

始



電機學校教科書
(新編電氣測定)

1—220

東京神田
電機學校
附屬
校人

433
72

特215
752



第一章 電気単位及び標準器

1. 緒言	1
2. 電気単位	2
3. 標準器	6
4. 抵抗及び電流の原器	7
5. 抵抗及び電圧の副原器	9

第二章 検流計

1. 検流計の種類	12
2. 可動磁針型検流計	13
3. 可動線輪型検流計	17
4. 検流計可動部分の運動	19
5. 反照検流計の振れの観測法	23
6. 検流計の感度	24
7. 検流計定数	26
8. 分流器	27
9. 携帯用指針検流計	32
10. 光針検流計	33

第三章 抵抗の測定

(I) 中位抵抗の測定

1. ホイートストン・ブリッジの原理	35
--------------------	----



2. 摺線ブリッジ	37
3. 枠型ブリッジ	39
4. ホイートストン・ブリッジの実際使用法	43
5. 検流計の抵抗測定法〔ケルヴィン法〕	44
6. 電圧降下法	45

〔II〕 低抵抗の測定

7. 低抵抗測定の要件	47
8. ケルヴィン・ダブル・ブリッジ	47
9. ケルヴィン・ダブル・ブリッジの実際	49

〔III〕 高抵抗の測定

10. 直偏法	52
11. 電線又は電線の絶縁抵抗測定	54
12. メガー	58
13. シルヴァータウン携帯試験器	61
14. 電圧計に依る高抵抗測定法	63
15. 可動線輪型抵抗計	64

〔IV〕 特殊抵抗の測定

16. 電解液の抵抗測定	66
17. 接地抵抗の測定	71
18. 電池内部抵抗の測定	77

第四章 電 位 差 計

1. 電位差計の原理	83
2. 電位差計の実際	84
3. 電位差計の應用	88

第五章 電 壓 及 び 電 流 測 定 器

1. 電氣計器の種類	95
2. 指示計器の要素	96
3. 電圧計と電流計	100

〔I〕 直 流 用 計 器

4. 可動線輪型計器	101
------------	-----

〔II〕 直 流 及 び 交 流 兩 用 計 器

5. 電流計型計器	108
6. 可動線片型計器	114
7. 熱型計器	117
8. 静電型計器	122

〔III〕 交 流 用 計 器

9. 誘導型計器	128
10. 整流型計器	133
11. 計器用変成器	135

第六章 電 力 の 測 定

1. 電圧計及び電流計による直流電力の測定	139
2. 単相交流電力〔附三電圧計法及び三電流計法〕	140
3. 指示電力計構成の原理	143
4. 指示電力計の接続法	146
5. 電力計の較正試験	149
6. 電流計型電力計の特性	150
7. 誘導型電力計	153
8. 多相電力の測定法	155

9. 三相三線式回路の電力測定	156
10. ブロンデル氏定理	159
11. 二電力計法に依る平衡三相電力測定	162
12. 一相の電力を測定して平衡三相電力を求むる法	166
13. 三相電力計	167
14. 高電圧回路の電力測定	168
15. 無効電力の測定	169

第七章 種々の電気測定器

1. 種々の電気測定器	174
2. 力率計	174
3. 周波計	179
4. 同期検定器	183
5. 静電検漏器	189
6. 自記計器	192

第八章 電力量の測定 附 電量の測定

1. 積算計器	196
2. 積算電力計構成概念	196
3. 直流用整流子電動機型積算電力計	199
4. 交流用誘導型積算電力計	203
5. 三相用積算電力計	208
6. 積算電力計の試験装置	209
7. 積算電力計の計器常数	211
8. 積算電力計の誤差の試験法	212
9. 積算電力計の誤差の計算	214
10. 積算電流計	217

— 終 —

電 氣 測 定

電 機 學 校 編

第一章 電気単位及び標準器

1. 緒言 長さとか時間とか其他有形無形の如何に拘らず、凡てものゝ在り高を量 (quantity) と稱する。或る種類の量の大小は、それと同種類の一定量を標準とし、此の標準量に對する其の量の比を以つて表はされる。此の比を表はす數を數値 (numeric) 又は測數と稱し、標準とされた量を其の種類の量の單位 (unit) と稱する。即ち量は數値と單位とで表はされる。而して或る量が幾何單位を有するかを決定する事を其の量の測定 (measurement) と稱する。

量の測定法には、直接に測定器を用ひて其の量を測る直接法 (direct method) と間接に、被測量 (即ち測定さるべき量) と一定の関係ある他の諸量を求めて計算で被測量を求める間接法 (indirect method) とがある。尙ほ被測量と同種類の量とを釣合はせて被測量を求める平衡法 (balance method) は、使用する測定器を零位に保たしめるので此の方法を零位法 (zero method) とも稱する。

電気測定では、電氣の諸量例へば、電氣抵抗、電壓、電流、電力、電力

量等を測定する方法と之れ等に要する測定器とに就いて説明する。

本章では電気の単位と之れを現はす標準器とに就いて概略を説明しよう。

2. 電気単位 物理学上の凡ての単位は長さ、質量及び時間の単位所謂基本単位を基として組立てる。基本の三単位を組合せて得られる他の単位を組立単位と云つて居る。而して長さの単位にセンチメートル (centimetre), 質量の単位にグラム (gram), 時間の単位に秒 (second) を用ひて表はした組立単位を **C. G. S. 単位 (C. G. S. unit)** と稱する事は既に諸君が物理学で學んだ通りである。

電気の単位で、主として學術上に用ひらるゝ **C. G. S. 単位** の組立て方に二つの方法があつて、一つは電磁氣理論に基づく **C. G. S. 電磁單位 (C. G. S. electromagnetic units)** で、他の一つは靜電氣學理論に基づく **C. G. S. 靜電單位 (C. G. S. electrostatic units)** である。此の兩單位系に於ける電氣諸量の單位の定義は茲に之れを省くが、電磁單位と靜電單位との間には、 3×10^{10} 倍又はその自乗又は之れ等の逆數の關係がある。之れは電磁單位では導磁率 (permeability) があり、靜電單位では誘電率 (dielectric constant) がある爲に斯様に相違があるのである。此の兩單位の中で主として使用されるのは電磁單位である。

C. G. S. 電磁單位 は實用上小さ過ぎたり又は大き過ぎたりする爲に、**C. G. S. 電磁單位** の倍數又は分數を以つて單位とする單位がある。之れを實用單位 (practical unit) と稱する(註)。實用單位と電磁單位及び靜電單位との間には次の第 1-1 表の如き關係がある。

第 1-1 表中、電力及び電力量の實用單位ワット及びジュールは、電磁

第 1-1 表

量	實用單位	電磁單位の倍數	靜電單位の倍數
抵 抗	オーム	10^9	$\frac{1}{9 \times 10^{11}}$
電 壓	ヴォルト	10^8	$\frac{1}{300}$
電 流	アムペア	10^{-1}	3×10^9
電 量	クーロム	10^{-1}	3×10^9
容 量	ファラッド	10^{-9}	9×10^{11}
インダクタンス	ヘンリー	10^9	$\frac{1}{9 \times 10^{11}}$
電 力	ワット	10^7	
電 力 量	ジュール	10^7	

單位と靜電單位との間に何等の相違が無い。之れは物理学に於けると同一で、ジュールは 10^7 エルグの仕事であり、ワットは毎秒 10^7 エルグ即ち毎秒 1 ジュールの仕事を爲す能力があるからである。ジュールをワット秒 (watt-second) とも云ふ。

實用單位は此の様に定められたものであるが、さて之れを具體的に現はす事が必要になつて来る。その爲に 1908 年 10 月英國ロンドンで世界 25 箇國の委員から成る萬國會議が擧開かれ、電氣測定上及び法律制定上の基とする目的で、電氣の四つの基本單位即ち國際オーム (international ohm), 國際アムペア (international ampere), 國際ヴォルト (international volt), 國際ワット (international watt) が決定された。之れ等を國際單位 (international unit) と稱する。本邦からは淺野應輔、近藤茂の兩博士が此の會議に列席された結果、此の決議に基いて、明治四十三年三月電氣測定法と稱する法律が發布せられ、我國に於ける電氣測定の單位が定まつた。此の法律に定めてあるオーム、アムペア、ヴォルト及びワットの定義は次の通

りである。

(イ)電氣抵抗の單位(オーム) オームは氷の融解溫度に於て質量 14.4521 グラム、長さ 106.300 センチメートルにして、均一なる切斷面積を有する水銀柱の不變電流に對する電氣抵抗を謂ふ。

(ロ)電流の單位(アムペア) アムペアは硝酸銀の水溶液を通過し毎秒 0.00111800 グラムの銀を分離する不變電流を謂ふ。

(ハ)電壓の單位(ヴォルト) ヴォルトは1オームの電氣抵抗を有する導體に1アムペアの不變電流を發生せしむる爲め要する不變電壓を謂ふ。

(ニ)電力の單位(ワット) ワットは1ヴォルトの電壓に於て1アムペアの不變電流に依り毎秒費さるゝ電氣勢力を以つて表示する電力を謂ふ。

電氣單位の倍數及び分數の名稱、不變電流以外の場合即ち交流の場合の電流、電壓及び電力の計算法並に以上に掲げた以外の電氣單位に就いては、逡信省令で定められて居る。之れ等を摘記すると次の様である。

電氣單位の倍數及び分數の名稱は電氣單位の名稱の前にメガ、キロ、ミリ、マイクロ等の語を附け加へて其の倍數又は分數を表はす。

メガ (meg)	百萬倍
キロ (kilo)	千倍
ミリ (milli)	千分の一
マイクロ (micro)	百萬分の一

交流の場合の電流、電壓及び電力の計算法は次の通りである。

(イ) 不變電流以外の場合に於ける實効電流の不變電流及び實効電壓の不變電壓に對する等價は其の瞬時値の自乗の平均の平方根を以つて定む。

(ロ) 不變電流1アムペアに相當する實効電流を1實効アムペアと稱し。

不變電壓1ヴォルトに相當する實効電壓を1實効ヴォルトと稱す。

(ハ) 電力は其の瞬時値の平均を以つて定む。

又前に掲げた以外の電氣單位は次の様である。

(イ)電量の單位(クーロム) クーロムは1アムペアの不變電流に依り1秒間に輸送さるゝ電量を謂ふ。

(ロ)電氣容量の單位(ファラッド) ファラッドは1クーロムの電量に依り1ヴォルトの電位差に充電さるゝ蓄電器の電氣容量を謂ふ。

(ハ)電氣誘導の單位(ヘンリー) ヘンリーは毎秒1アムペアの割合を以つて變化する電流により1ヴォルトの電壓を發生する電路の電氣誘導を謂ふ。

(ニ)電氣仕事の單位(ジュール) ジュールは1アムペアの不變電流が1オームの電氣抵抗を有する導體を通過するとき1秒間に爲す仕事を謂ふ。

1908年ロンドンに於て國際單位を決定するに際しては、基本となる抵抗及び電流の單位即ち1オームを表はす水銀柱の長さ、及び1アムペアを表はす銀の電氣化學當量は夫々當時に於て 106.3 極、0.001118 瓦/クーロムなるに拘らず特に上記の常數に零を二個宛付けて 106.300 極、0.00111800 瓦/クーロムとした。其の理由は國際單位を絕對單位の近似値とせず全く獨立した單位系とし、將來測定技術の進歩に伴つて起る混亂を未然に防ぐ爲である。

電氣單位の問題は從來萬國電氣會議で議せられて來たが、大正9年佛國のセブルで開かれた國際度量衡總會議で、將來電氣單位の問題は同度量衡會議で議せらるべき事を決したのである。最近では絕對單位を採用しようとする様な傾向となつて來た。

註 實用單位を國際單位に對立して絕對單位 (absolute unit) と稱する事があるが、之れは C. G. S. 電磁單位から導かれた實用單位と云ふ意味で絕對 (absolute) と云ふ文字を使用してある。之れを C. G. S. 電磁單位と混同しない様注意すべきである。即ち茲で絕對單位と云ふのは、絕對實用單位とでも呼ぶべき意味に解せばよい。例へば、從來電流の C. G. S. 電磁單位を無名數で呼ぶ代りに判り易い爲に abampere と屢々使用されて來た。國際單位で電流の單位 international ampere と混同しないために實用單位即ち絕對單位では電流の單位を absolute ampere と呼んで居る。從來の C. G. S. 電磁單位に屢々使用された abamp. と實用單位の absolute ampere と混同しない様注意すべきである。要するに實用單位と絕對單位と同一のものに二つの名稱を使用したのは、前者は C. G. S. 電磁單位と區別する名稱で、後者は國際單位と區別する爲の名稱と心得置けばよい。

3. 標準器

法律で定めた抵抗のオーム、電流のアムペアを示す標準器を何れも原器 (primary standards) と稱する。我國では逓信省電氣試験所に原器が保管されてある。

然し原器は測定上極めて精密な注意を要し、其の取扱ひも簡單でないから、實用上は原器と比較測定して値を定めた便利な標準器が必要となつて來る。斯の様な標準器を副原器 (secondary standards) と稱する。副原器には抵抗及び電壓を表はす標準器がある。

原器は時と處との如何に拘らず常に同じ値を表はすものでなければならぬ。且つ複製し得る事が第一要件である。副原器の方は相當永い間その値が不變で、溫度や濕度等の影響が極めて小さければ宜しいのである。次に原器と副原器との概略を説明しよう。

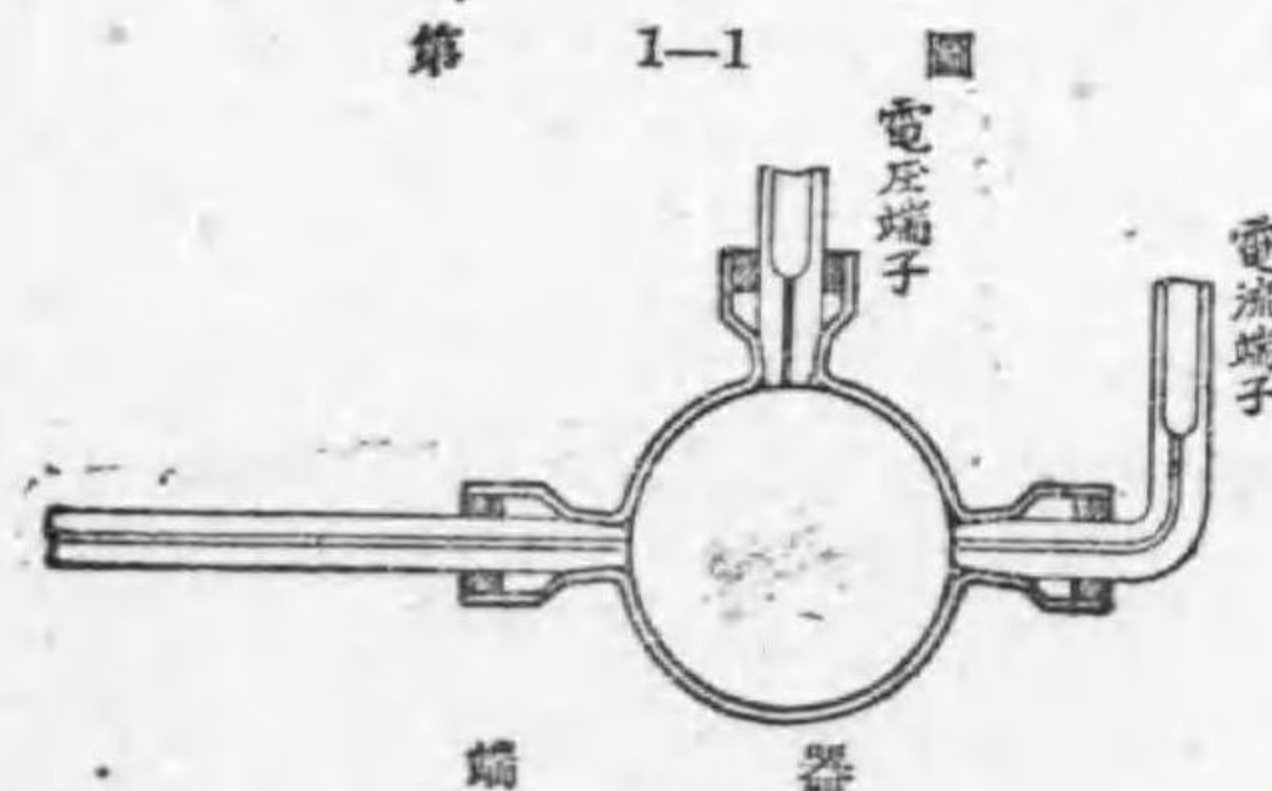
4. 抵抗及び電流の原器

(イ)電氣抵抗原器 オームを表はす水銀柱を作るには、永い間寸法が變らない品質優良な硝子管中に純粹な水銀を充すのである。我國の原器にはエナ硝子管が用ひられて居る。水銀抵抗原器は實際に於ては、氷の融解溫度に於て丁度長さ 106.300 ㎠、質量 14.4521 グラムある水銀柱を作る事は困難であるから、硝子管の切斷面積約 1 平方㎠、管孔が成る可く一樣なものをを選び、略 1 オームとなる様な長さに切つて之れで水銀柱を作る。此の水銀柱の抵抗は管の長さ、管に充たした水銀の質量、管孔の太さの不同の度等を測定して次式で計算される。

$$R = \mu \frac{14.4521}{(106.3)^2} \times \frac{L^2}{M} \text{ オーム } \dots\dots\dots(1-1)$$

茲に R は國際單位のオームで表はした此の水銀柱の抵抗、 L は水銀柱の長さ (㎠)、 M は水銀の質量 (瓦)、 μ は管孔の太さの不同に依る更正係數である。

此の原器を用ひて副原器の値を定める場合には、電流端子、電壓端子が必要であるから、水銀柱の兩端に端器 (end vessel) と稱するものを取付



ける。第 1-1 圖は水銀柱の一端に取付けられた一つの端器を示すものである。電流端子は電流を水銀柱に導く爲のもので、此の水銀抵抗原器の抵抗としては兩

端の電圧端子間の抵抗を標準とするのである。従つて此の原器の抵抗としては、(1-1) 式の値に、此の端器を用ふるが爲に、次式に示す更正 A を加へる必要がある。

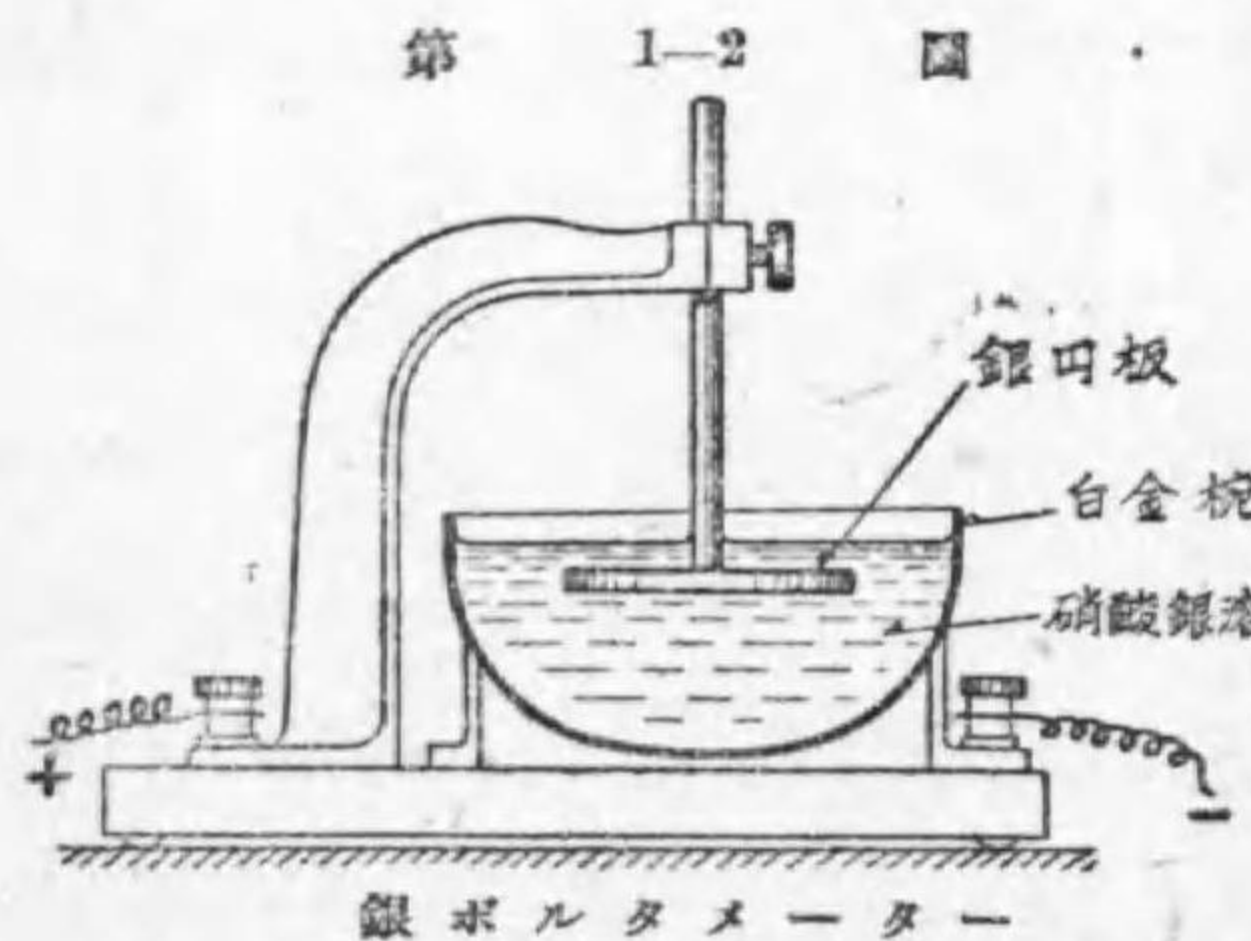
$$A = \frac{0.8}{1063\pi} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \text{ オーム} \dots\dots(1-2)$$

