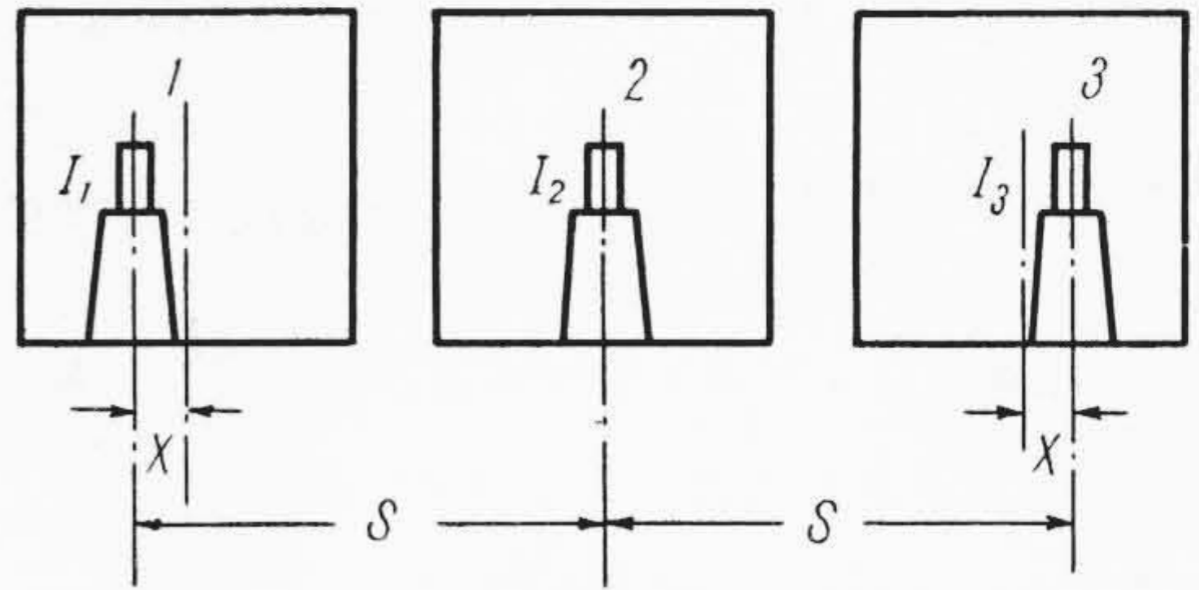
ここに、 I_1, I_2 : それぞれの導体に流れる電流 (A)

S : 線間距離 (m) L : 導体の長さ (m)

密閉母線の場合、遮蔽係数を k とすると内部磁界は k 倍に減少し、したがってブス間の電磁力も k 倍となる。すなわち、

$$F = k F_0 = 2.05 \times \frac{k I_1 I_2 L}{S} \times 10^{-8} \text{ (kg)} \dots\dots\dots (5)$$

この力はブスが強固に固定された場合支持物に加わる力に等しいが、ブスが弾性的に支持されているとつぎの二つの理由によつて力は著しく軽減される。一つは支持物の固有振動数を小さくしておくこと機械的なショックアブソーバの作用をする。ほかの一つはブスが変位するとシースの渦電流によりブスを中央に引戻そうとする力が



第 5 図 三相密閉母線 (X だけ変位した場合)

生ずる。これは電磁力に対して反抗力となるので見掛け上電磁力が減少したことになる。密閉母線の単位長当りのインダクタンスを U とすると、その磁気的エネルギーは $\frac{1}{2}UI^2$ であるから、ブスに加わる反抗力 F' は仮想変位の原理により、

$$F' = \frac{I^2}{2} \frac{\partial U}{\partial X} \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる。ここに X は変位を表わす。

いまインダクタンス U がわかっているとすると、単相回路では二つの力の合成は、(5) および (6) 式より

$$F + F' = \left\{ -\frac{2.05k \times 10^{-8}}{S} + \frac{1}{2} \frac{\partial U}{\partial X} \right\} I^2$$

ここで変位 X を適当にとつて

$$\frac{\partial U}{\partial X} = \frac{4.10k \times 10^{-10}}{S} \dots\dots\dots (7)$$

にすれば支持物に加わる力を 0 とすることができる。

三相平衡回路では変位に起因した反抗力と線間の電磁力との間には位相差があるために、一定の変位を与えただけでは完全に打消すことはできないが、ある程度減少させることが可能である。たとえば第 5 図のように配置した場合を考える。三相平衡電流をそれぞれ

$$I_1 = I_0 \sin \omega t$$

$$I_2 = I_0 \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right)$$

$$I_3 = I_0 \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right)$$

とする。ブス 1 に加わる電磁力 F_1 は、 I_1, I_2 による電磁力 F_{12} と、 I_1, I_3 による電磁力 F_{13} との和であるから、

$$F_1 = F_{12} + F_{13}$$

で表わされる。しかるに (5) 式より、

$$F_{12} = 2.05k I_0^2 \left\{ \frac{1}{S} \sin \omega t \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \right\} \times 10^{-8}$$

$$F_{13} = 2.05k I_0^2 \left\{ \frac{1}{S} \sin \omega t \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \right\} \times 10^{-8}$$

ゆえに、

$$F_1 = 2.05k \frac{I_0^2}{S} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \left\{ \cos \left(2\omega t - \frac{\pi}{6} \right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \right\} \times 10^{-8} \dots\dots\dots (8)$$

一方、シースによつてブスに作用する反抗力 F_1' は (6) 式より、

$$F_1' = \frac{1}{4} \frac{\partial U}{\partial X} \cdot I_0^2 (1 - \cos 2\omega t) \dots\dots (9)$$

となる。 $2.05k \frac{1}{S} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \times 10^{-8} = K_1$, $\frac{1}{4} \frac{\partial U}{\partial X} = K_1'$ とおくと、合成された力は (8), (9) 式より、

$$F_1 + F_1' = I_0^2 \left\{ K_1' - \frac{\sqrt{3}}{2} K_1 + \sqrt{K_1^2 + K_1'^2 - \sqrt{3} K_1 K_1'} \cos(2\omega t + \beta) \right\}$$

ただし、 $\beta = \tan^{-1} \frac{K_1}{2K_1' - \sqrt{3}K_1}$ である。

ここで $|F_1 + F_1'|$ が最小となる条件を求めると

$$\frac{K_1'}{K_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ となり、}$$

$$|F_1 + F_1'| \leq \frac{1}{2} K_1 I_0^2$$

しかるに、

$$|F_1| \leq \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) K_1 I_0^2$$

であるから、

$$\frac{|F_1 + F_1'|}{|F_1|} = \frac{1}{2 + \sqrt{3}} = 0.268$$

すなわち

$$\frac{K_1'}{K_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ あるいは } \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{2.05 \times \sqrt{3} k \times 10^{-8}}{S} \dots\dots (10)$$

なるようにブスを変位させれば三相の場合変位させない時の最大電磁力に対し約 27% に減少させることができる。

3のブスについても同様な結果をうる。三相回路で線間短絡が発生する場合を考慮すれば、(7), (10) 両式から最良なる変位 X を定めることができる。ただし中央のブス2は変位させると、かえつて最大の力が増加するからシースの中央がもつとも望ましい。