式中 r_1 及び r_2 は管の両端に於ける孔の半径を毫で表はした値である。即ち水銀抵抗原器の抵抗は $R+A$ である。

此の様な水銀抵抗原器 5 本以上を備へて、各管に依つて定めらるゝ値の平均値を以つて電気抵抗の単位を定める事になつて居る。

水銀抵抗原器を用ひて、抵抗副原器の値を比較する時には、各の水銀抵抗原器に就き三回以上測定し、各測定毎に新に水銀を充して行ふ事になつて居る。

(ロ)電流原器 第 1-2 圖は電流原器たる銀ボルタメーター (silver



voltameter) で、これは銀の電気分解作用を應用したものである。硝酸銀の溶液を充した白金椀内に、銀の圓板を懸垂したものである。銀圓板をアノードとし、白金椀をカソードとして電流

を通すると、電気分解作用で、硝酸銀溶液中の銀が白金椀に沈澱する。此の分離した銀の量は通過した電量に比例するから、ボルタメーターに不變電流を 1 秒間通じた時、電流を通する以前に w_1 瓦であつた白金椀の重量

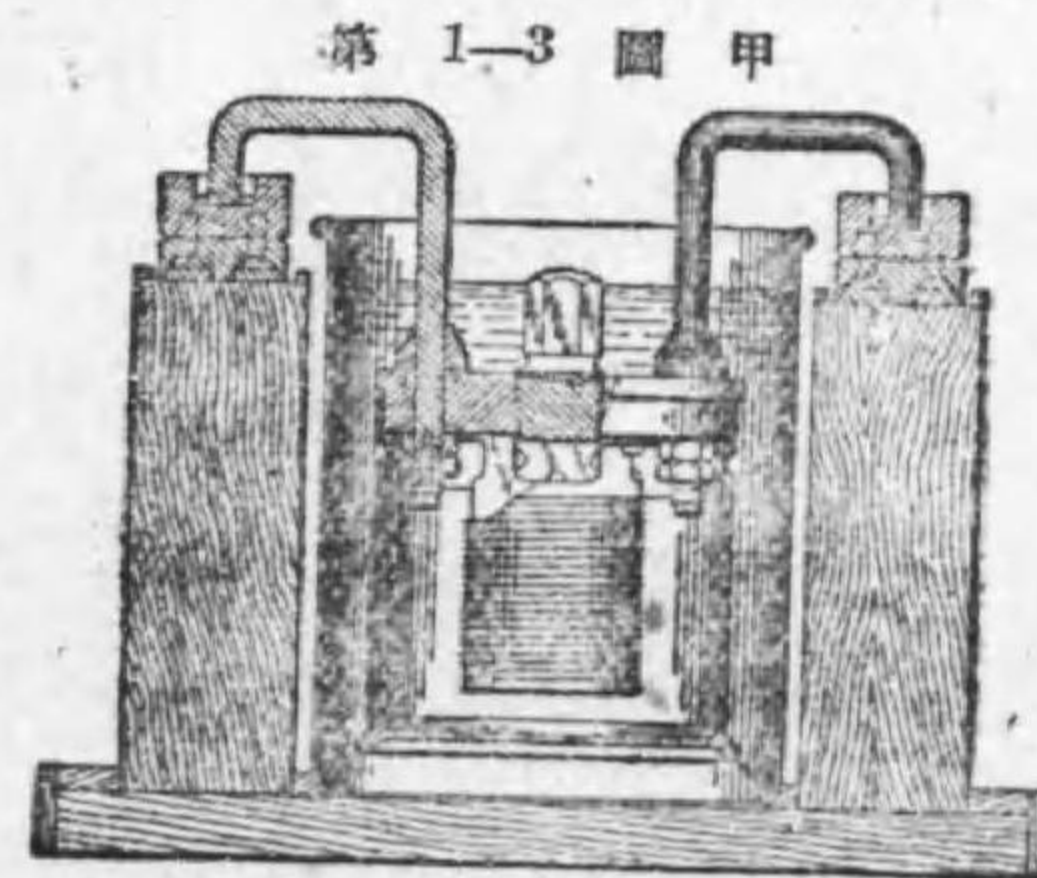
が w_2 瓦に増加したとすれば、通過電流 I は次式で表はされる。

$$I = \frac{w_2 - w_1}{0.001118 t} \text{ アムペア}$$

溶液は重量の割合に於て蒸溜水 100 に對し硝酸銀 15 乃至 20 を溶解せるもので、100 立方糎以上を用ひ、其の使用は一回に限り、且つ銀の分離量を百分の三十以上に達する事がない様にする。測定の場合は、電流密度はアノードで $\frac{1}{5}$ アムペア/平方糎 以下、カソードで $\frac{1}{50}$ アムペア/平方糎 以下とする。尙ほアノードから機械的に脱落した銀がカソードに達する事のない様に、硝子皿で銀圓板の下部を包むとか、又は素焼筒でアノードとカソードとを隔離する方法を用ひる事になつて居る。

5. 抵抗及び電壓の副原器

(イ)電気抵抗副原器 抵抗副原器に用ひらるゝ抵抗體はマンガニンと稱する銅 84, マンガン 12, ニッケル 4 の割合で出來た合金である。此のマンガニンは固有抵抗が比較的大で、溫度係数が極めて小さく、銅に對する熱起電力が小で、且つ其の固有抵抗が歳月と共に殆んど變らないから、抵抗副原器用の抵抗體として最も適當である。第 1-3 圖甲は獨逸理工實驗所

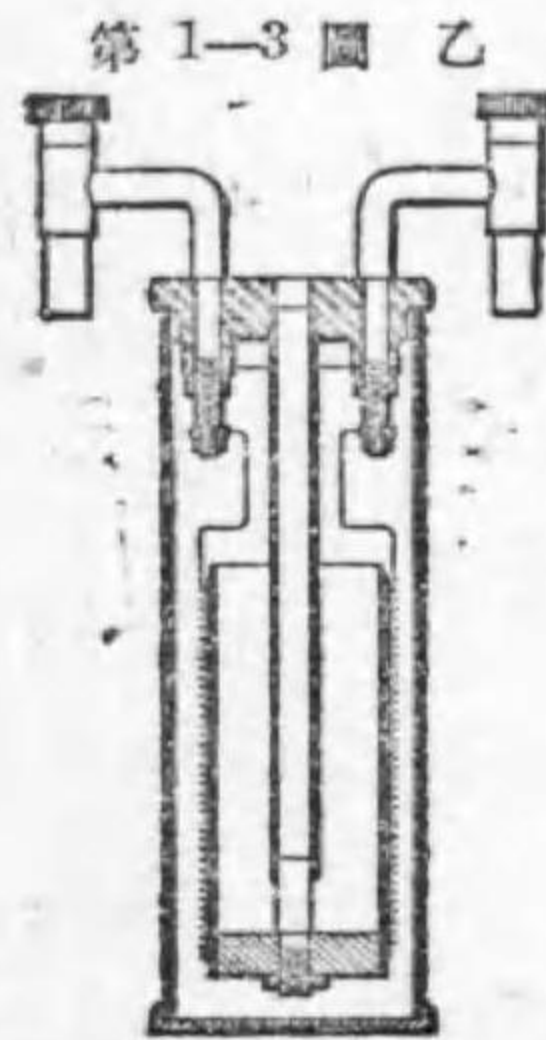


獨逸理工實驗所型抵抗副原器

型の抵抗副原器を示すものであつて、二重又は三重絹巻マンガニン線を眞鍮製の枠 (bobbin) に往復二本列べて巻き無誘導巻きとし、其の兩端は銀鍍で銅棒の端子に鑲着する。マンガニン線の上には融かしたシュラックを塗つて、圓筒に固着させると共

にマンガン線の酸化を防いで居る。乾燥爐の中で140°Cの温度に10時間位熱し、シラックの絶縁を完全にし、固有抵抗が變らない様にし、更に之れを金屬製外函内に藏めて内部の線輪を保護してある。

此の抵抗器を使用するには、パラフィン油槽中に入れて用ひ、其の銅棒の端子は水銀コップに入れ、此の水銀によつて電流を導く。油は外函の穴を通つてマンガン線に觸れて温度の昇るのを防ぐ。又油槽内の温度を一定に保つために小電動機で攪拌機を廻し油を攪き廻はすのである。



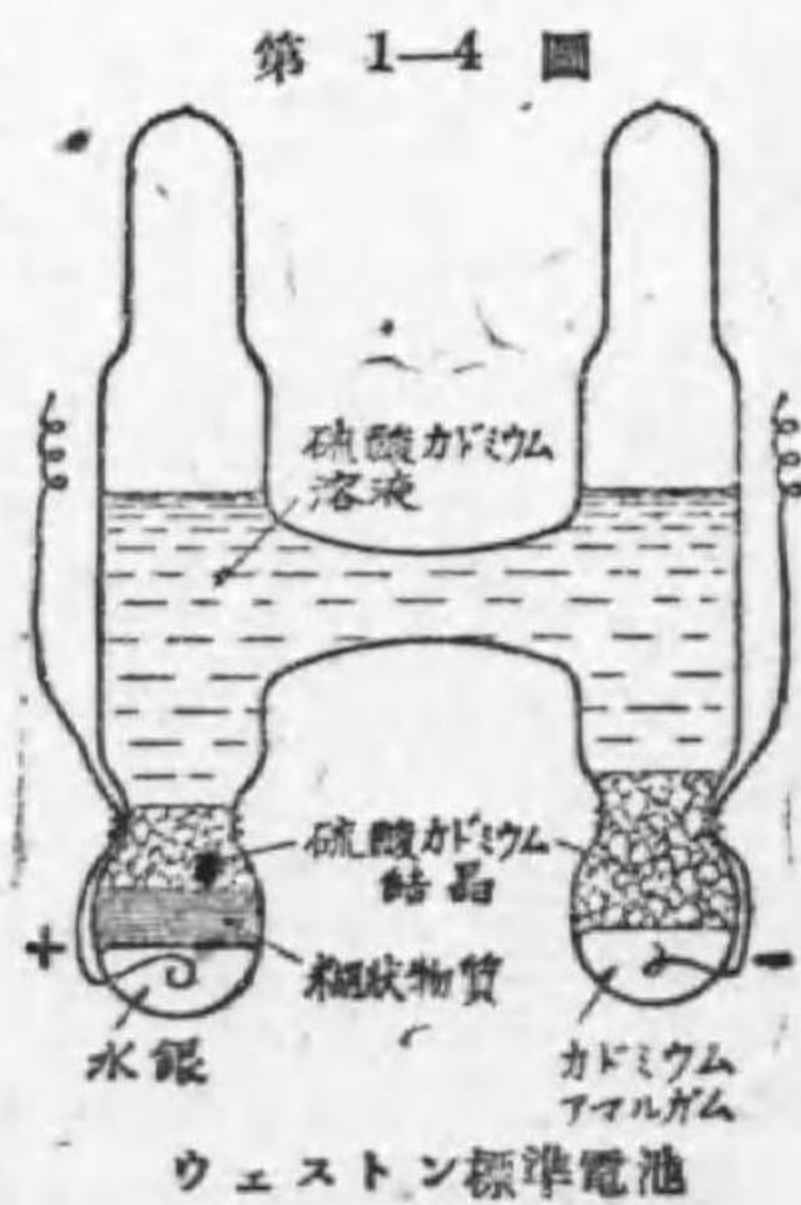
第1-3圖乙は米國標準局型と稱するマンガン標準抵抗器であつて、獨逸理工實驗所型について述べた様に、マンガン線の酸化を防ぐ爲に塗つたシラックは湿氣を吸収して膨脹し、線輪の抵抗を變化せしめるから、圖の様にマンガン線全部を油を充たした外函内に密封したものである。

1オーム以上の副原器はマンガン線で作られるが、

1オーム以下の抵抗器で特に大電流を通ずるものはマンガニンの板又は鑄物を用ひ、之れを油を充たした外函内に藏める。而して温度上昇を少くするために冷却管を備へて、之れに冷水を循環せしむる様にしてある。

(ロ)電壓副原器 電壓の副原器としてはウエスタン標準電池 (Weston normal cell) を用ひる。之れを一名カドミウム電池 (cad-

mium cell) とも稱する。第1-4圖はウエスタン標準電池を示すものである。H型硝子管の一方に陽極として水銀を入れ、他の方には陰極としてカドミウム・アマルガムを入れ、電解液として硫酸カドミウムの飽和溶液を用ひる。成極作用を防ぐために水銀の上部に硫酸第一水銀と硫酸カドミウム結晶の粉末を、硫酸カドミウムの飽和溶液で練り合はせた糊状物質を置いてある。又カドミウム・アマルガムの上部及び糊状物質の上部に硫酸カドミウム結晶を加へて置いて、温度が變化しても常に硫酸カドミウムの溶液を飽和状態になる様にしてある。



mium cell) とも稱する。第1-4圖はウエスタン標準電池を示すものである。H型硝子管の一方に陽極として水銀を入れ、他の方には陰極としてカドミウム・アマルガムを入れ、電解液として硫酸カドミウムの飽和溶液を用ひる。成極作用を防ぐために水銀の上部に硫酸第一水銀と硫酸カドミウム結晶の粉末を、硫酸カドミウムの飽和溶液で練り合はせた糊状物質を置いてある。又カドミウム・アマルガムの上部及び糊状物質の上部に硫酸カドミウム結晶を加へて置いて、温度が變化しても常に硫酸カドミウムの溶液を飽和状態になる様にしてある。

ウエスタン標準電池の起電力は、銀ボルタメーターと標準抵抗器とを用ひて其の値を決める。此の電池は一定の仕様書に依つて作れば攝氏20度で1.0183ヴォルトの起電力を有するものである。従つてウエスタン標準電池は副原器ではあるが、複製し得ると云ふ原器の性質を有して居る。ウエスタン標準電池の攝氏t度に於ける起電力 E_t は次式で表はされる。

$$E_t = 1.0183 - 0.0000406(t-20) - 0.00000095(t-20)^2 + 0.00000001(t-20)^3 \text{ ヴォルト}$$

問 題

1. 國際オームの定義を述べよ。
2. 國際アムペアの定義を述べよ。
3. マンガンが抵抗副原器の抵抗材料として適當なる理由四項を列記せよ。
4. ウエスタン標準電池の構造の大要を述べ、且つ其の起電力を附記せよ。

(選 試)

第二章 檢 流 計

1. 檢流計の種類 檢流計 (galvanometer) とは微小な

電流 (マイクロアムペア以下の電流) を検する測定器で、電流と磁石との間に働く力を利用して作られたるものである。

檢流計は其の構造上から二種類に分ける事が出来る。即ち、固定された線輪の中央に、小磁針を動く事の出来る様に吊したものと、固定された永久磁石の極の間に、動く事の出来る軽い線輪を懸垂したるものとの二種類がある。前者を可動磁針型 (moving needle type)、後者を可動線輪型 (moving coil type) と稱する。

檢流計では、線輪に電流が通ると、可動磁針又は可動線輪が或る角度だけ傾斜する。此の傾斜角を檢流計の振れ (deflection) と稱する。線輪に通ずる電流が大なる程此の振れも大となる。此の電流と振れとは一定の関係があるから、檢流計の振れを求めると電流を測定する事が出来る。檢流計の振れを觀測するに二種の方法がある。即ち、可動部分に小さな鏡を取付けて之れに光を當て、目盛した尺度上に反射させ、此の尺度上の光點の移動から振れを觀測する方法と、可動部分に指針を取付け、目盛盤上で振れを指示させる方法とである。前者を反照檢流計 (mirror galvanometer) と云ひ、後者を指針檢流計 (pointer galvanometer) と稱する。

上述の檢流計は電磁力を利用したものであるが、同じ原理を利用し、可動部分を重くして慣性能率を大にした檢流計がある。これは電流の代りに、極めて短時間に線輪を通過した電量を測定するに用ひられる。之れを弾動

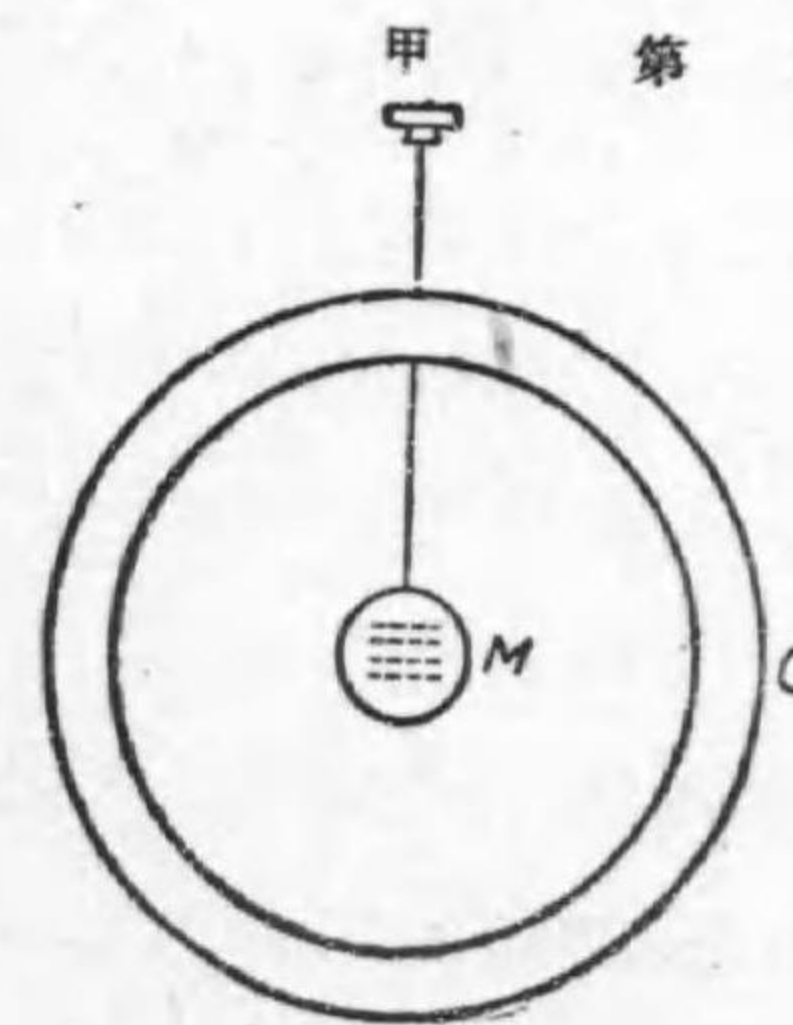
檢流計 (ballistic galvanometer) と稱し、磁氣測定、容量測定等に用ひる。之れに就いては本書では説明しない。

普通に檢流計と云へば直流用檢流計の事である。微小な交流を検する測定器を交流檢流計と稱する。交流檢流計には熱檢流計 (thermo-galvanometer)、振動檢流計 (vibration galvanometer) 等がある。熱檢流計に就いては後章熱電流計と共に説明する。振動檢流計は普通の檢流計と同一原理なる電磁力を應用したものであるが、その可動部分の固有振動周期を任意に調節する事が出来て居て、檢すべき交流の周期と合調せしめて使用するもので、交流の有無を検するに使用される。尚ほ此の外に電話受話器 (telephone receiver) は檢流計ではないが、微小な交流又は斷續電流に感ずるものであるから、受話器も交流又は斷續電流の有無を検する檢電器 (detector) として用ひられる。