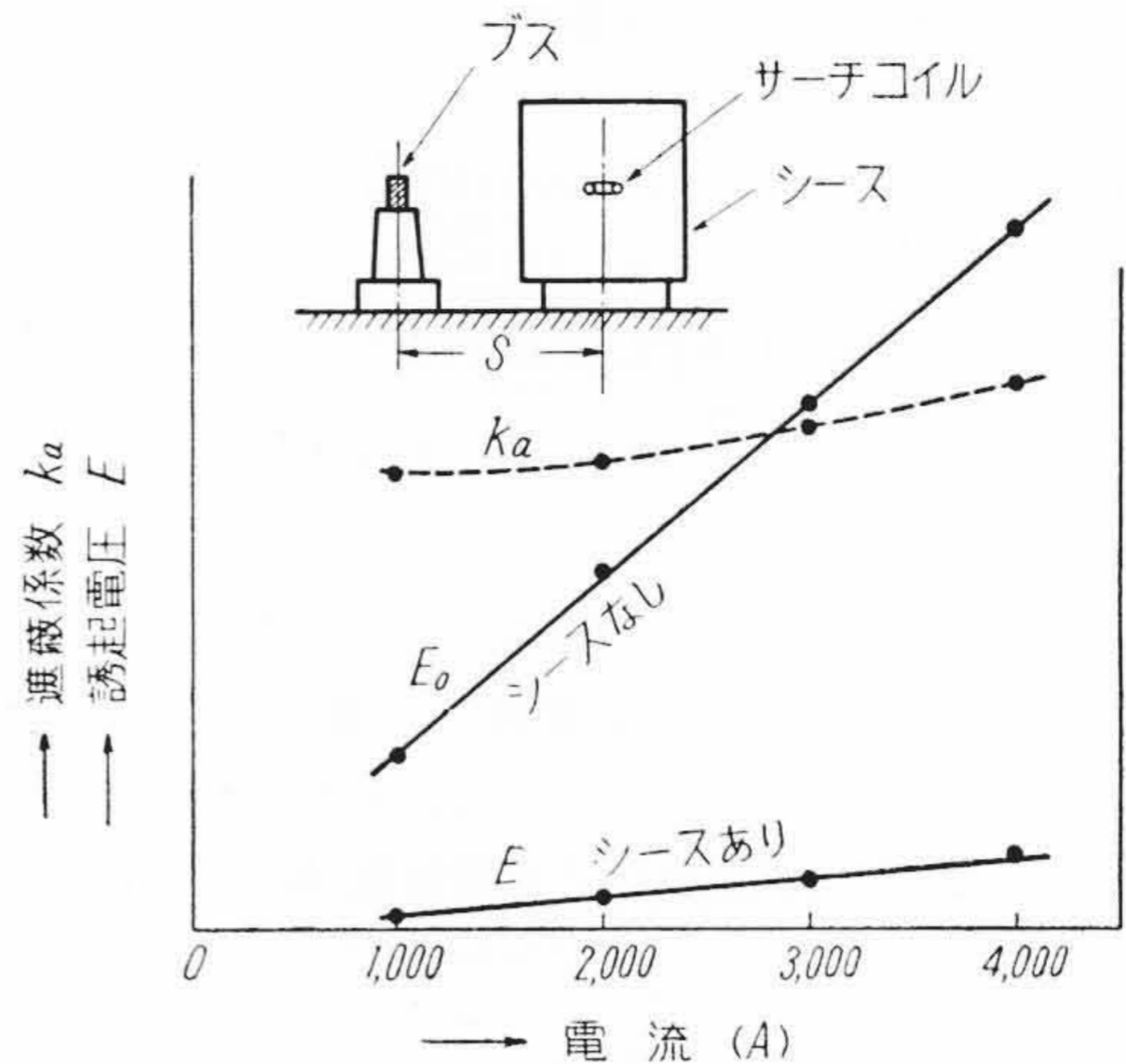
なお、チャンネルブス間の電磁力の式は厳密には複雑であるが、近似的には (4) あるいは (5) 式で十分である。

[V] 実験と結果

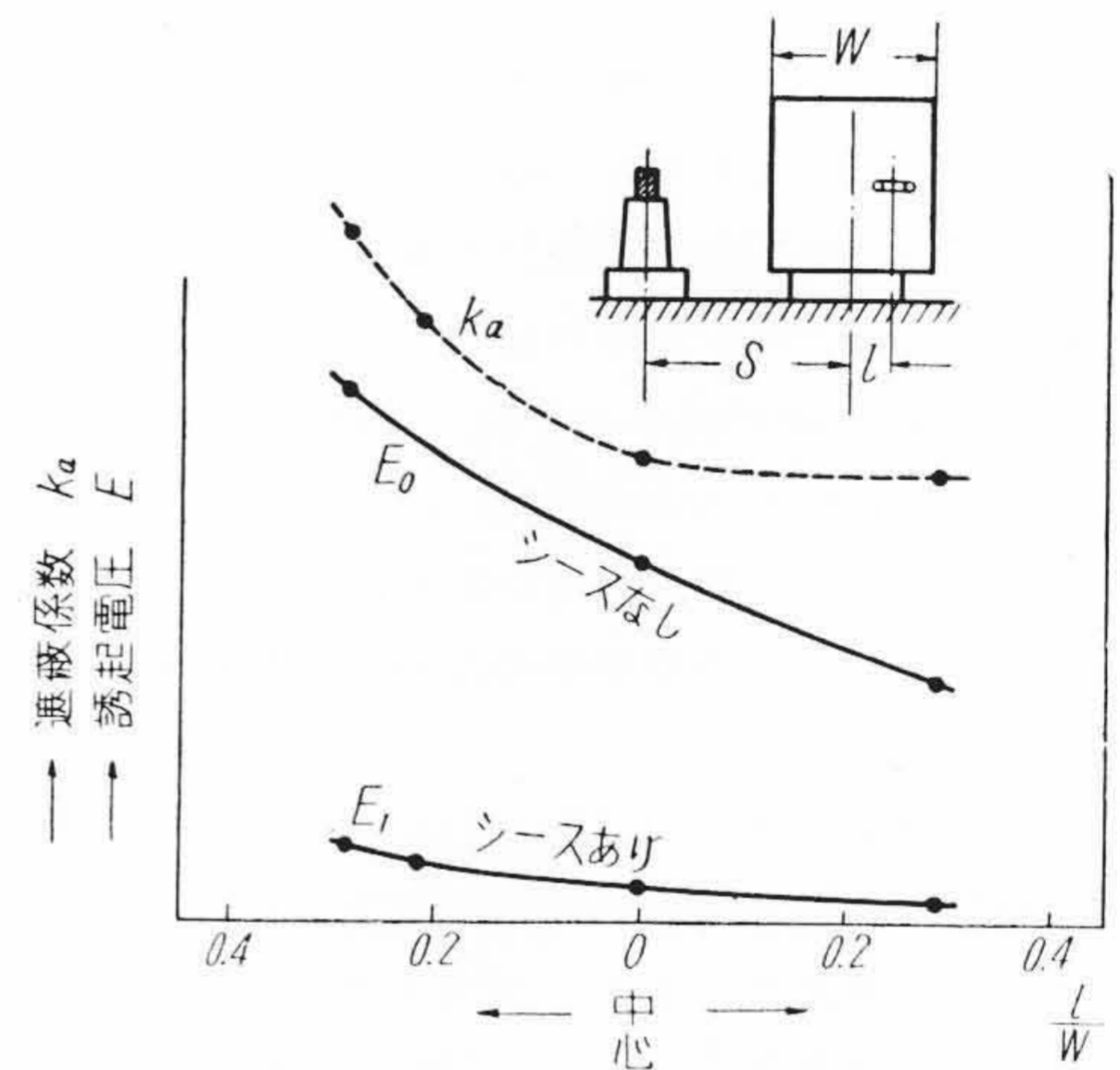
密閉母線の構造上の諸問題は前述の理論的考察によつてもある程度の解答は得られるが、実際の設計に当つては種々の条件が加わるために実験による裏付けを必要とする。ここでは主な実験について紹介する。