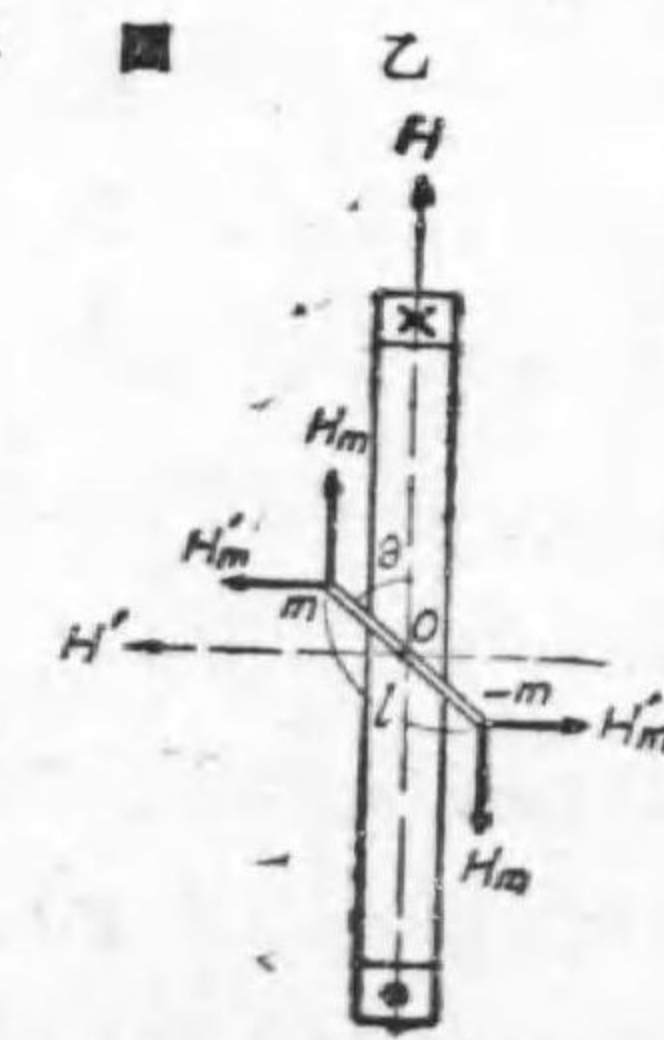
本章では檢流計の二三のものに就き説明する。

2. 可動磁針型檢流計

可動磁針型檢流計の中一二の



正切檢流計



正切檢流計の動作原理

ものに就き説明しよう。

第 2-1 圖甲は正切檢流計 (tangent galvanometer) の略圖である。C は垂直の大なる圓形の固定線輪で、

その中央に垂直軸の周圍に自由に廻り得る様に絹糸又は石英線で吊るされた小鏡 M があり、鏡の裏には水平に小磁針が貼付けられて居る。磁針は數個の小磁針を並べて貼付けたものである。此の檢流計は線輪面を南北の方向（詳しく云へば、地球磁氣子午線の方向）に一致せしめて用ひる。従つて線輪に電流を通さない時は、磁針は地球磁界の水平分力 H の爲に南北の方向を指し線輪面と一致して居る。今線輪に電流 i を通すと、之れにより磁界を生じ、その中央に於ける磁界 H' は線輪面に直角にして電流に比例する。即ち $H' = Gi$ で表はされる。此の定數 G は、線輪の圓の半徑及び巻數により定まる値である。此の場合、磁針に作用するトルク (torque) を考へるに、懸垂線の作用は極小であるから之れを閉却すれば、 H' と H との各磁界によつて磁針に生ずる二つのトルクを考へればよい。電流 i 従つて H' によつて磁針を反時計式に回轉せしめんとするトルク之れを 驅動トルク (driving torque) と稱し、又 H によつて時計式に元の零位に回轉せしめんとするトルクを制御トルク (controlling torque) と稱する。此の二つのトルクが平衡した位置に於て磁針は靜止して居るのである。此の場合磁針の靜止せる位置を乙圖に示す如く零位より θ なる振れをなした位置とする。磁針の極の強さを m 、長さを l (センチメートル) とすれば、磁針の磁氣モーメントは $M = ml$ である。 H' によつては $H'm$ ダインの力が磁針の兩極に圖の如く作用し、その距離は $l \cos \theta$ であるから、驅動トルク D は、

$$D = H'm \times l \cos \theta = Gilm \cos \theta = GiM \cos \theta \quad (イ)$$

又 H により兩極に作用する力は Hm ダインで、その距離は $l \sin \theta$ であるから、制御トルク T は、

$$T = Hm \times l \sin \theta = HM \sin \theta \quad (ロ)$$

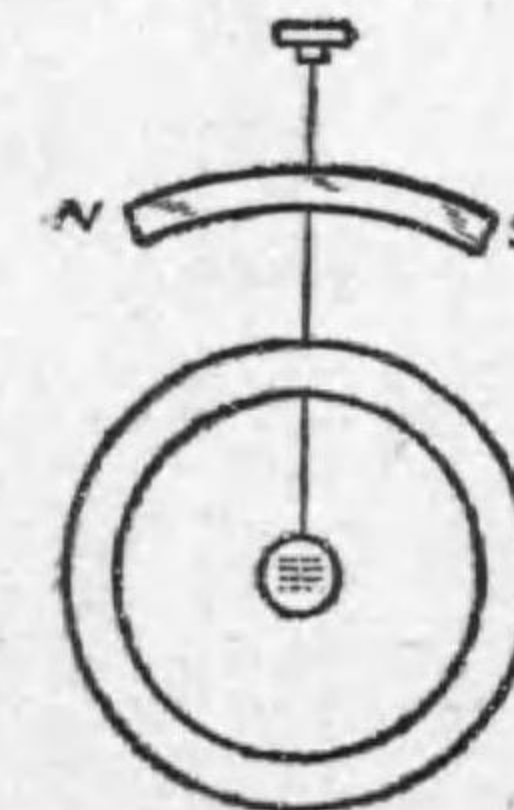
驅動トルクと制御トルクとが平衡して居るから、 $D = T$

$$\therefore GiM \cos \theta = HM \sin \theta$$

$$\therefore i = \frac{H}{G} \tan \theta \quad (ハ)$$

即ち電流は振れの正切に比例する。式で判る通り、分子 H が小である程、同じ振れ θ に對して電流 i は小である。即ち同一振れを生ぜしむるに小電流でよい。即ち制御するに用ひられる磁界が小なる程檢流計は鋭敏になる。檢流計を鋭敏にするためにトムソン (Thomson 氏後の Kelvin 卿)

第 2-2 圖 は第 2-2 圖に示す様に、上部に制御磁石 (controlling magnet) と稱する永久磁石 NS を設けて、 N 極を北に向けしめその位置を適當に上下して、小磁針の位置に生ずる有効の制御磁界 (即ち地球磁界と NS による磁界との差) を小にしてある。



制御磁界を
小にする法

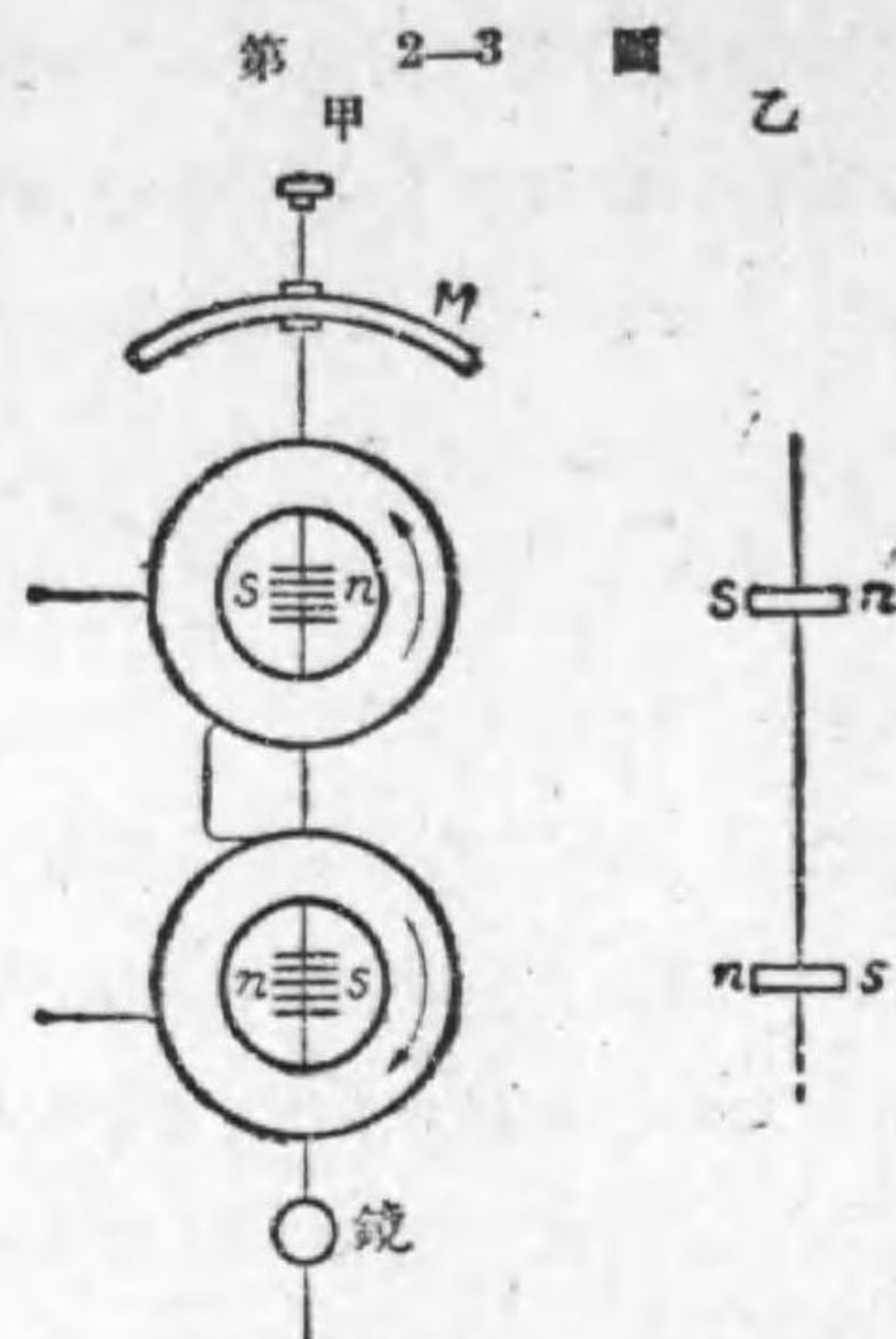
上述の檢流計では、檢流計の制御に地球磁界を利用して居るが、地球磁界は常に一定と云ふ譯ではないから、實用上は不便である。可動磁針型檢流計で感度を

良くする爲に無定位檢流計 (astatic galvanometer) 及び遮磁檢流計 (shielded galvanometer) と稱するものがある。之れ等を概説しよう。

第 2-3 圖甲はトムソン無定位檢流計の略圖である。乙圖は之れに使用される可動磁針で、磁氣モーメントの相等しい二つの磁針を上下に於て極を正反對に向けて一つのガラス棒 (又はアルミニウム線) に取付け、之れを石英線で懸垂したものである。地球磁界又は平等なる外部磁界は、上下

の磁針に反対のトルクを生ずるから、此の磁針は平等磁界によつては何等の作用を受けない。斯の様な磁針を無定位磁針 (astatic needle) と稱する。

トムソン無定位検流計では甲圖に示す様に、上下の磁針は夫々上下の線輪の中央に在る様に懸垂され、上下の線輪に通ずる電流は反方向になる様に接続されて居る。上部には制御磁石 M を備へて居る。線輪に電流を通すれば、



上下の磁針に生ずる駆動トルクは同一方向で相加はるが、制御トルクは上下反方向であるから、合成制御トルクはその差となる。今上下の磁針の磁気モーメントの大きさを相等しく M にして、その方向が完全に正反対であると假定すれば、電流 i の時振れ θ をなして居る場合、駆動トルクは $D = GiM \cos \theta$ で表はされる。又制御トルクは、無定位磁針が完全であるから地球磁界によつては何等制御を生ぜないで、制御磁石によつて上下磁針の位置に生ずる磁界のみによつて制御される。然るに制御磁石により上部磁針の位置に生ずる磁界 H_1 は下部磁針の位置に生ずる磁界 H_2 より大であるから、合成制御トルクは

$$T = H_1 M \sin \theta - H_2 M \sin \theta$$

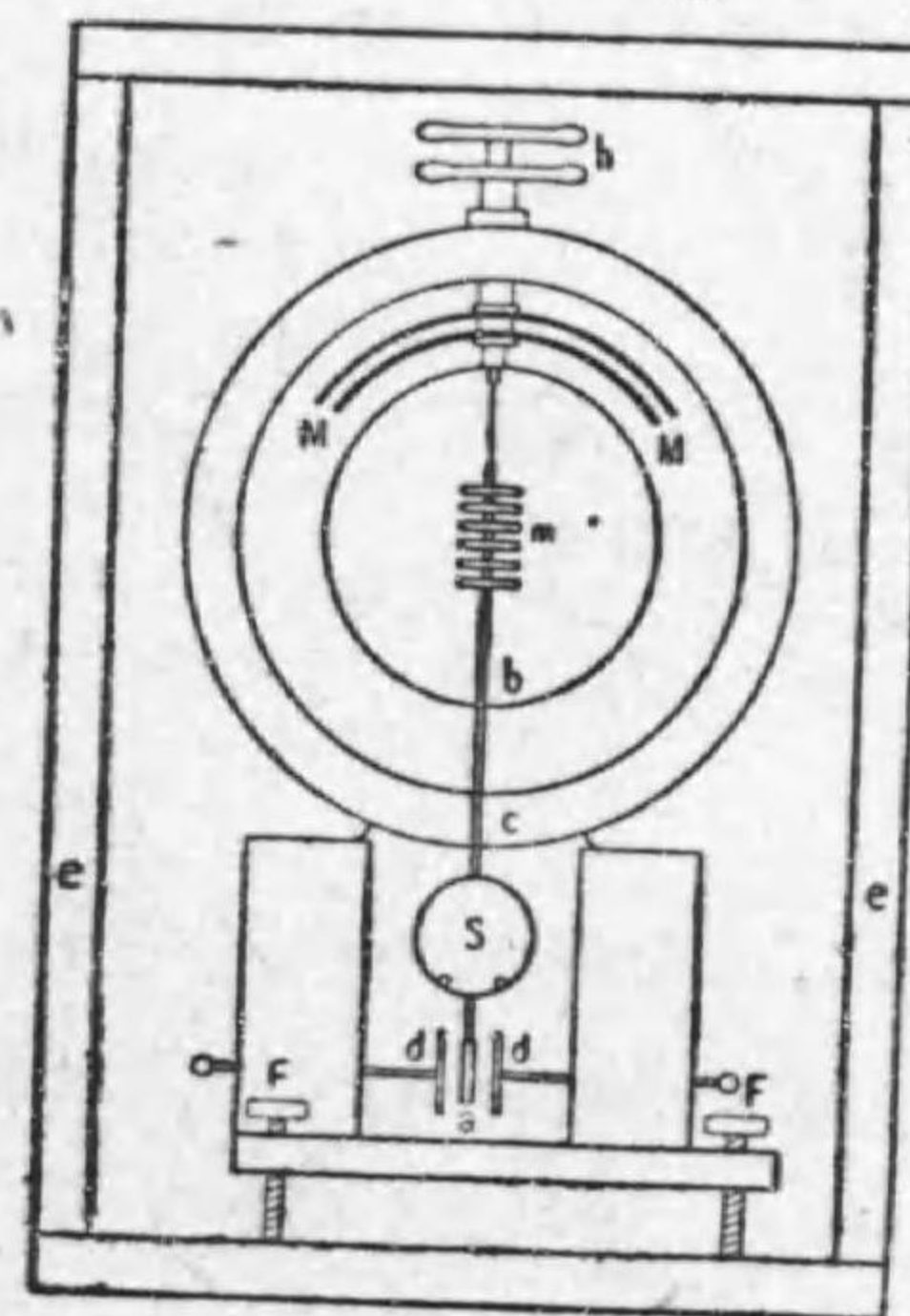
で表はされる。故に $D = T$ とおいて、次式を得る。

$$i = \frac{H_1 - H_2}{G} \tan \theta$$

即ち此の式より知られる通り、制御磁石を適當に上下する事により、分子の $(H_1 - H_2)$ を適當に小にする事を得て感度を良好にする事が出来る譯である。此の様な無定位検流計では、平等なる外部磁界によつては影響されないが、附近に電流の通じた電線や実験者がナイフ等の如き鐵類を所持して居ると、之れ等のものに磁針は感ずるから注意すべきである。

第2-4圖は地球磁界や他の外部磁界を遮断する様に作られたデュ・ボア・ルーバンの遮磁検流計 (Du Bois Rubens shielded galvanometer) を示す。

第 2-4 圖



遮 磁 検 流 計

ルーバンの遮磁検流計 (Du Bois Rubens shielded galvanometer) を示す。

可動磁針及び固定線輪を二つの珪素鋼の球状遮磁壁 b, c を以つて包み、更に之れを圓筒形遮磁壁 e を以つて三重に外部磁界を遮磁したものである。 b, c 間に二つの制御磁石 M があつて、之れ等を上部の把手 h によつて廻し制御磁界を調整する。中央部の可動磁針 m に對して一對の固定線輪が b の内部に装置されて居る。此の様に幾重にも遮磁壁を用ひる

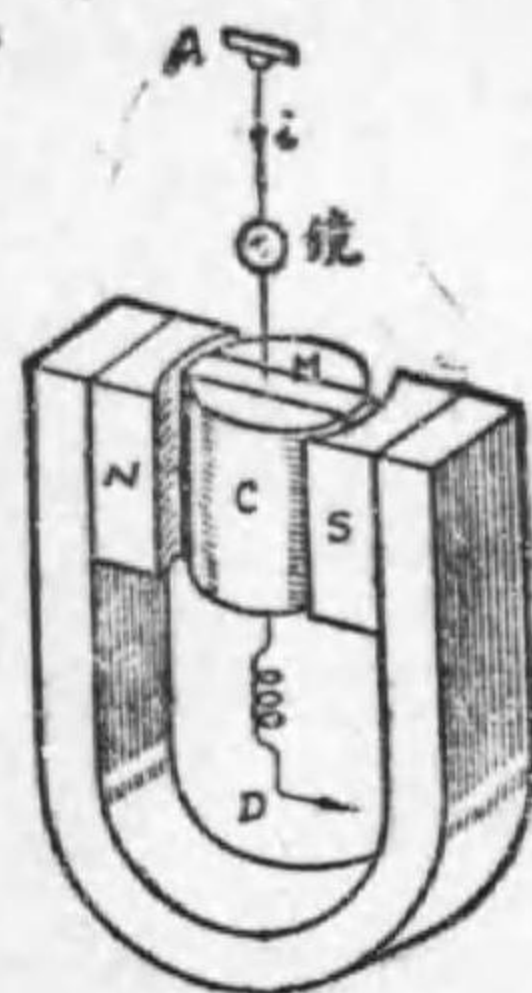
事により、地球磁界や其他の外部磁界の影響を防ぐ事が出来るのである。 S は鏡で、又下部の a は制動羽根と稱するアルミニウム羽根で、その作用に就いては第4節に述べる。

3. 可動線輪型検流計

前節に述べた可動磁針型検流計は感度は極めて良いが、調節が六ヶ敷いので普通の測定には不便である。

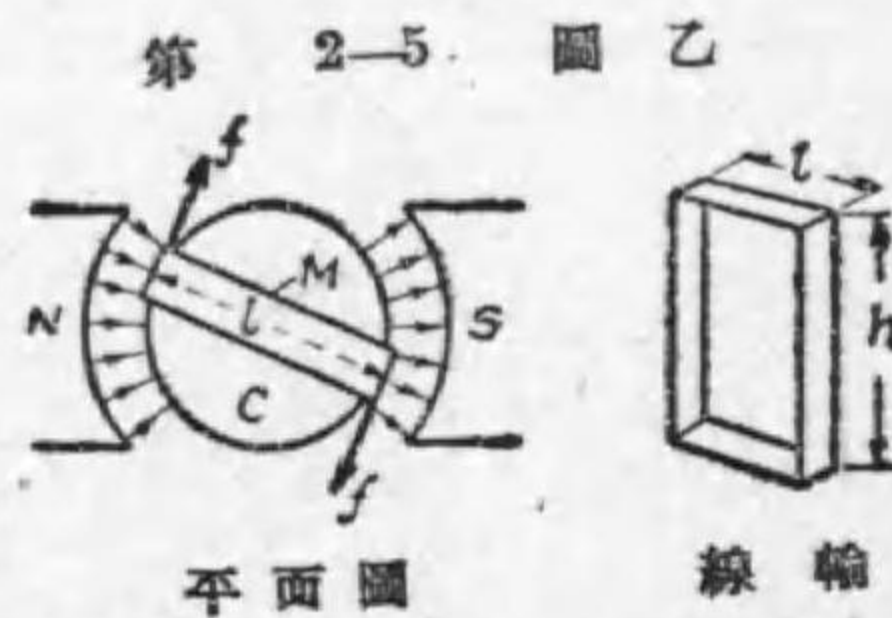
可動線輪型検流計は永久磁石の強い磁界中に線輪が吊るされて居るから、附近の小なる外部磁界の変動による零點の変動はないので使用し易い。最近の可動線輪型検流計は感度も良いものが作られて居る。

第 2-5 圖 甲 第 2-5 圖甲はダルソンバル (D'Arsonval) の可動線輪型検流計を示す。U 字形永久磁石の磁極 NS 間に圓筒形の軟鐵心 C があつて、空隙の磁界を平等な強さの輻射状磁界 (radial field) にしてある。空隙には可動線輪 M が



可動線輪型検流計

燐青銅 (phosphor bronze) の線で懸垂されて居る。燐青銅線は制御の外に可動線輪に電流を導く役もするのである。乙圖はその動作原理を示す略圖である。



平面圖

線輪

今線輪 M に i アムペアの電流が通ると、空隙部の線輪の両側に電磁力 f を生ずる。電磁力 f の方向は左手三指の規則に従ひ磁界及び電流と直角の方向に生じ、其の大きさは磁界の強さ H 、電流の強さ i 、線輪の高さ h 及び巻数 n に比例する。即ち

$$f = \frac{H i h n}{10} \quad (\text{dyne})$$

従つて線輪に働く駆動トルク D は、 ff 間の距離を l とせば、

$$D = fl = \frac{H h l n}{10} i \quad (\text{cm-dyne})$$

一つの検流計では H, h, l, n は一定であるから、 $\frac{H h l n}{10} = G_0$ とせば、

$$D = G_0 i \dots\dots\dots(1)$$

即ち駆動トルクは電流に正比例する。此のトルクに抗して燐青銅線が制御トルクを生じて兩トルクが平衡した位置に線輪は静止する。此の場合の線輪の零位よりの傾斜角即ち振れを θ とせば、制御トルク T は振れ θ に比例するから、單位角に對する制御トルクを k とせば (此の比例定數 k を制御トルク定數と稱する)、

$$T = k \theta \dots\dots\dots(2)$$

駆動トルクと制御トルクとが平衡して線輪は静止して居るから、

$$G_0 i = k \theta$$

$$\therefore i = \frac{k}{G_0} \theta = K_0 \theta \quad \left[\text{但し } K_0 = \frac{k}{G_0} \right]$$

即ち電流 i は振れ θ に比例する。

可動磁針型検流計では電流は振れの正切に比例するが、可動線輪型検流計では電流は振れに比例すると云ふ簡単な關係がある。此の點から考へると可動線輪型検流計は測定上非常に便利である。此のダルソンバル検流計で、電流と振れとが正比例するのは、磁界が平等な強さの輻射状磁界になつて居る爲である。尙ほ可動線輪型検流計では、磁界は永久磁石で作られた強い磁界であるから、附近の弱い外部磁界の変動による零點の変動がない。丙圖は横河電機製作所製の可動線輪型検流計である。

第 2-5 圖 丙



横河電機製作所製可動線輪型検流計

4. 検流計可動部分の運動 検流計に電流を通じて

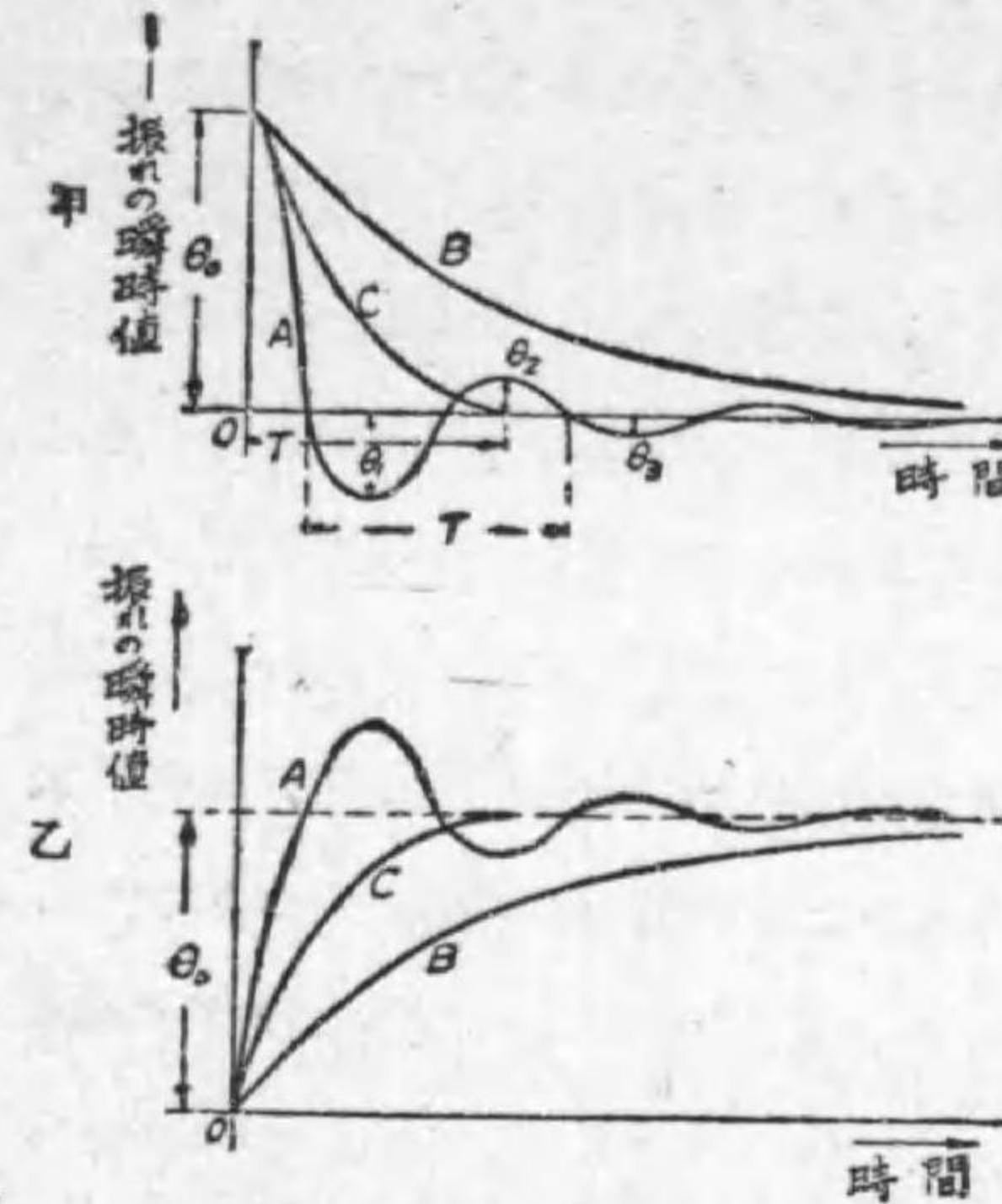
一定の振れを生じて居る場合、電流を切ると検流計の可動部分は直ちに零位に歸る譯ではなく、暫く経てから零位に達する。又急に電壓を與へても直ちに其の電流に応じた正當の振れに靜止するものでもなく、暫らく経てから正當の振れを示すものである。可動部分の此の暫時の間の運動を少しく考へて見よう。

検流計の可動部分の運動を支配する原因は、驅動トルク、制御トルク及び次に説明する制動トルク (damping torque) 並に可動部分の回轉軸に關する慣性能率 (moment of inertia) とである。驅動トルクは既に述べた通り、検流計に通ずる電流により可動部分を傾斜せしむるトルクであつて、これは振れが小なる場合は電流に比例する。制御トルクは驅動トルクに反對に作用するものでこれは振れに比例する。検流計の可動部分が動きつゝある間は周囲の空氣の抵抗其他電磁誘導作用のために可動部分の運動の方向と反對方向にトルクを生ずる。此のトルクを制動トルクと稱し、これは殆んど可動部分の角速度に比例する。

検流計の可動部分の運動は、此の三種のトルクの強弱及び慣性能率の大小如何に依つて定まるものである。

第 2-6 圖甲は、検流計に一定電流を通じ θ_0 の振れを生じ居りしものを急に電流を切つた場合の運動を示すもので、横軸に時間を、縦軸に瞬時の振れを取つたものである。曲線 A は制動作用が慣性能率、制御作用に較べて非常に弱い場合の運動を示すものであつて、此の場合には慣性が大きいために零位を通り越して反對方向に θ_1 まで振れ、又反對に θ_2 まで振れると云ふ様に振動を生じ、其の振れが次第に減少して遂に零位に靜止する。此の様な運動を減衰振動と稱する。曲線 B は制動作用が慣性及び

第 2-6 圖



甲…檢流計の電流を切つた場合の三種の運動
乙…檢流計に急に電流を通じた場合の三種の運動

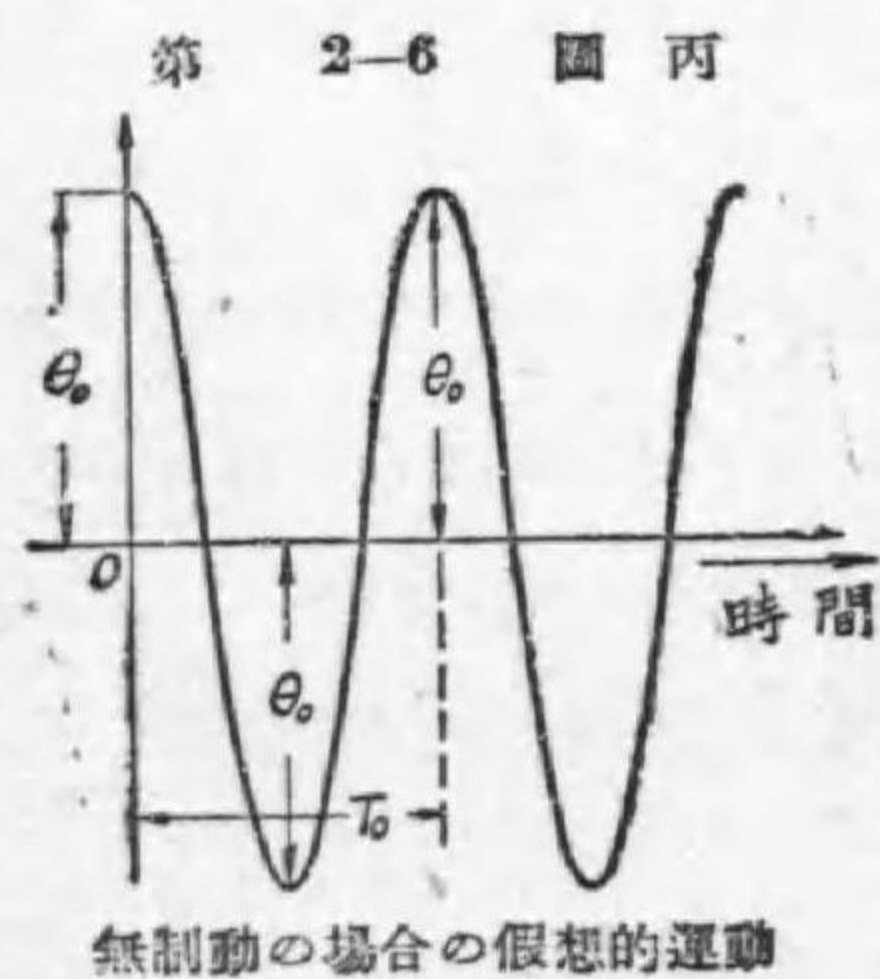
制御作用に比して非常に強い檢流計の運動を示すものである。此の場合には慣性及び制御作用が非常に弱いために、振動をせず長い時間経てから零位に達するのである。曲線 C は制動作用が適當なる檢流計の運動を示すもので、此の場合には振動もせず速く零位に達する。此の場合の制動を臨界制動 (critical damping) と稱する。此の様な檢流計を速指檢流計 (dead-beat galvanometer) と稱する。

第 2-6 圖乙は、檢流計に急に電壓を與へた場合の運動を示すもので、曲線 A は制動作用が非常に弱い檢流計の運動を示すもので、檢流計の電流に應ずる正當の振れ θ_0 に靜止するまでは θ_0 の左右に暫く振動をする。曲線 B は制動過剰なる檢流計の場合で、最後の θ_0 を示すまでには振動はしないが長時間を要する。曲線 C は臨界制動の檢流計の場合で早く θ_0 に達する。

斯様に檢流計の制動力の強弱は可動部分の運動に影響するものである。

可動磁針型檢流計では例へば、第 2-4 圖の如く、可動部分にアルミニウムの羽根 a を取付け、此の羽根と平行に二枚の板 d, d が備へられ、可動部分が動くとき羽根が周囲の空氣の抵抗を受けて制動される様にしてある。

此の様な空気制動では、二つの平行板 d, d を近づければ制動力大で之れを遠ざければ制動力小になるから、平行板の距離を調整して制動力を調整し得る。可動線輪型検流計では、線輪の入った空隙が幾分か空気制動ともなるが之れでは制動不十分であるから、電磁制動法を用ひる。それには可動線輪をアルミニウム枠に巻けば、可動部分が動くとき枠が磁束を切る爲に起電力を生じ枠に渦流を誘起し、此の渦流と磁界との相互作用によつて可動部分の運動と反方向にトルクを生ぜしむることも出来る。之れと同理窟で、線輪に通じて居る電流を切ると同時に線輪が適当な抵抗と閉回路を作る様にして電磁制動の目的が達せられる。此の場合に抵抗の値が適当であると臨界制動状態が得られるのである。臨界制動にするために検流計に接続すべき抵抗を臨界制動外部抵抗(external critical damping resistance)と稱する。



第 2-6 圖甲の A なる減衰振動の場合に於て、一振動の間の時間 T を振動の周期と稱し、振動周期 T は慣性能率、制御力、制動力の大小如何に依つて定まるものである。検流計に於て若し制動作用が無いものと假定すれば、可動部分は第 2-6 圖丙の如く運動し、振れの最大値は θ_0 の一定値で振動は永久に続くべき筈である。此の様な無制動の場合の周期 T_0 は普通の振動 A の場合の周期 T より幾分か小になり、慣性能率 I と制御トルク定数 k とにより次式で表はされる値となるものである。

此の様な無制動の場合の周期 T_0 は普通の振動 A の場合の周期 T より幾分か小になり、慣性能率 I と制御トルク定数 k とにより次式で表はされる値となるものである。

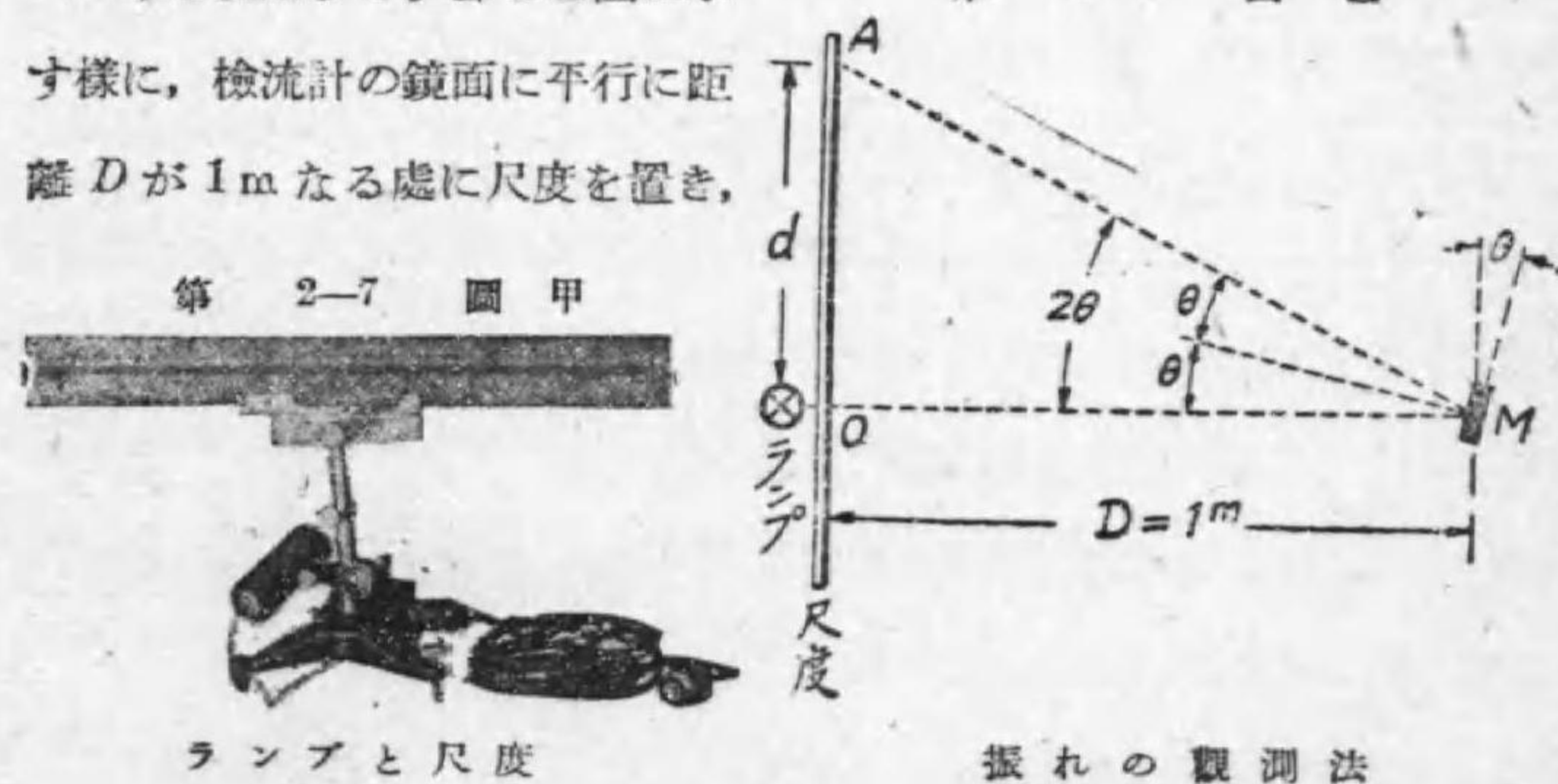
$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k}}$$

此の無制動の周期 T_0 を固有振動周期 (natural period of oscillation) と稱する。普通検流計の周期と云ふのは、此の固有振動周期を云ふのである。上式から明かな通り、 k 大なる程 T_0 は小となる。然るに k 大なる程検流計の感度は悪くなる。反対に k が小なる程感度は良くなるが、周期 T_0 は長くなる。検流計を選ぶ場合には、單に感度のみを考へずに周期も考へべきである。若し同じ感度のものならば、周期の短いものを選ぶべきである。

5. 反照検流計の振れの観測法

反照検流計の振

れを観測するには普通第 2-7 圖甲に示す様にランプと尺度 (lamp and scale) を使用する。即ち乙圖に示



検流計が振れない場合に、ランプから出る光が検流計の鏡に當り反射されて尺度上の中央に光點を生ぜしむる様に尺度の零位を調整して置く。次に検流計に電流を通すると、鏡はそれに應じて振れ θ だけ傾き、ランプから

出た光は鏡に入射し反射されて A 點に光點を生ずる。入射角も反射角も θ に等しいから、光點移動距離 OA を d とせば、

$$\tan 2\theta = \frac{d}{D}$$

従つて θ を算出し得る。振れが小なる場合は、 $\tan 2\theta \approx 2\theta$ であるから、

$$\theta \approx \frac{d}{2D} \quad \text{及び} \quad \tan \theta \approx \frac{d}{2D}$$