(1) 実験方法

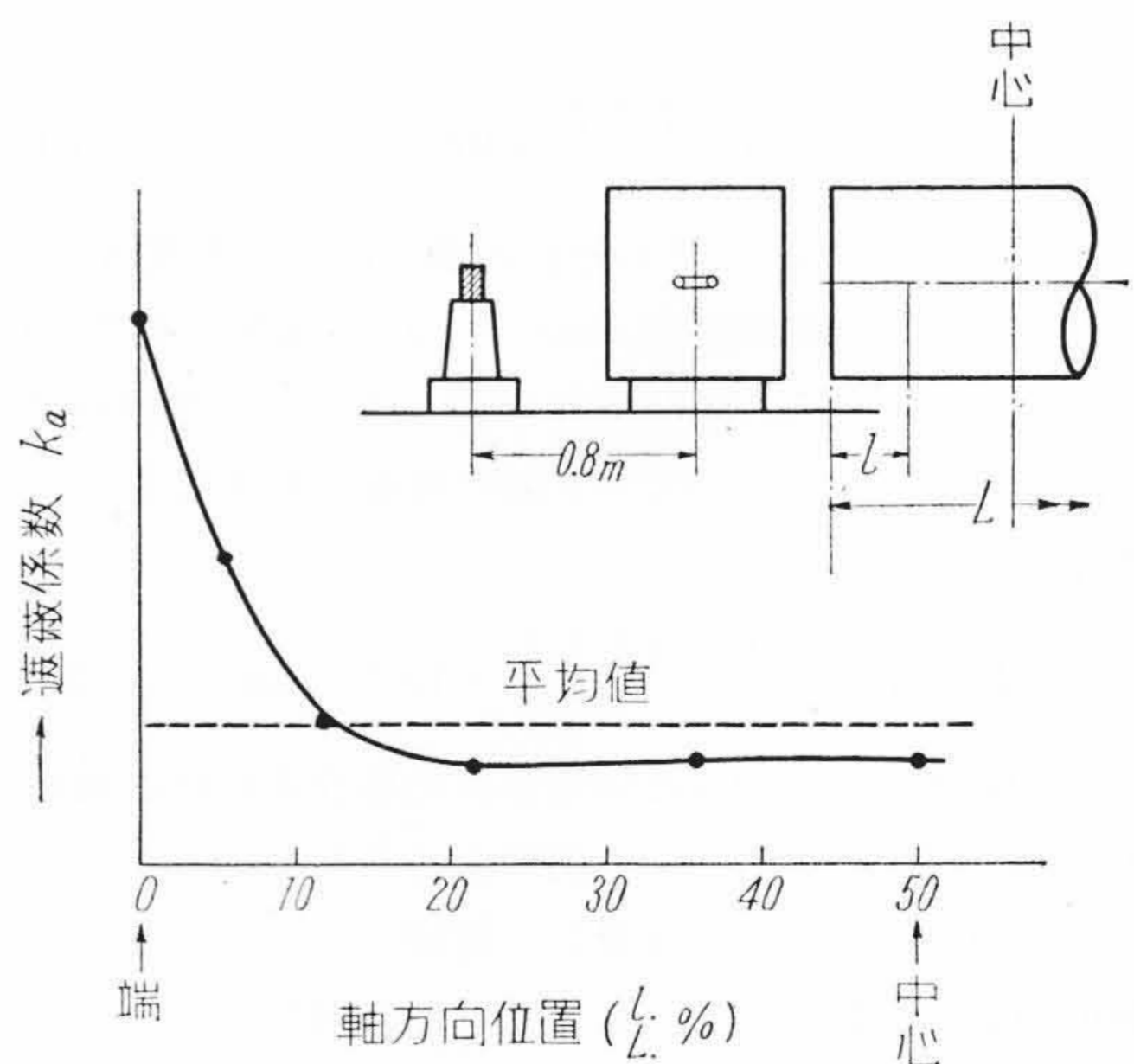
この実験のために特に密閉母線を1相分だけ試作し、その遮蔽効果と遮蔽作用の原因である渦電流について測定を行つた。まず遮蔽効果の測定は一定の電流を流した



第6図 ブス電流と遮蔽係数との関係



第7図 シース内部の横方向位置と遮蔽効果との関係



第8図 シース内部の軸方向位置と遮蔽係数との関係

ブスと矩形断面を有するシースとを一定距離へだてておき、シース内部で磁束によつてサーチコイルに誘起される電圧 E_1 と、同じ位置でシースがない場合の誘起電圧 E_0 との比 $\frac{E_1}{E_0}$ を測定し、これを遮蔽係数 k_a とした。したがつて、えられた結果は定常状態の場合である。

サーチコイルは細いエナメル銅線を長方形に巻いたもので、サーチコイルによつて磁界の乱れることはない。

渦電流の測定法は元来むずかしいものであるが、筆者らは比較的簡単な方法で行つた。まず一定の間隔をもつて固定した2本の針を有する簡単な装置を製作し、これをシースに当ててその2点間の微小電圧降下を増幅し測定した。シースは十分薄いので50 μ mでは表皮効果による影響が少いことから、厚さ方向の電流分布を一様と考え、電圧降下から電流を計算した。測定の際しばしば誘導電圧に悩まされたが、壁一つ隔てた隣室に測定器をおくことにより十分小さくすることができた。