としてよい。尙ほ少しく精密に算出するには次の更正を施して置く。

$$\theta = \frac{d}{2D}(1-\delta_1), \quad \tan \theta = \frac{d}{2D}(1-\delta_2)$$

但し δ_1, δ_2 は第 2-1 表の値を用ひる。

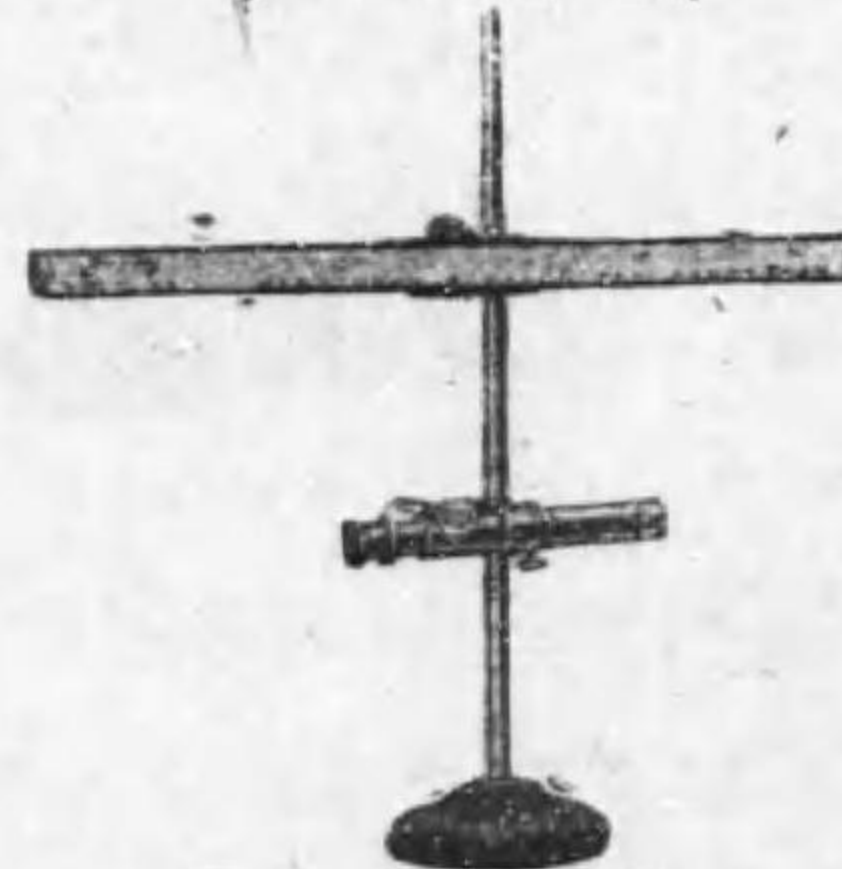
第 2-1 表

d/D	.01	.02	.04	.06	.08	.10	.12	.14	.16	.18	.20
δ_1	.00003	.00013	.00053	.00120	.00212	.00331	.00470	.00645	.00840	.01059	.01301
δ_2	.00002	.00010	.00040	.00090	.00160	.00249	.00357	.00485	.00632	.00797	.00980

振れの観測にランプと尺度とを用ふる代りに、第 2-7 圖丙の様に望遠鏡と尺度とを用ふるもよい。其の原理は第 2-7 圖乙と同様である。此の場合には鏡にうつる尺度上の目盛を望遠鏡で讀むから、目盛は左文字のものを用ふる。

6. 檢流計の感度 檢流計

第 2-7 圖 丙



望遠鏡と尺度

の感度には電流感度 (current sensitivity) と電壓感度 (voltage sensitivity) との二つある。

(イ)電流感度 電流感度とは單位振れに對する電流を云ふ。實用上檢流計と尺度との距離 D が 1m の時、尺度上 1mm の振れを生ぜしむるに要する電流を以つて表はす。此の電流値が i_0 アムペアなりとすると、 i_0 が小なる檢流計程電流感度が良い譯である。(電流感度の表はし方に此の外種々あるが茲では省略して置く。)

(ロ)電壓感度 電壓感度とは單位振れに對する檢流計端子間の電壓を云ふ。實用上は、尺度と鏡との距離が 1m の時、尺度上 1mm の振れを生ぜしむる爲に檢流計端子に與ふべき電壓を以つて表はす。此の電壓が e_0 ヴォルトなりとすると、 e_0 が小なる程電壓感度は良い。(尙ほ詳しく云へば、可動線輪型檢流計では檢流計を臨界制動とし其の回路に電壓 e ヴォルトを與へた時の振れ d mm を得たりとせば、 e/d を以つて電壓感度とする)。

檢流計回路の抵抗が R_0 オームで、其の電流感度及び電壓感度が夫々 i_0 (A/mm), e_0 (V/mm) ならば次の關係がある。

$$e_0 = i_0 R_0$$

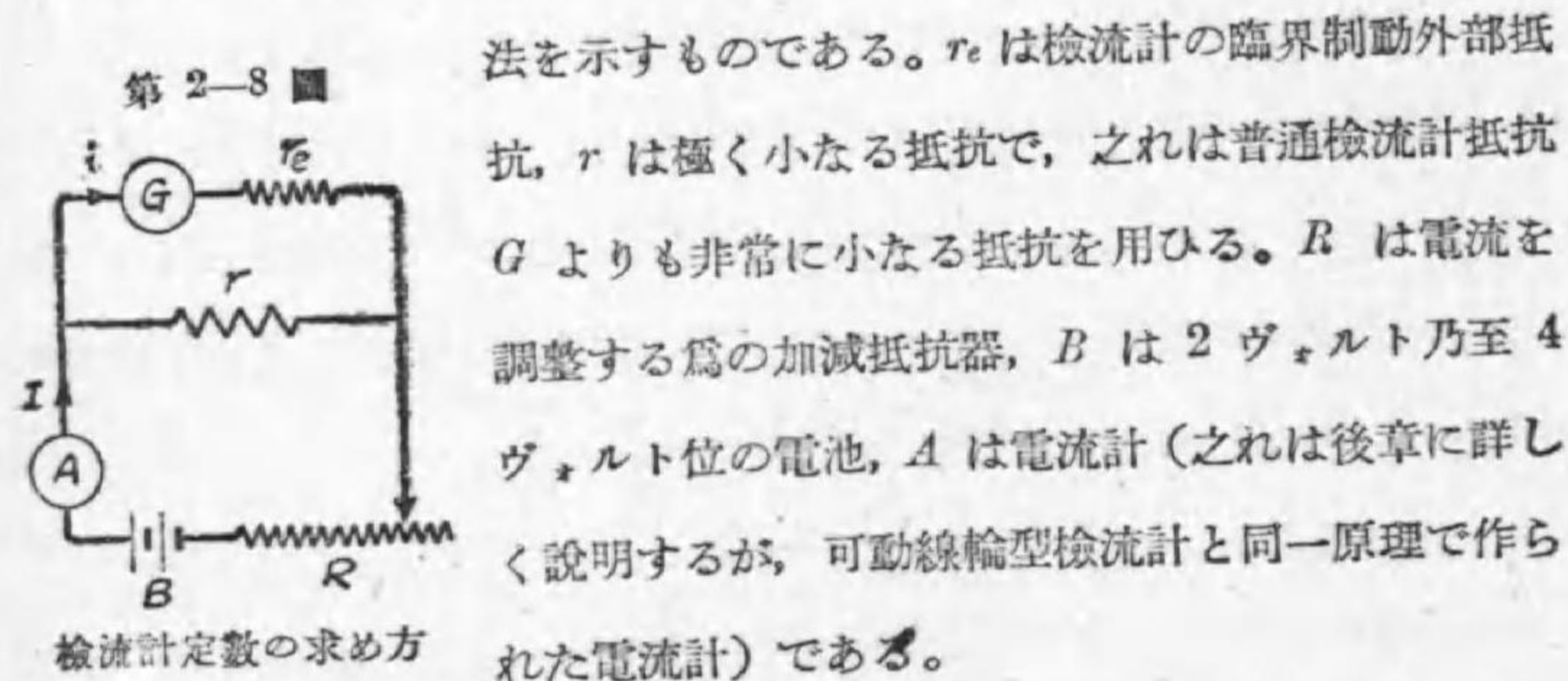
電流感度の良きものを選ぶか電壓感度の良いものを選ぶかは測定の目的に依る。檢流計の振れに依り電流又は電流の變化を測定しようとする場合(例へば絶縁抵抗測定の場合)は電流感度の良い比較的高抵抗の檢流計を使用した方が宜い。又二點間の電位差とか又は電位差の有無を検しようとする様な場合(例へば後に述べるホイートストーン・ブリッジや電位差計等)には電壓感度の良い低抵抗の檢流計を用ふべきである。

7. 検流計定数

検流計の振れによつて電流の値を決定する場合には、単位振れに對する電流の値即ち電流感度を決定し置く必要がある。此の爲には振れが小なる場合は、電流 i では振れの角 θ 又は尺度上の振れ d に比例するから、

$$i = K_0 \theta \quad i = K d$$

此の K_0 又は K は電流感度を示すもので、**検流計定数** (galvanometer constant) とも稱せられる。實用上は K を決定しておく。之れを決定するには $K = \frac{i}{d}$ なるに依り、既知小電流 i により生ずる振れ d を求むれば K は計算される。第 2-8 圖は検流計 G の電流感度を決定する方



今検流計の電流を i 、又電流計の電流を I とすれば、

$$i = I \times \frac{r}{r + G + r_e} \quad (1)$$

此の時の検流計の振れを d とせば、

$$i = K d \quad (2)$$

(1)、(2) より、

$$\therefore K = \frac{I r}{(r + G + r_e) d} \quad (3)$$

r が極小なれば、

$$K = \frac{I r}{(G + r_e) d}$$

尙ほ序に、此の場合の検流計の電圧感度 (一名電圧定数) を K_v とし、

r の兩端子間の電圧を e とせば、

$$e = I \frac{r(G + r_e)}{r + G + r_e} \quad (4')$$

$$e = K_v d \quad (5')$$

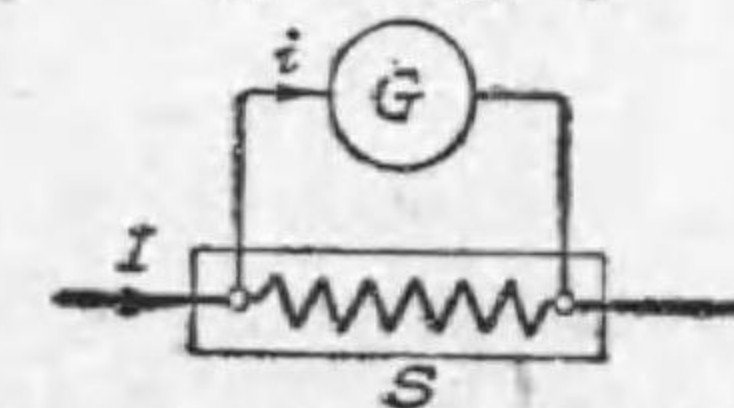
$$K_v = \frac{I r(G + r_e)}{(r + G + r_e) d} = \frac{I r}{d} \quad (6')$$

(3)、(6') で夫々検流計の電流感度及び電圧感度が求められる。

8. 分流器

検流計の振れによつて電流を比較する際、過大な振れを適當な割合で小さくする爲に検流計に適當な抵抗器を併用する。斯様な抵抗器を分流器 (shunt) と稱する。茲に二三の分流器を説明しよう。

第 2-9 圖 甲



検流計分流器の原理

(1) 検流計分流器 第 2-9 圖甲は普通に使われる検流計分流器 (galvanometer shunt) の原理を説明するものである。これは検流計 G と並列に接続した抵抗器 S である。

今、 G = 検流計の抵抗、 S = 分流器の抵抗、 I = 被测電流、 i = 検流計電流とせば、

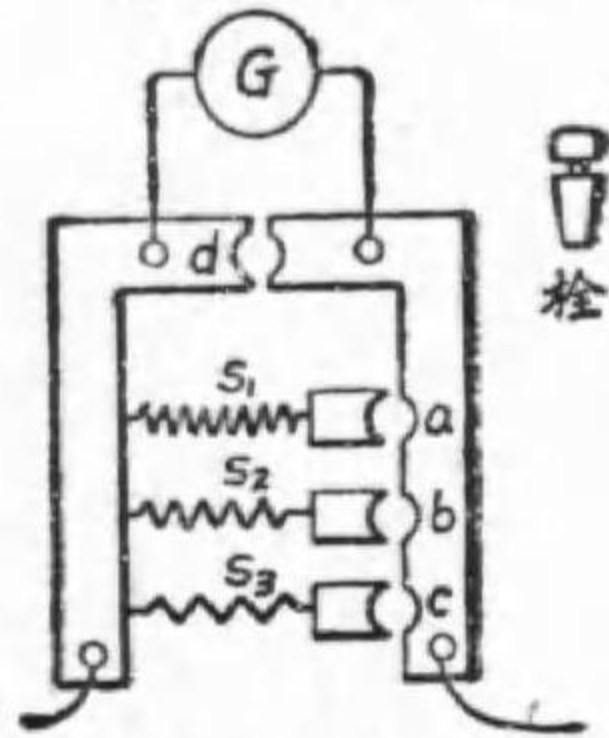
$$i = I \frac{S}{G + S} \quad \text{故に} \quad I = \frac{G + S}{S} i$$

$\frac{G+S}{S}$ を此の分流器の倍率 (multiplying factor) と稱する。此の倍率を m で表はすと、 $I=mi$ となる。

検流計の抵抗 G なる場合、倍率 m なる分流器の抵抗 S の値はどうかと云ふと、 $m=\frac{G+S}{S}$ から次の関係が得られる。

$$S=\frac{G}{m-1}$$

第 2-9 圖 乙

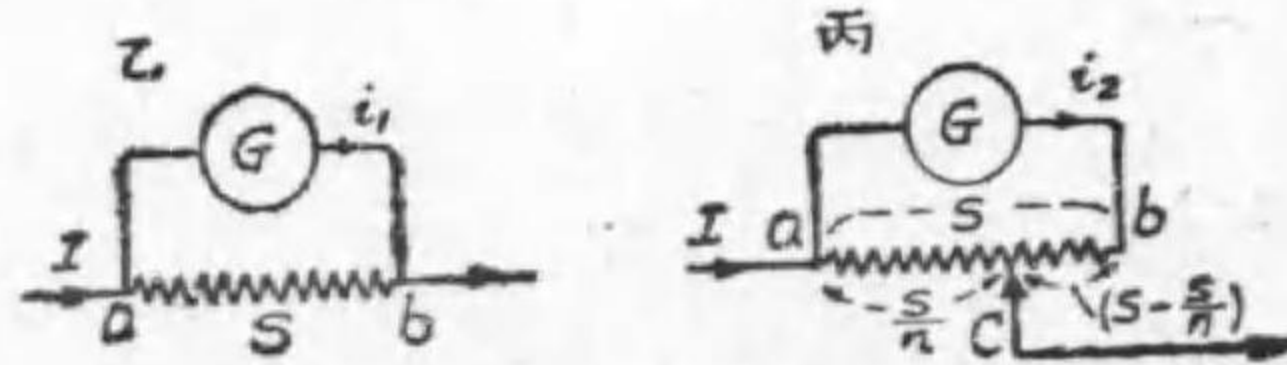
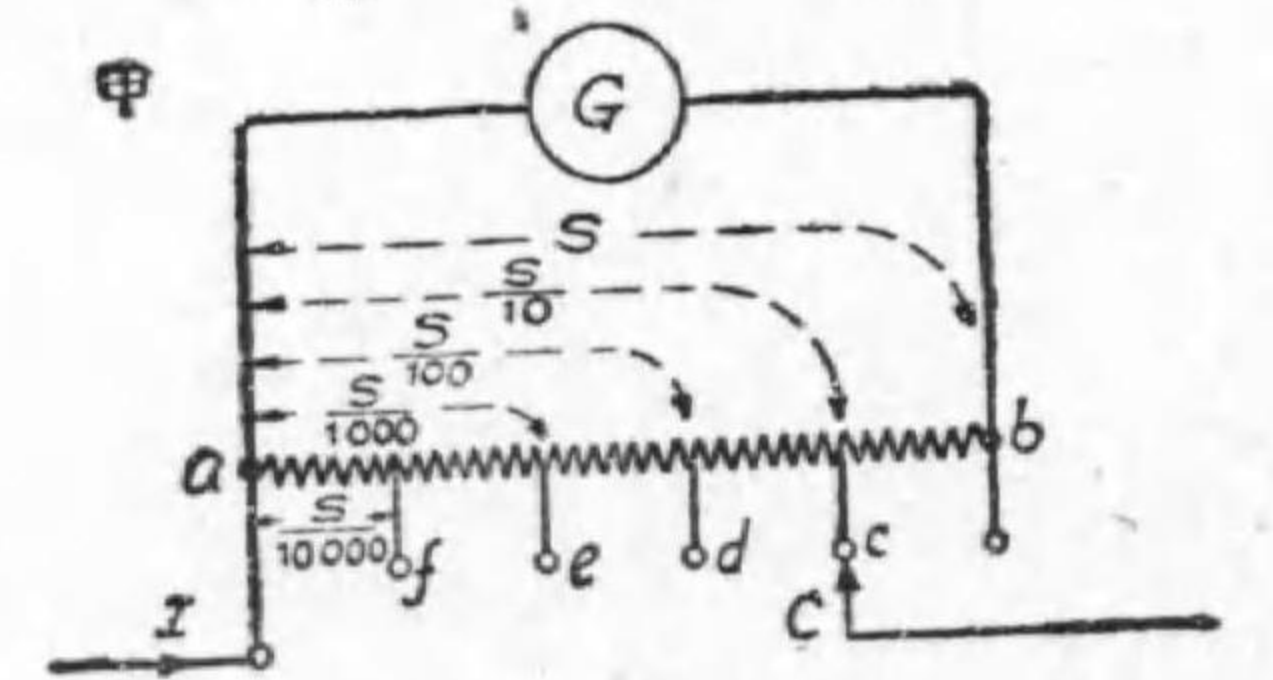


検流計分流器の例

第 2-9 圖乙は、倍率 10, 100, 1000 を得る分流器を示すもので、 $S_1=\frac{G}{9}$, $S_2=\frac{G}{99}$, $S_3=\frac{G}{999}$ に作られて居る。a, b, c, d は栓を挿入する孔で、d に栓を入れると検流計は短絡せられ、a に栓を入れると倍率は 10 となり検流計には全電流の十分の一の電流が通する事になる。b, c は夫々倍率 100, 1000 に對する栓の孔である。

(□) 萬能分流器 前述の普通の検流計分流器はそれに組合された検流計のみに適するものであつて、抵抗の違つた他の検流計に用ひると倍率が違つて來るのである。萬能分流器 (universal shunt) と云ふのは如何なる検流計にも共用する事の出来る分流器である。

第 2-10 圖



萬能分流器の原理

第 2-10 圖甲はエーアトン・マザー (Ayrton & Mather) の萬能分流器の略圖である。分流器の ab 間の全抵抗が S オームで、 ac, ad, ae, af の抵抗が夫々 $\frac{S}{10}, \frac{S}{100}, \frac{S}{1000}, \frac{S}{10000}$ オームになつて居る。乙圖及び丙圖は其の原理を説明する爲の圖である。甲圖で接觸子 C を b に接した場合は乙圖で、分流器の全抵抗 S が検流計 G と並列になり最も大なる振れを與へる。接觸子 C を b 以外の c, d, e, f の何れかに接した場合は一般に丙圖で示す事が出来る。(即ち 10, 100, 1000, 10000 等を一般に n で表はしたのである。) 今乙圖の場合の検流計電流 i_1 と丙圖の場合の検流計電流 i_2 とを比較して見よう。

乙圖の場合、 $i_1=\frac{S}{G+S} \times I$ (イ)