(2) 実験結果

(A) 遮蔽効果

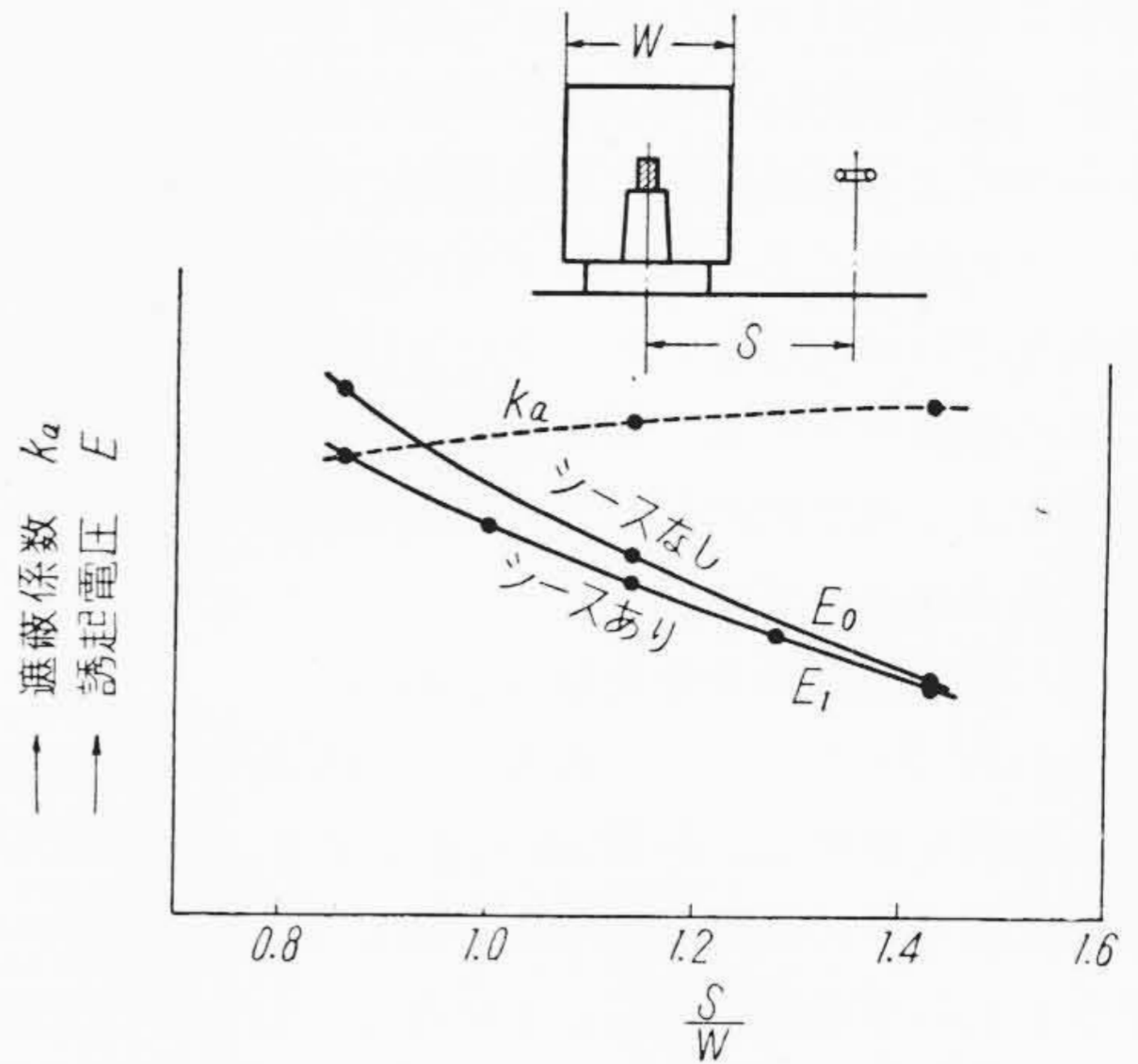
測定した結果の主なものを第6～9図に示す。

第6図はシースの中央においてブスに流れる電流と遮蔽係数との関係を示したもので、電流が増大するとともに遮蔽係数はわずかに増大しているが、ほぼ一定で約9～10%である。第7図および第8図は電流2,000Aの場合にシース内の位置により遮蔽効果の異なることを示したものである。

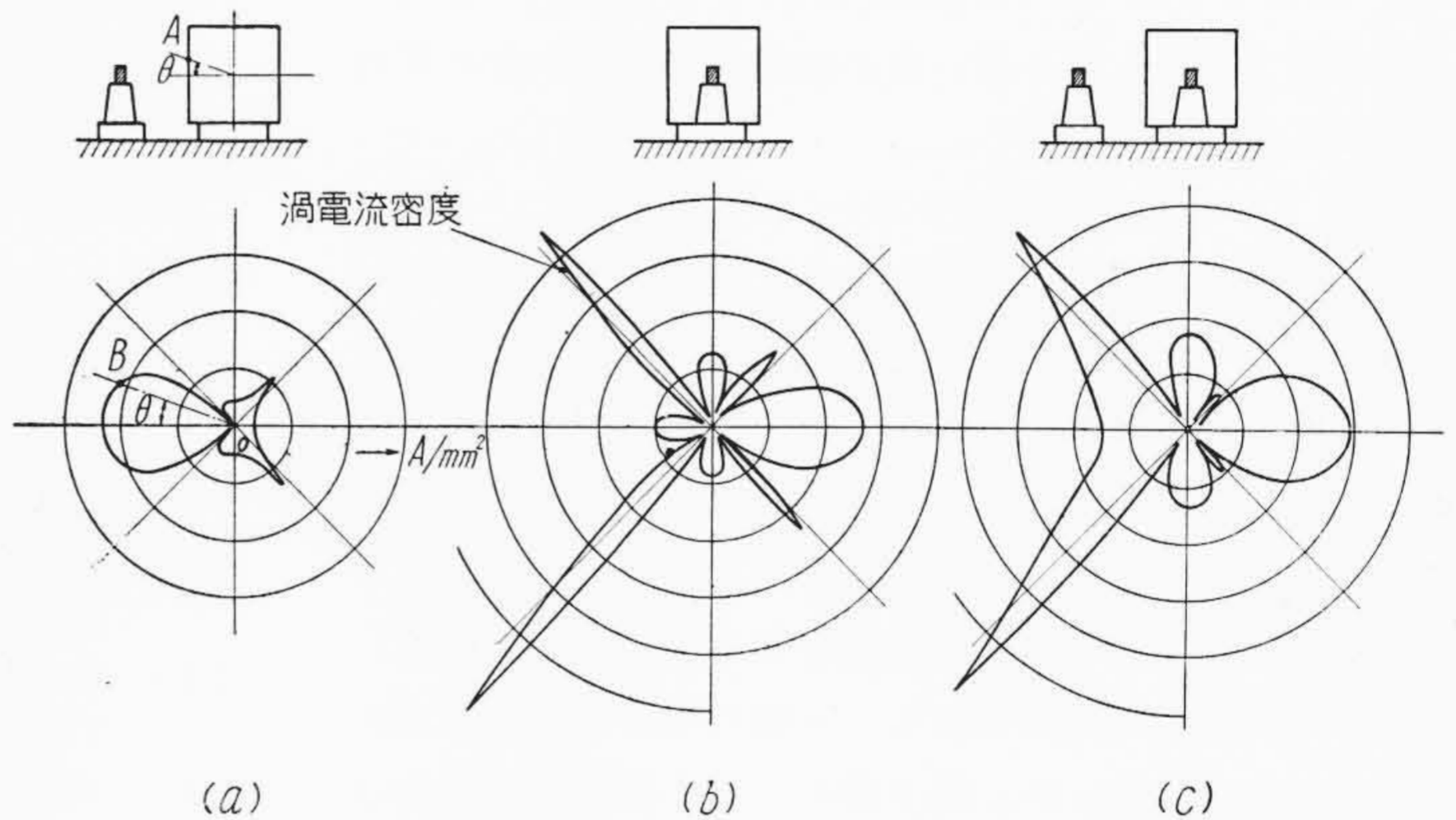
第7図はシース断面の中心から水平位置と遮蔽係数との関係を示し、遮蔽係数はブスに近づける程大きくなるが、逆に遠ざけてもわずかに減少するに過ぎない。第8図は軸方向の位置との関係を示したもので端の影響が顕著に現れている。第9図はブスがシースの内部にある場合、そのシースにより遮蔽作用があるかどうかを見るために測定した結果を示す。四角なシースでは磁束がシースと鎖交するためいくらか遮蔽作用があるが、シースからある程度離れるとほとんど遮蔽作用がないと見てよい。

(B) 渦電流分布

第10図は渦電流の分布状態を極座標形式で表わしたものである。たとえば第10図(a)のA点の渦電流は長さOBで表わされている。(a)は第6図の場合に相当し(b)は第9図の場合に相当する。これらを総合すると、(c)のごとくなる。水平面に対して対称分布であるが垂直面に対し非対称分布であるのは、隣接のブスおよび電源の位置の影響である。以上はブス電流2,000Aの場合であるが4,000Aに対しては各部の渦電流は約2倍であ



第9図 シースの外部に対する遮蔽係数



第10図 矩形シースの渦電流分布 (単相の場合)

つた。

(3) 考察

(A) 結果の検討

(2)式を用いて k_a を算出すると約7.5%となる(この計算は k_a は矩形の周囲長と同じ長さの円周を有するシースに等しいと仮定している)。測定結果ではシースの中央において約9%で計算値よりわずかに大きいと一致している。しかし端の影響を考慮すれば、値がさらに大きくなることは前に示した通りである。一方シースの温度が上昇すると、比抵抗の増加のために遮蔽効果は減少し、30°Cの温度上昇に対して約1割の減少となる。