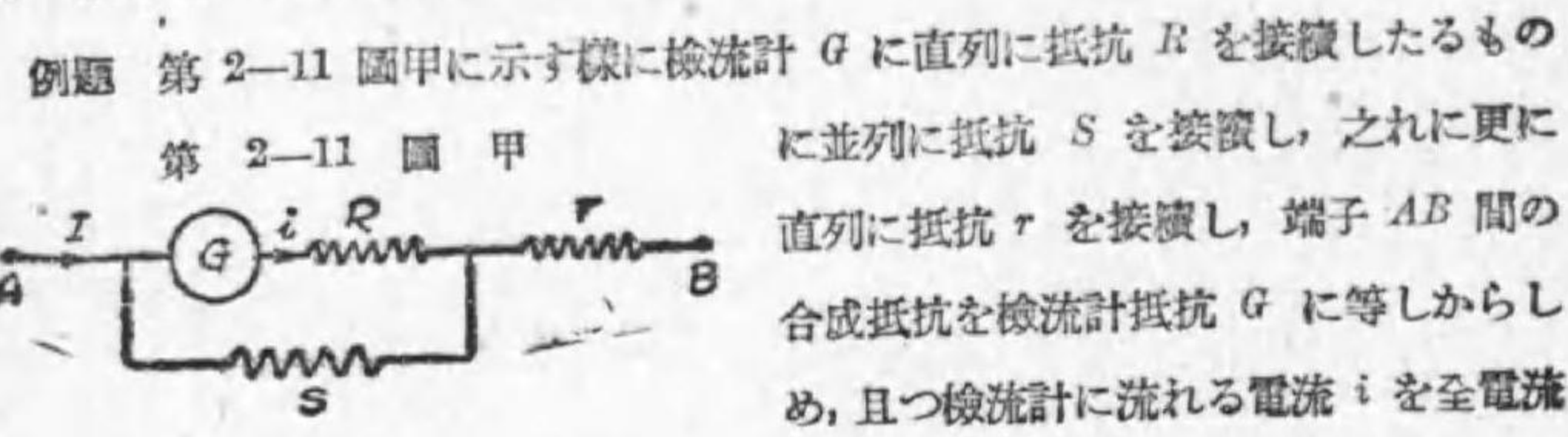
丙圖の場合、 $i_2=\frac{\left(\frac{S}{n}\right)}{G+\left(S-\frac{S}{n}\right)+\frac{S}{n}} \times I = \frac{1}{n} \times \frac{S}{G+S} I$ (ロ)

(イ) の値を (ロ) に代入して、

$$i_2=\frac{1}{n} i_1$$
 (ハ)

即ち丙圖の場合の検流計電流は、乙圖の場合の検流計電流 i_1 の $\frac{1}{n}$ となる。此の分流器では接觸子 C を b に接した時を標準として居るのである。(ハ) 式から判る様に検流計の抵抗 G には無關係であるから、如何なる検流計にも使用し得るので萬能分流器と稱せられるのである。甲圖の萬能分流器では、接觸子を c, d, e, f と變へると b に接した時の $\frac{1}{n}$ 倍即ち $\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}, \frac{1}{10000}$ の振れを得る事になる。

(ハ)補償型分流器 (イ), (ロ) で述べた分流器では, 回路の抵抗が小さい場合に分流器の倍率を変へると, それが回路の全抵抗に大なる変化を及ぼし, 従つて全電流も變化して誤差が大きくなつて來るのである。倍率を変へても合成抵抗が常に一定で, 従つて全電流が一定なる様な分流器がある。之れを補償型分流器 (compensating shunt) と稱する。補償型分流器の根本原理を理解する爲に次の例題を考へて見よう。



例題 第 2-11 圖甲に示す様に検流計 G に直列に抵抗 R を接続したものに並列に抵抗 S を接続し, 之れに更に直列に抵抗 r を接続し, 端子 AB 間の合成抵抗を検流計抵抗 G に等しからしめ, 且つ検流計に流れる電流 i を全電流 I の $\frac{1}{m}$ ならしめる爲には, S 及び r は如何なる値となすべきか。

解 AB 間の合成抵抗は $\frac{(G+R)S}{G+R+S} + r$ で, 又 $\frac{i}{I} = \frac{S}{G+R+S}$ なる故, 題意により次の二式が成立する。

$$\frac{(G+R)S}{G+R+S} + r = G \quad (イ)$$

$$\frac{S}{G+R+S} = \frac{1}{m} \quad (ロ)$$

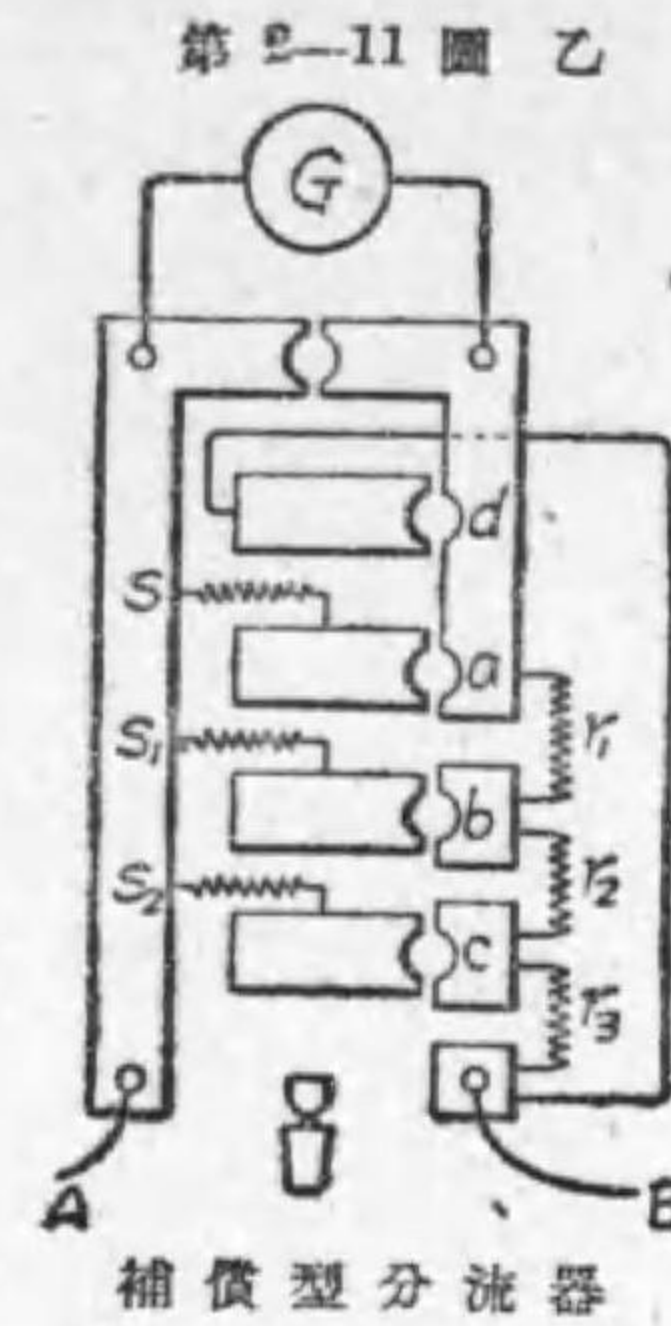
此の (イ) (ロ) を S 及び r を二つの未知数とする二元連立方程式として解けば

$$S = \frac{G+R}{m-1} = \frac{(S \text{ と並列なる抵抗})}{\text{倍率}-1}$$

$$r = G - \frac{G+R}{m} = \text{検流計抵抗} - \frac{(S \text{ と並列なる抵抗})}{\text{倍率}}$$

斯様に並列抵抗 S , 直列抵抗 r を選べば回路の全抵抗を變へずに倍率 m を得る。

第 2-11 圖乙は補償型分流器を示すもので, d に栓を挿すと分流器を使はない時で AB 間の抵抗は G である。 a に栓を挿すと S が G と並列で, $(r_1+r_2+r_3)$ が直列になり, 此の場合の倍率は $m=1000$ である。



第 2-11 圖乙 b に栓を挿した時は, S_1 が $(G+r_1)$ と並列になりしものに, (r_2+r_3) が直列になり, 此の場合の倍率は $m=100$ である。又 c に栓を挿す時は, S_2 が $(G+r_1+r_2)$ と並列になりしものに r_3 が直列になり, 此の場合の倍率は $m=10$ である。従つて, 前の例題の公式を應用して次の六式が得られる。

a に栓を挿した時 ($m=1000$) は,

$$S = \frac{1}{999} G \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

$$r_1+r_2+r_3 = G - \frac{G}{1000} \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

b に栓を挿した時 ($m=100$) は,

$$S_1 = \frac{1}{99} (G+r_1) \quad \dots\dots\dots(2-3)$$

$$r_2+r_3 = G - \frac{(G+r_1)}{100} \quad \dots\dots\dots(2-4)$$

c に栓を挿した時 ($m=10$) は,

$$S_2 = \frac{1}{9} (G+r_1+r_2) \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

$$r_3 = G - \frac{(G+r_1+r_2)}{10} \quad \dots\dots\dots(2-6)$$

(2-2), (2-4), (2-6) より r_1, r_2, r_3 を求め, (2-1), (2-3), (2-5) に代入して S, S_1, S_2 が求められる。其の結果は次の通りである。

$$\begin{cases} S = 0.001\ 001\ G \\ S_1 = 0.010\ 193\ G \\ S_2 = 0.123\ 333\ G \end{cases} \quad \begin{cases} r_1 = 0.009\ 0909\ G \\ r_2 = 0.100\ 9091\ G \\ r_3 = 0.889\ G \end{cases}$$

補償型分流器の理論は後章に述べる電位差計の測定範囲を變へる場合に應用されるのである。

9. 携帶用指針檢流計 前に述べた反照檢流計は、振

動しない基礎の上に据付けて使用するものであるが、任意の場所に携帶して用ひ得る携帶用檢流計 (portable galvanometer) として、可動部分に

第 2-12 圖



携帶用指針檢流計

指針を備へて簡便に電流値を讀取る事の出来る指針檢流計も盛に使用される。第 2-12 圖は可動線輪型指針檢流計で、可動線輪は磷青銅線で懸垂され、指針が取り付けられて居る。目盛盤に沿うて鏡が取り付けられて居るから、讀取りの際は、鏡に映る指針の像が指針と一致する様に目の位置を正しくして目盛を正確に讀むべきである。

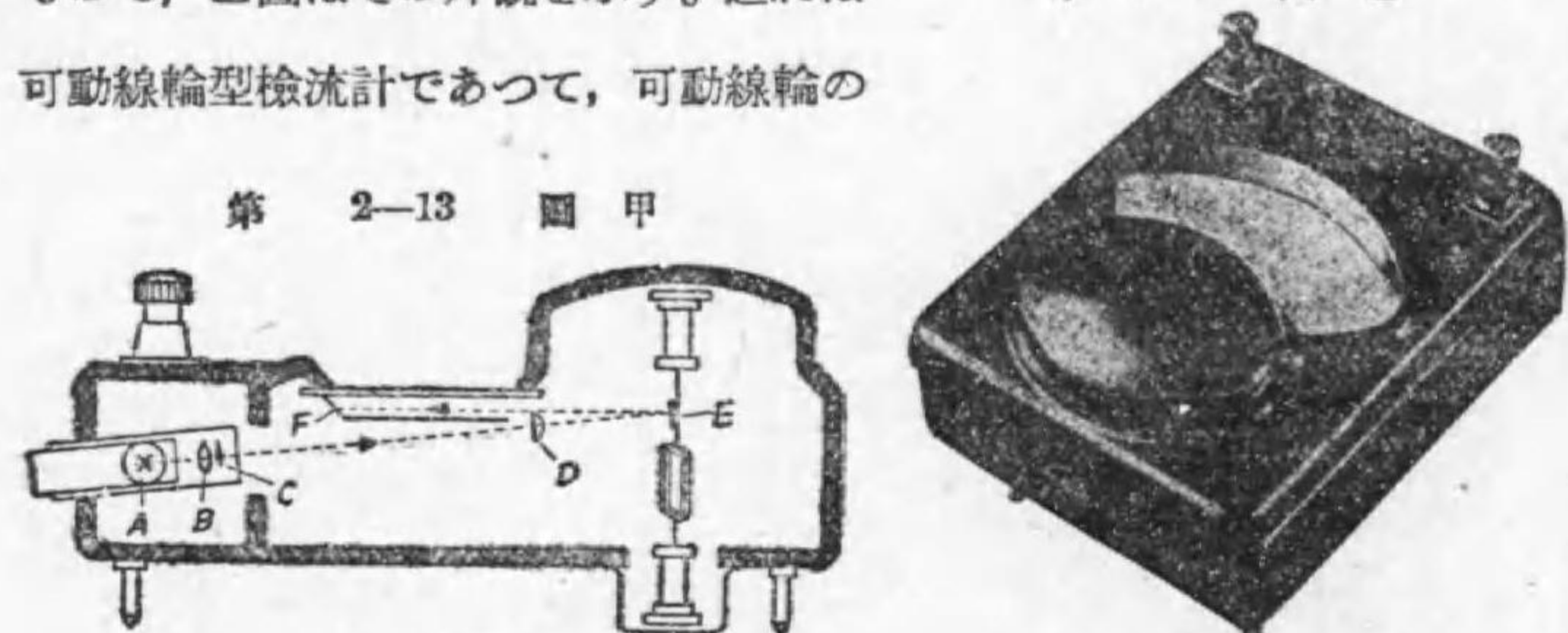
目の位置が正當でなくて一寸横から讀んだりすると眞の値と違つた誤れる値を讀む事になる。此の違を視差 (parallax reading error) と云つて居る。

一般に指針檢流計は勿論反照檢流計に比して感度は低いが、第 2-12 圖の如き可動線輪型指針檢流計は 2×10^{-7} アムペアの電流で感ずる様な高い感度のものである。

10. 光針檢流計 反照檢流計は高感度ではあるが振れの

觀測に相當の注意と時間を要するし、又指針檢流計は目盛の讀取は前者より簡便であるが、感度は前者程高くはない。獨逸シーメンス會社では此の兩者の長所を採つた光針檢流計 (light-beam galvanometer) なるものを製作して居る。第 2-13 圖甲はシーメンス光針檢流計の構造の主要を示すもので、乙圖はその外觀を示す。これは

第 2-13 圖 乙



第 2-13 圖 甲

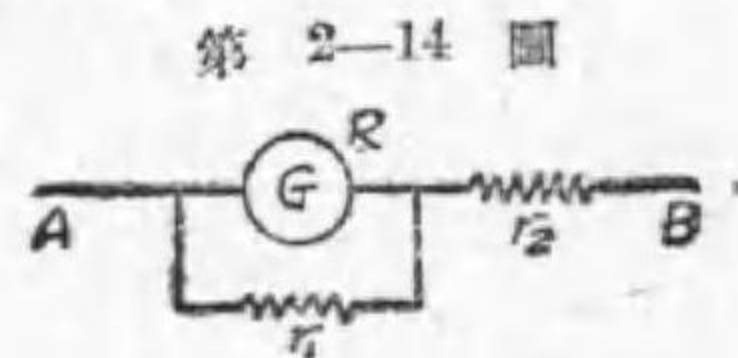
シーメンス光針檢流計の構造

シーメンス光針檢流計

可動線輪型檢流計であつて、可動線輪の上方懸垂線に鏡 E が取り付けられ、之れに對し光源 A から光線を以て照らすのであるが、その途中 A に近い處に固定された指針 C がある爲め、C の影像が鏡に入射し、之れが更に、少しく傾斜した弧狀目盛盤上に反射される。従つて目盛を指示影像 F により簡単に正確に讀取る事が出来るのである。即ち可動部分は、指針がなく反照檢流計と同様に光針 (light beam) を利用して居るから非常に軽く感度が高い。又指針檢流計では指針により目盛を正確に讀むには相當の注意を要するが、此の檢流計では目盛に直接 C の像が映つて居るから讀取の誤差なく簡単に讀める。

問 題

1. 可動線輪型検流計の動作原理を説明せよ。
2. 抵抗 450 オームを有する検流計に附屬する 10 倍及び 50 倍の二種の倍率を有する分流器の抵抗を計算し、且つ其の接続圖を示せ。
(通試)
3. ユニヴァーサル分流器とは何ぞや。(通試)
4. 抵抗 R なる検流計 G に第 2-14 圖の如く、 r_1 なる抵抗を並列に、又 r_2 なる抵抗を直列に接続し、 AB 間の抵抗を R に等しからしめ、且つ G に流るゝ電流を全電流の $\frac{1}{n}$ ならしむるには、 r_1 及び r_2 の値各幾何なるか。(通試)



答 $r_1 = \frac{R}{n-1}$, $r_2 = \frac{n-1}{n}R$

5. 下記の事項に就きて知る所を簡単に述べよ。

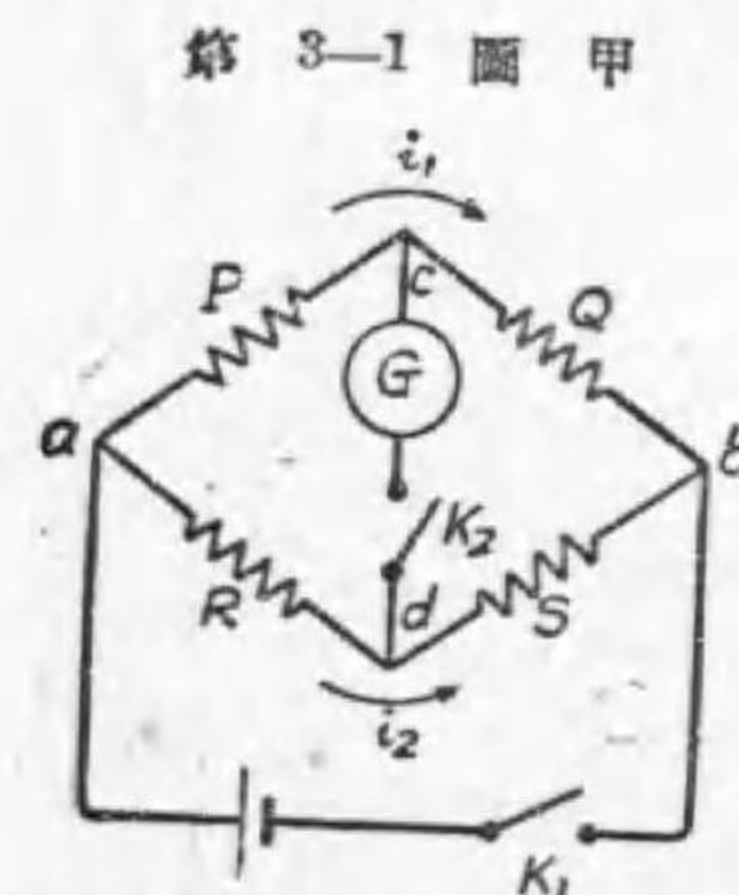
- | | |
|----------|----------|
| イ. 駆動トルク | ロ. 制御トルク |
| ハ. 制動トルク | ニ. 速指検流計 |
| ホ. 電流感度 | ヘ. 電圧感度 |

第三章 抵抗の測定

(I) 中位抵抗の測定

1. ホイートストーンブリッジの原理 $\frac{1}{10}$ オーム乃至 10^6 オームの中位抵抗の測定には、ホイートストーンブリッジ (Wheatstone bridge) の原理を用ひる。

抵抗 P, Q, R, S を第 3-1 圖甲の様に接続し、 ab 間に電池 B を、又 cd 間に検流計 G を接続する。 K_1, K_2 は夫々電池回路及び検流計回路を