第7図および第9図の二つの結果から総合した遮蔽係数を求めると、中央において約8.5%となる。シースのある場合の短絡電流による電磁力は(5)式で $k=0.085$ として、1m当り

$$F = 1.74 \times \frac{I_1 I_2}{S} \times 10^{-9} \quad (\text{kg})$$

となる。たとえば線間0.8mで短絡電流最大値が200kA

に対して電磁力はわずか 90kg に過ぎない。

(B) 遮蔽効果からみた密閉母線の設計

シースによる遮蔽作用は結局電磁力の大部分をブスからシースに移すことである。ブスは高電圧であるから絶縁されなければならないが、シースは接地されているのでこれに強度を与えることは比較的容易である。この遮蔽作用をより効果的にし、ブスの支持碍子を電磁力から保護する方法としては、

(i) 電磁遮蔽効果を大ならしめる。

すなわち Te を大ならしめる。このためには比抵抗の小さな材料を使用し、 $d \cdot W$ を大きくする。 $d \cdot W$ はシースの単位長当りの容積で使用量が同じであれば形状いかんにかかわらず効果も同じことになる。したがって強度的には厚さ d を大きく W をそれだけ小さくした方がよい。しかし、 d をあまり大きくすると表皮効果のために $d \cdot W$ は減少したことになり効果的でなくなる。またシースの長さはなるべく長い方が端効果の影響が少く平均した遮蔽効果は増大する。

(ii) ブスを零力線に近づけておく

密閉母線の持つインダクタンスは構造によつて異なつた値を持つが、あらかじめ各構造に対するインダクタンスを求めておけばブスの変位さるべき距離が決められる。たとえば单相の場合には前述の (7) 式を満足するような位置にブスを置けば、碍子に加わる力を完全に 0 にすることができる (この位置を零力線と呼んでいる)。しかも電流値に無関係である。三相の場合は完全に 0 にすることはできないが、第 5 図のごとく配置した場合は

前述のごとく両端の二相に働らく力は約 27% に減少させることができる。

(iii) ブスを弾性的に支持する。

ブスの機械的な固有振動数を電源周波数の 2 倍よりなるべく低くしておく、短絡電流による週期的ないし突発的な電磁力はブスの振動エネルギーとして吸収されてしまうから実際に支持物に加わる力は減少する。また前述の (ii) と同じく零力線に近づくので電磁力はさらに減少する。この際注意しなければならないことは、もしその固有振動数が電源周波数の $2n$ 倍になつていて共振を起し、暫時の後にきわめて大きい力となるおそれがある。

[VI] 結 言

近時発電機、変圧器の単位容量はますます増大の傾向にある。したがって母線の電流、および短絡容量も一層大となり、またその重要性からも安全度の高い密閉母線がますます多く採用されるものと信ずる。本編の記述がこれからの発電電所を計画される方々の御参考なれば幸である。

参 考 文 献

- (1) L. V. King: Phil, Mag., 15, 201 (1933)
- (2) W. P. Wilson, L. L. Mankoff: TAIEE, 73, III 382 (1954)
- (3) C. M. Siegel, T. J. Higgins TAIEE, 72, I 522 (1953)
- (4) 高砂: 昭 31 電気三学会連大 444 (昭 31-4)



新 案 の 紹 介



実用新案第 413315 号

合 田 勇

過 電 流 保 護 継 電 器

この考案は電気車主回路の過負荷電流に反応して、主回路の断流器を遮断する保護継電器の改良に係るもので、図面に示すように過電流継電器 OLR に電流線輪 5 のほかに鎖錠線輪 6 を設け、電流線輪 5 に過大電流が流れ接点 a を開いて断流器 L の動作線輪 L' を消勢し、断流器 L を遮断した場合、保護継電器 OLR の接点 b を閉じ、鎖錠線輪 6 を附勢して OLR を動作位置に鎖錠しようとしたことを特長とするものである。OLR のリセットはリセットスイッチ 8 を開いて鎖錠線輪 6 の回路を開き、バネ 7 の張力により接点 a を閉じ、接点 b を開いて行うものである。

この考案によれば、保護継電器 OLR の動作は確実となり、従来ややもすれば引きおこされた断流器のばたつき現象を絶無ならしめ得るの効果がある。(滑川)