ホイートストーンブリッジの原理

閉閉する電鍵 (key) である。此の装置をホイートストーンブリッジと稱し、 P, Q, R, S をブリッジの邊 (arm) と稱する。 P, Q, R の抵抗の値を適當に調整して、 K_1 を閉ち次に K_2 を閉ちた時、若し検流計が振れを生じない場合には、検流計には電流が通じないから c, d は同電位であり P, Q に通ずる電流は相等しく i_1 で、又 R, S の電流は相等しく i_2 である。 c 點と d 點とは同電位であるから、 ac 間の電壓降下は ad 間の電壓降下に等しく、又 cb 間の電壓降下は db 間の電壓降下に等しい。即ち次の二式が成立する。

$$P i_1 = R i_2$$

$$Q i_1 = S i_2$$

下の式を上式の邊々割ると次の關係を得る。

$$\frac{Q}{P} = \frac{S}{R}$$

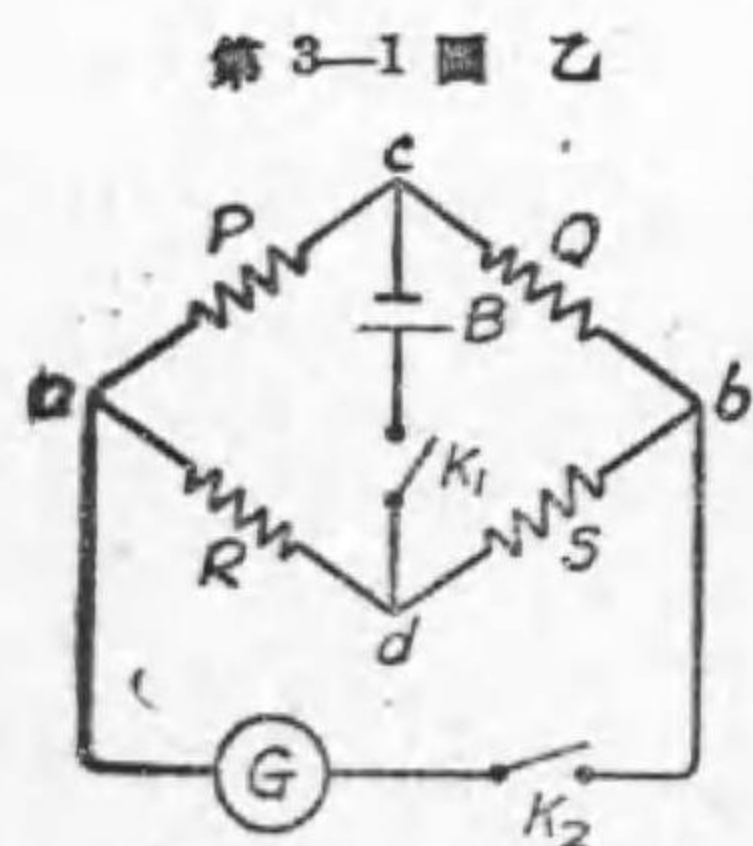
$$\text{又は } PS = QR$$

斯様に甲圖に於て、檢流計に電流通じない場合（即ち平衡した場合）は、相對した邊の抵抗の相乗積は相等しい關係があるのである。此の關係から四邊の抵抗中の一つの測定すべき抵抗 S は他の三つの既知抵抗 P, Q, R で計算する事が出来る。即ち

$$S = \frac{Q}{P} R$$

例へば、 $P=10$ オーム、 $Q=100$ オーム、 $R=123$ オームなる時、檢流計の振れが零であつたならば、 S は次の如くである。

$$S = \frac{Q}{P} R = \frac{100}{10} \times 123 = 1230 \text{ オーム}$$



第 3-1 圖甲の接続で、電池と檢流計とを置換して、第 3-1 圖乙の様に接続した場合でも、檢流計に振れを生じない場合には、 $PS=QR$ なる關係が成立するものである。（練習例題として之れを證明せよ）。

注意 I. 第 3-1 圖甲及び乙の二種の接続法中何れが良いかと云ふと、檢流計回路の抵抗は電池回路の抵抗より大なるが普通であつて此の場合には、 P, Q, R, S の四箇の抵抗中、二つの大なる抵抗の接続點と、他の二つの小なる抵抗の接続點との間に檢流計を接続し、他の二點間に電池を接続した場合が感度がよいのである。例へば、 P, Q が大で、 R, S が小なる場合（又は P, Q が小で、 R, S が大なる場合）には、甲圖の接続が乙圖の接続より

感度が良いのである。若し又 P, R が大で、 Q, S が小なる場合（又は P, R が小で、 Q, S が大なる場合）には乙圖の接続にした方がよい。

（尚ほ S を除いた各部分の抵抗が任意に變へ得る様な場合には、檢流計回路の抵抗、電池回路の抵抗、 P, Q, R が皆 S に等しい時に感度が最も良いのである。）

注意 II. 測定の際は、必ず電池電鍵 K_1 を閉ち、暫くしてから檢流計電鍵 K_2 を閉ちて、平衡點を見出すべきである。何故ならば、回路に自己インダクタンスを有して居る様な場合だと、若し反對に檢流計電鍵 K_2 を閉ちてから電池電鍵 K_1 を閉ちると、 K_1 を閉ちる瞬時に自己誘導起電力を生じ、此の爲に平衡を見出し難いからである。又電鍵を開くには、 K_2 を開いてから K_1 を開く。

ホイートストーン・ブリッジ法を直ちに行ふ装置に次の實例がある。

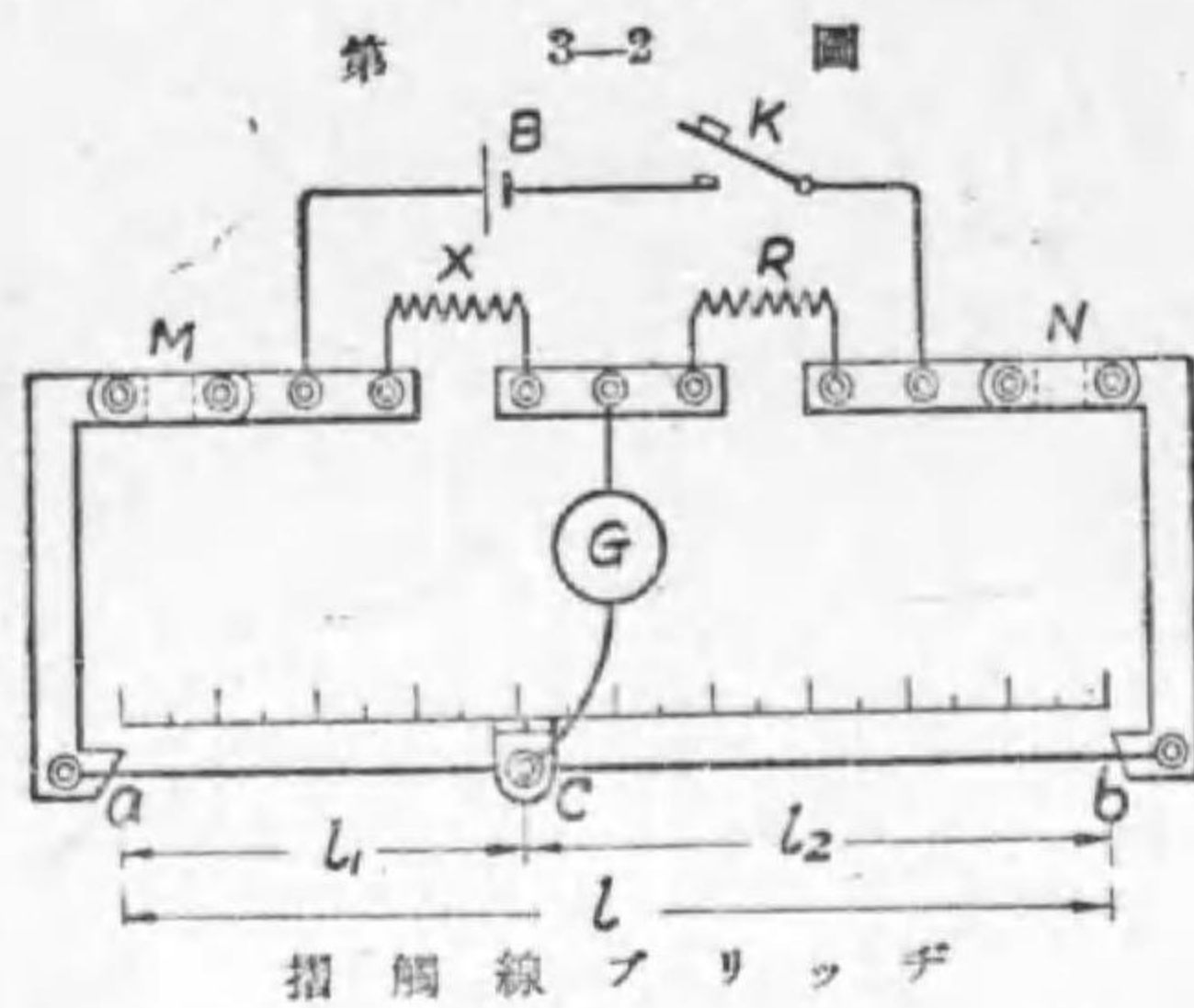
- (1) 摺觸線ブリッジ (slide-wire bridge)
- (2) 栓型ブリッジ (plug-pattern bridge) 之れには更に次の二種の方式がある。

(イ) 直列型ブリッジ (series-pattern bridge)

(ロ) 遞變型ブリッジ (decade-pattern bridge)

尚ほ以上の外に、刷子型 (dial pattern) の遞變型ブリッジもある。

2. 摺觸線ブリッジ 摺觸線ブリッジは一名メートル・ブリッジ (metre bridge) とも稱し、第 3-2 圖に示す構造である。 ab は長さ約 1 メートルの摺觸線で、マンガニン（又はプラチナム・シルバー又はプラチノイド）線を用ひ、全長を通じて太さ一様で單位長毎の抵抗 r が一定なるものである。 c は檢流計の一端に接続された摺動子で、之れは摺觸線に沿うて摺動さすことが出来、常には發條により摺觸線と接觸して



居ないが、之れを上から押せば摺觸線と一點で接觸する様になつて居る。即ち c は檢流計電鍵を兼ねて居る。 X は被測抵抗、 R は X と略々同じ程度の値の既知標準抵抗である。今電池電鍵を閉じて、摺動子 c を摺觸線に沿うて摺動して、之れを押して檢流計の振れが零となつた場合の c の位置が圖に示す通りとする。 ac の長さを l_1 、抵抗を P 、又 cb の長さを l_2 、抵抗を Q とせば、 $P=rl_1$ 、 $Q=rl_2$ である。(但し r は摺觸線單位長の抵抗とする)。ホイートストーン・ブリッジの原理により、

$$XQ=PR$$

$$\therefore X=\frac{P}{Q}R=\frac{rl_1}{rl_2}R=\frac{l_1}{l_2}R$$

即ち被測抵抗 X は上式で算出される。摺觸線には之れに沿うて目盛を備へ、 c の位置から直ちに $\frac{l_1}{l_2}$ の比を知る事が出来る様に目盛つて置くと、此の比 $\frac{l_1}{l_2}$ を R に乗じて直ちに抵抗 X が求められる。

測定の確度を良くする爲には、 c が摺觸線の略ぼ中央附近で平衡する様に、標準抵抗 R は X に略ぼ等しいものを用ふべきである。 X が非常に大なる抵抗の場合には、 M, N に於ける短絡片を取除き、夫々等しい抵抗 $M=N$ を接続する。但し M, N の値は摺觸線の抵抗 $r(l_1+l_2)=rl$ の n 倍のものを使用して、 c が摺觸線上にて平衡する様なものを選ぶ。此の場合

合に平衡した時は、

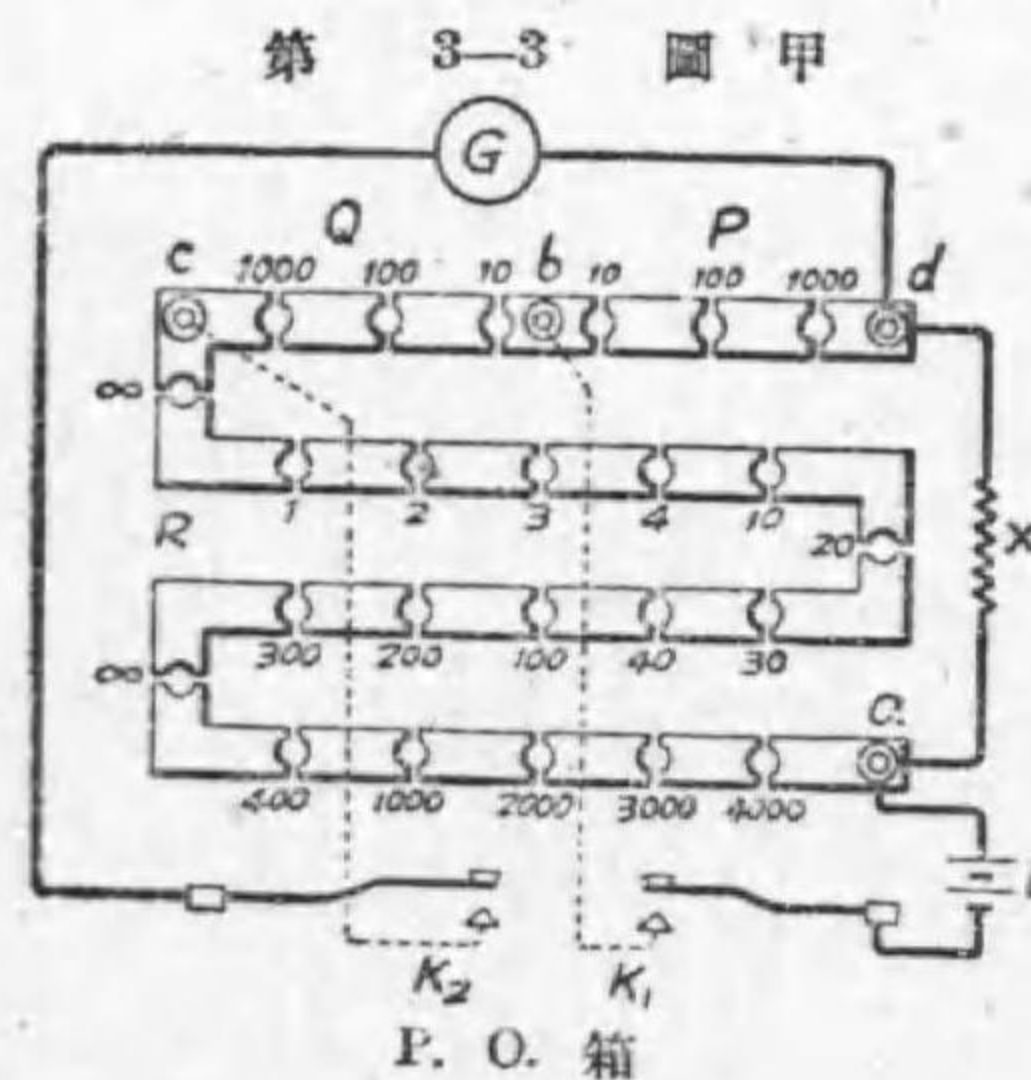
$$\frac{X}{R}=\frac{M+rl_1}{N+rl_2}=\frac{nr(l_1+l_2)+rl_1}{nr(l_1+l_2)+rl_2}=\frac{n(l_1+l_2)+l_1}{n(l_1+l_2)+l_2}=\frac{nl+l_1}{nl+l_2}$$

之れから被測抵抗 X を算出する。

3. 栓型ブリッジ

栓型ブリッジは、抵抗線輪の兩端を接続せる各金属片間に設けられた孔に、金属栓を挿したり又は抜いたりして抵抗を増減する事が出来る様になつた抵抗器を用ひたブリッジである。之れには抵抗線輪の配列に二様の方式がある。即ち、栓を孔から抜いた場合其處の抵抗が其の回路に直列に加はる様になつて居る直列型 (series pattern) のものと、栓を孔に挿すと其處に記入せる數字丈の抵抗が加はる様になつて居る遞變型 (decade pattern) とがある。

(イ)直列型ブリッジ 第 3-3 圖甲は普通 P. O. 箱 (Post-Office box)



と稱せられる直列型ブリッジに屬するもので、最も普通に使用される。圖で、 P 及び Q は各 10 オーム、100 オーム、1000 オームの三箇の線輪から成り、 R は 1 オームから 11110 オーム迄 1 オーム宛變へ得る様な組合せで出来て居る。

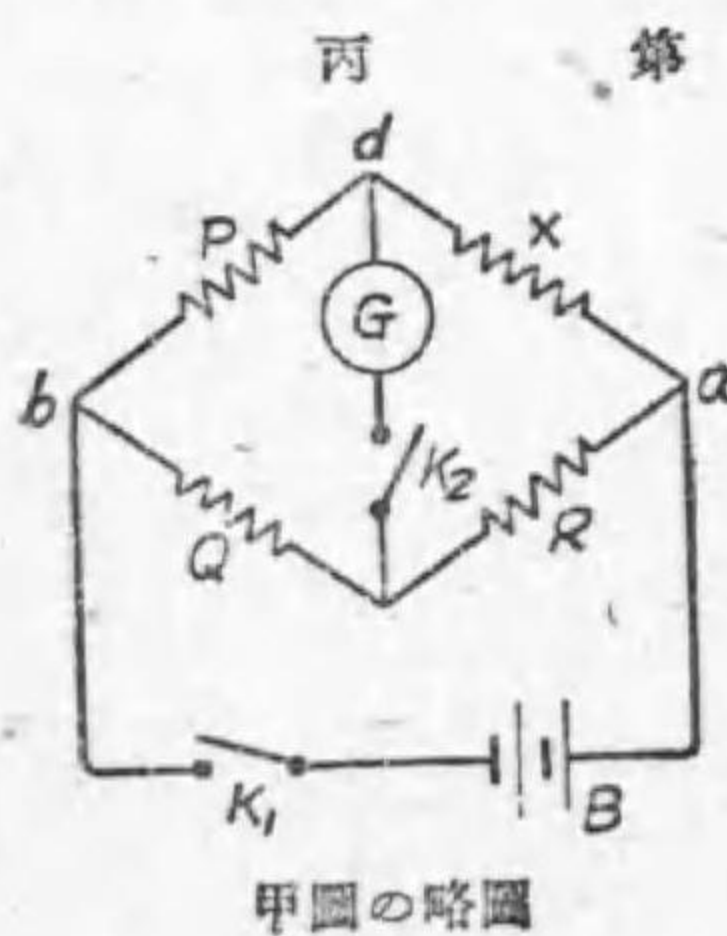
各抵抗線輪はマンガン (又はプラチナム・シルバー、或はプラチノイフ) から出来て、高抵抗のものは細い線、低抵抗のものは太い線を用ひてある。各線輪は二重絹巻線を用ひ金属棒の上に往復二本並べて所謂無誘導巻にしてある。線輪の兩端は乙圖に

示す様に金属片 bb に接続せられる。 bb は相対して圓錐形の孔を作り、之れに適合する金属栓 P があつて、栓を孔に挿込めば抵抗線輪 c が短絡せられ、栓を抜けば其の線輪が回路内に加はる事になる。

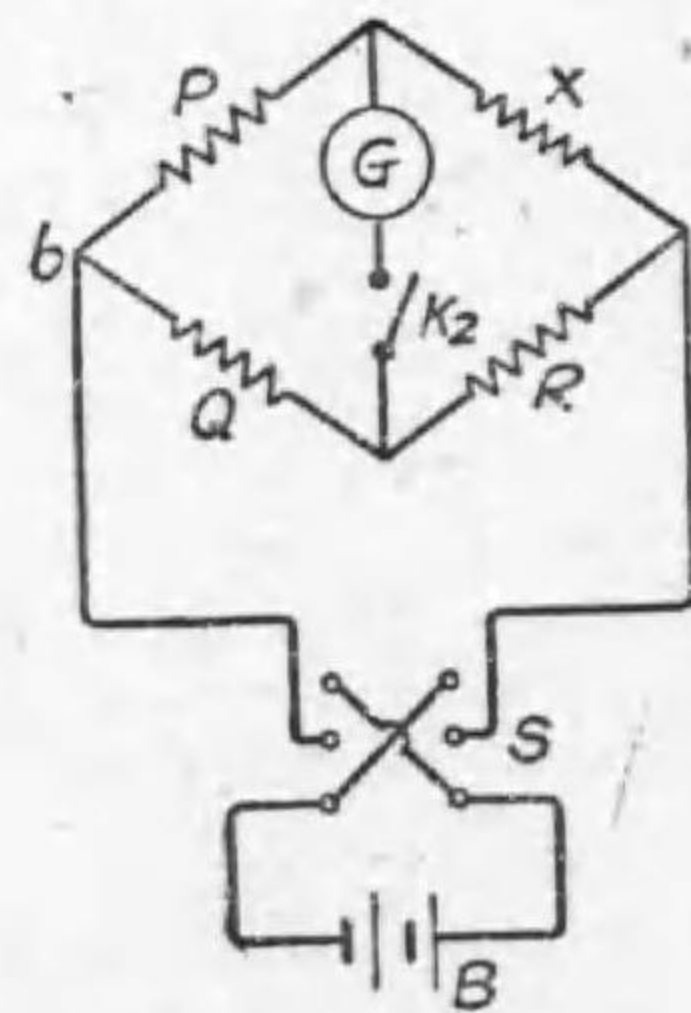
斯様にして各孔の栓の抜き挿しを適當に選ぶと、甲圖に於て $\frac{P}{Q}$ の比は $\frac{1}{100}$ 、

$\frac{1}{10}$ 、 1 、 10 、 100 の何れかにすることが出来、又 R は 1 オームから 1110 オーム迄は如何なる値でも 1 オーム宛變へ得るのである。ブリッチに記入してある数字は抵抗をオームで表はしたものである。又 ∞ なる字を記入した處は抵抗線輪を接続してない處であるから、使用の際は必ず其處に栓を挿すべきである。

被测抵抗 X 、電池 B 、檢流計 G を甲圖の様に接続し、各部の栓を抜いた處の抵抗が夫々 P 、 Q 、 R オームなる時、電鍵 K_1 を押し次に K_2 を押し

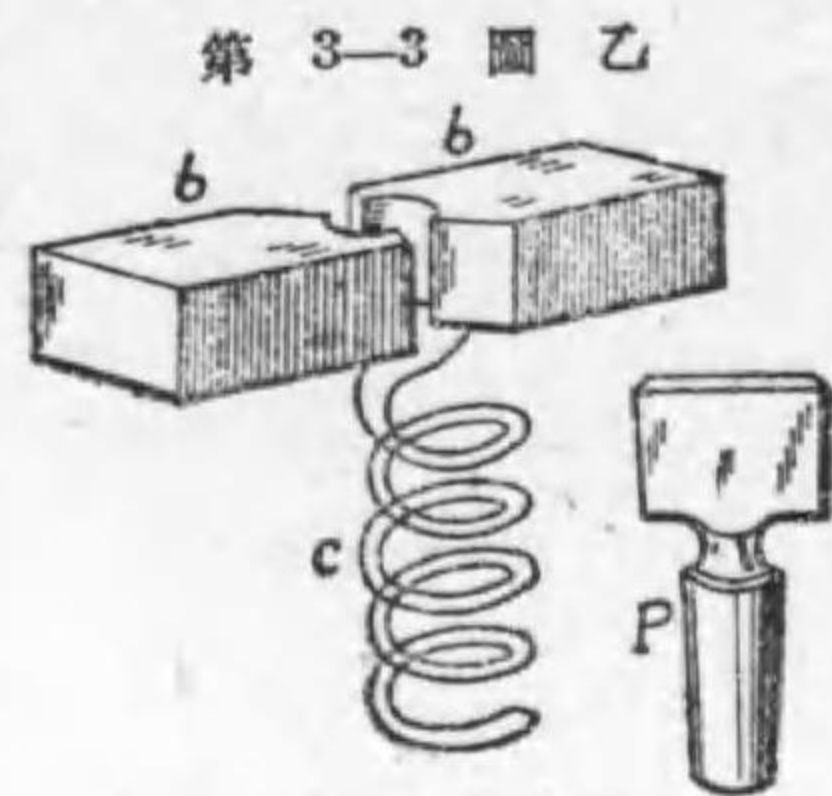


甲圖の略圖



して檢流計が振れなかつたならば、被测抵抗 X は次式で算出される事は甲圖の略圖なる丙圖から明かである。

$$X = \frac{P}{Q} R$$



抵抗線輪と栓

第 3-3 圖 乙

即ち $\frac{P}{Q}$ なる簡單の比に平衡を得た時の R の値を掛けると被测抵抗が求められる。此の P 、 Q を比例邊 (ratio arm) と稱する。

尙ほ接続點に於ける熱起電力の影響を避けるために、第 3-3 圖丁に示す様に電池の極を轉換する轉換器 S を装置し置き、 S を上に閉じて電流を一方向に通じて平衡を得て測定した X の値 (之れを X_1 とし) と、次に S を下に閉じて電流を反對方向に通じて平衡を得て測定した X の値 (之れを X_2 とす) との平均値 $(\frac{X_1 + X_2}{2})$ を以つて X の値とすべきである。此の理由は、接続點に於ける熱起電力による熱電流の方向は、電池の極の接続如何に拘らず一定であるから、電池からの一方向の電流とは相加はるが、反對方向の電流とは相減する事になるから、二回の測定の平均値を取れば熱電流の影響は除外される事になるのである。

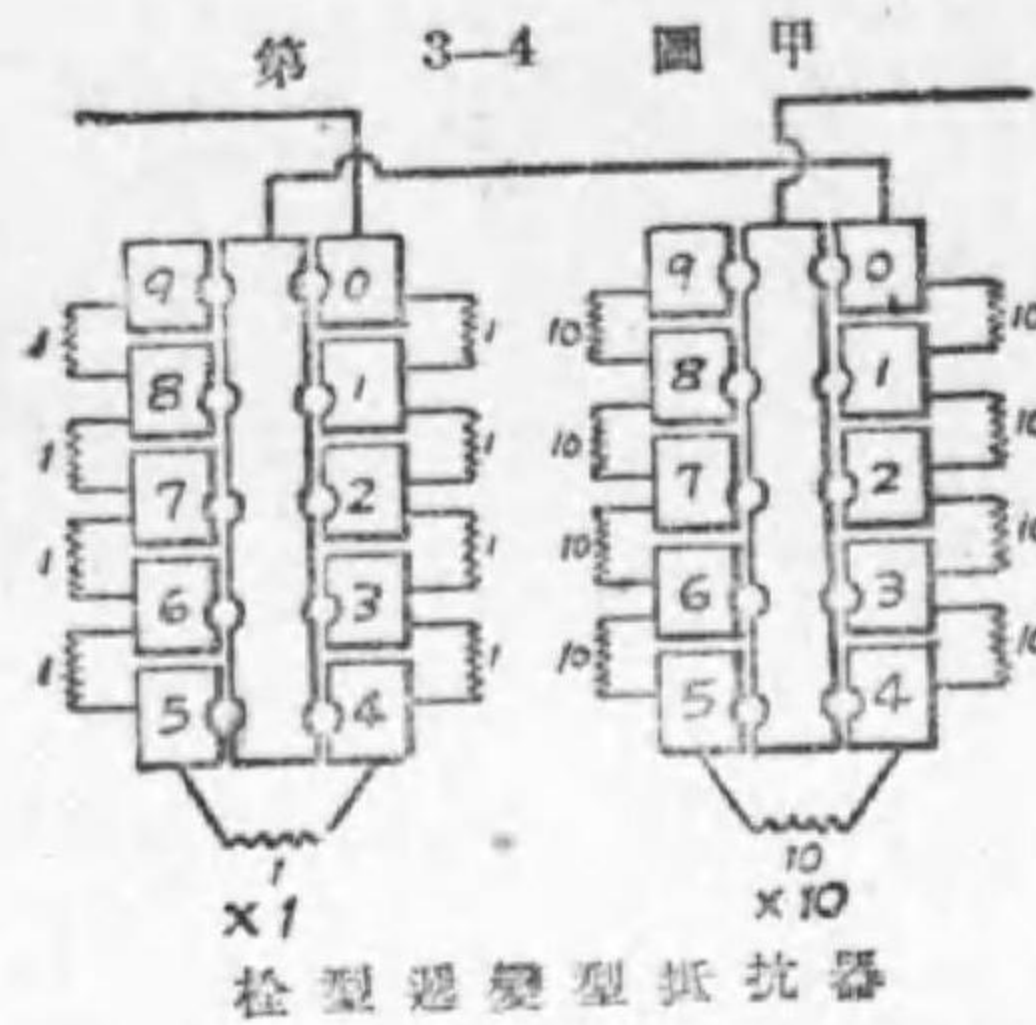
第 3-3 圖 戊



横河電機製 P. O. 箱

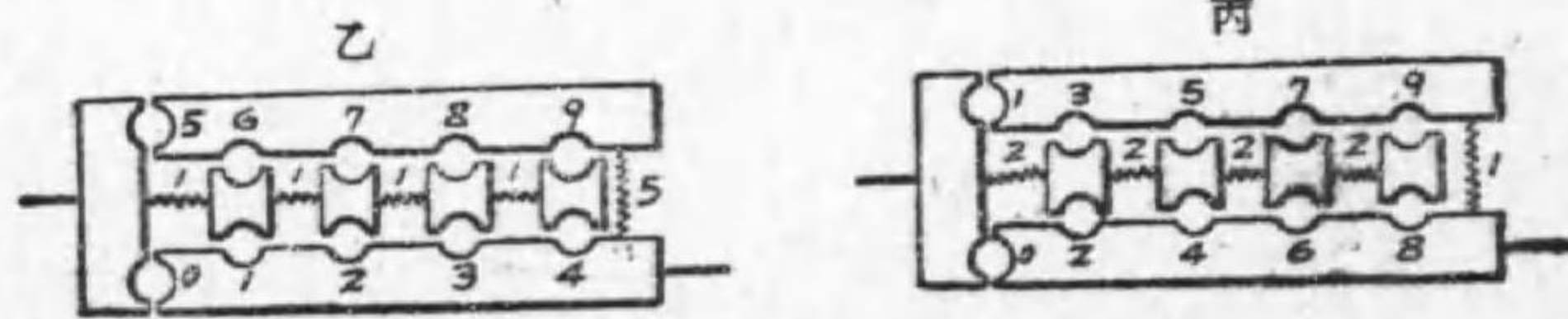
P. O. 箱の缺點は、加減抵抗 R の値を得るに際し、一つの栓を抜くと他の栓が弛んで接觸が悪くなる傾向があるから、測定中時々栓を締め直す必要がある。又 R の同一値の抵抗を得るにも栓の抜き方が幾通りもあるから残つた栓の数も色々違ひ、従つて全體の接觸抵抗も色々違ふのである。此の接觸抵抗の影響は大なる抵抗を測定する場合には大なる誤差とはならないが、低い抵抗を測定する場合には誤差が大となるものである。戊圖は横河電機製作所製 P. O. 箱の外形を示す。

(ロ) 遞變型ブリッチ 第 3-4 圖甲は遞變型ブリッチの加減抵抗 (即ち P. O. 箱の R に相當する抵抗) の抵抗線輪の配置方式の一部分を示す。



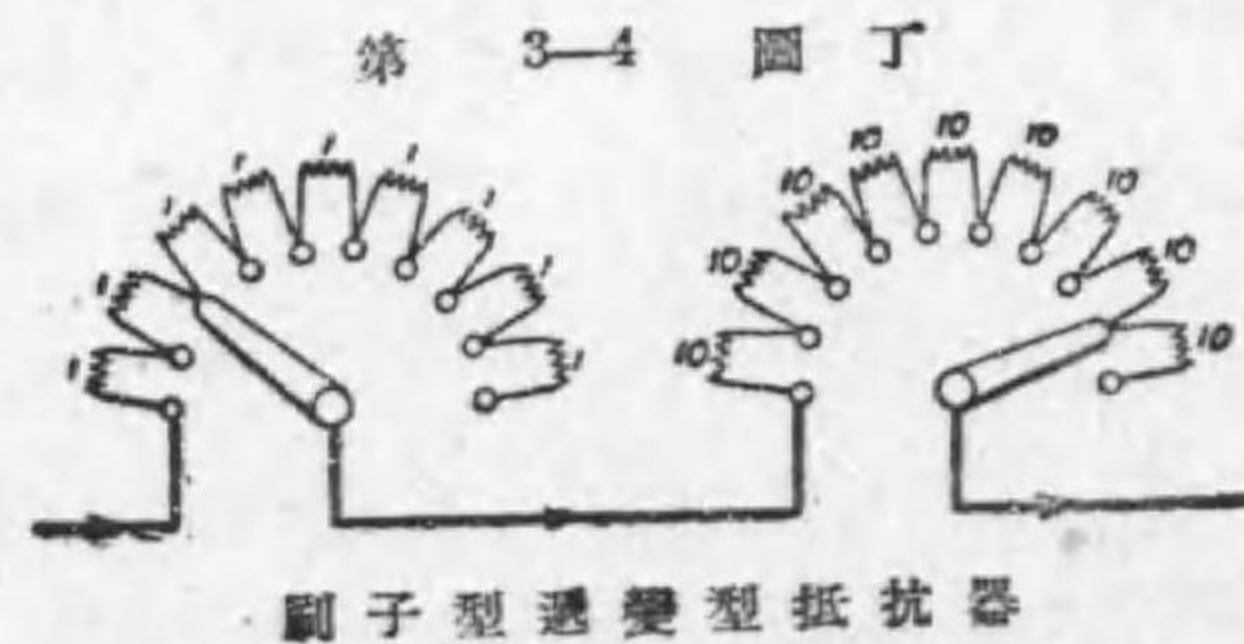
第 3-4 圖 甲
 図に示す様に、各組は 9 個の抵抗線輪から成る。即ち 1 オーム組は 1 オーム線輪 9 個から成り、10 オーム組は 10 オーム線輪 9 個から成る。同様に 100 オーム組、1000 オーム組等もある。各組に対して栓を只 1 個宛を使用するのである。(例へば、18 オームを得たければ、10 オーム組の 1 の孔と、1 オーム組の 8 の孔と、100 オーム組の 0 の孔、及び 1000 オーム組の 0 の孔との 4 個處に栓を挿せばよい。) 従つて変換型では、栓の数は常に一定して居て、而も抵抗の値を變へる毎に栓を締めるか

第 3-4 圖



ら、直列型の P. O. 箱に於ける缺點は總て除かれる譯である。乙、丙も夫々変換型の 5 個の線輪の特殊の配列法を示す。甲では各組に付き 9 個の抵抗線輪を要するが、乙丙では各組に 5 個を用ひてある。

第 3-4 圖丁は刷子型抵抗器を示すもので、甲に於ける栓の代りに接觸子を廻はすことによつて抵抗を變化せしめる変換型である。

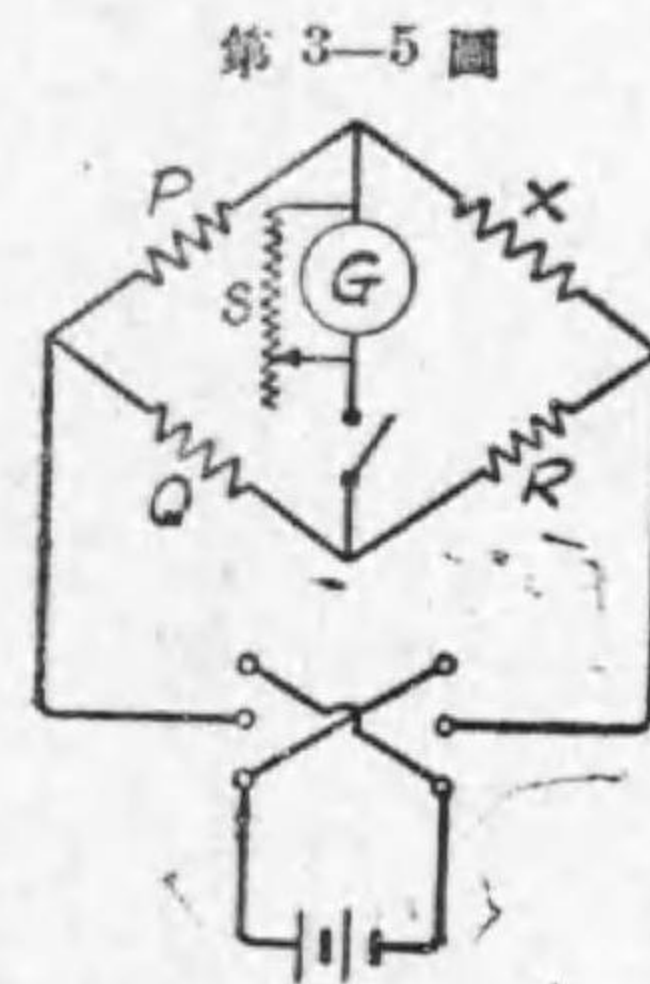


第 3-4 圖 丁
刷子型變換型抵抗器

4. ホイートストーン・ブリッジの實際使用法

ホイートストーン・ブリッジに依り抵抗を測定する順序を簡単に述べて置かう。

第 3-5 圖に示す様に被測抵抗 X を接続する。検流計 G には分流器 S を併用する。(或は分流器の代りに、加減高抵抗を検流計に直列に使用



第 3-5 圖

してもよい。) 之れは検流計に大電流を通す事を避ける爲である。先づ X の値の大體の見當を付ける。それには、 $P=Q$ にして置き、 R の値を最大 R_1 にした場合と、最小 R_2 にした場合との検流計の振れを見る。此の二回の振れが互に反對の方向ならば、平衡すべき R 従つて X の値は、此の R の最大 R_1 と最小 R_2 との間にあつて R_1 の時の振れと R_2 の時の振れとを比較してその小

なる場合の値に近い値である事が判る。次に R の値を R_1 より小なる R_1' にした場合と、 R_2 より大なる値 R_2' にした場合との検流計の振れを見て、此の二回の振れが反對ならば、平衡すべき R 従つて X の値は R_1' と R_2' との間にあつて、検流計の振れの小なる場合の値に近い値である事が判る。斯様にして順次 R の値の上下から追ひつめて行き、平衡すべき R の値を求めて行く。大體の平衡が取れてから分流器 S の抵抗を増し(又は検流計の直列加減抵抗の値を減じ)て最後には検流計のみを用ひる。

上述の様にして、平衡すべき大體の R の値が判つたら、次に $\frac{P}{Q}$ なる比を $\frac{1}{10}$ (又は $\frac{1}{100}$, 10, 100 等) と取つて、又前と同様に上下から追ひ

つめて平衡すべき R の詳細の値を求めるのである。此の場合 $R=R_0$ の時平衡を得たとすれば、

$$X = \frac{P}{Q} R_0$$

若し $\frac{P}{Q}$ の比を如何様にも選んでも、 R の値の最小変化をさせても検流計の振れが零とならずに、例へば $R=253.8$ オームの時、右に尺度上で 6 mm 振れ、 $R=253.9$ オームの時に左に 9 mm 振れたとすれば、平衡を得べき R の値 R_0 は次の様に比例で算出する。

$$R_0 = 253.8 + (253.9 - 253.8) \times \frac{6}{6+9} = 253.84 \text{ オーム}$$

従つて X の値は、 $X = \frac{P}{Q} R_0$ で算出される。此の様に R の変化の最小変化でも検流計の振れが零とならない場合に、 R の最小の変化をして二回の互に反対方向の振れを読み上述の様に比例法を使用して、平衡すべき R の値 R_0 を求める方法を内挿法 (interpolation) と稱する。

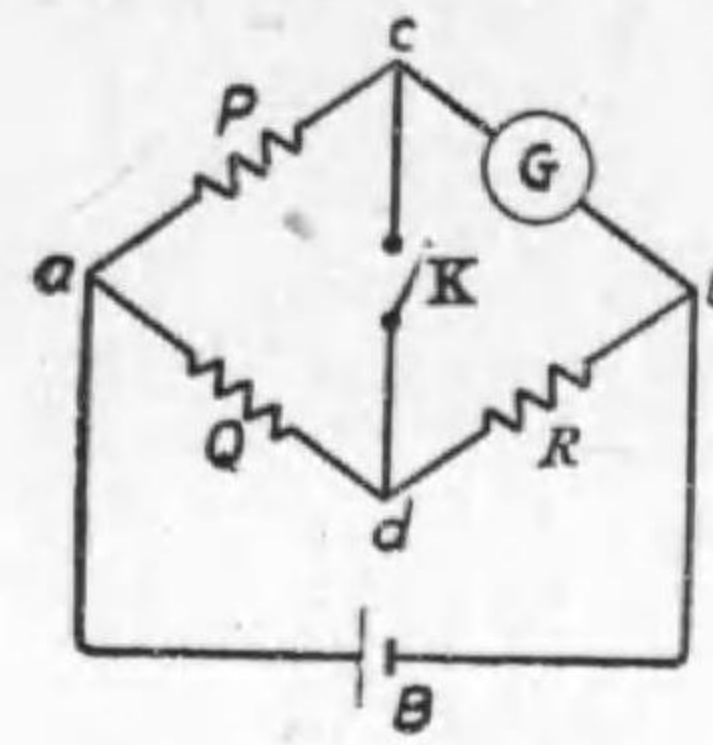
尙ほ第 1 節に述べた注意 I, II 及び第 3 節に述べた熱起電力に対する注意は守るべきである。

5. 検流計の抵抗測定法 [ケルヴィン法]

ホイートストーン・ブリッジの原理を應用し、検流計の抵抗を他の検流計を使用しないで測定するケルヴィン法 (Kelvin's method) を述べよう。

第 3-6 圖はケルヴィン法を示すもので、測定すべき検流計 G をホイートストーン・ブリッジの一辺に接続し、 a, b 間に電池を、又 c, d 間には電鍵 K を接続する。電鍵 K を閉ぢたり開いたりして見ると、一般に

第 3-6 圖



ケルヴィン法

は検流計の振れは K を閉ぢた時と開いた時と違ふ。若し P, Q, R の値を適當に加減して見て、 K を閉ぢても開いても検流計の振れが不變である場合があれば、此の場合には c, d 間に電流が流れず、 c と d とは同電位である。故に、

$$G = \frac{P}{Q} R$$

で検流計の抵抗 G は算出される。

勿論ケルヴィン法を用ひずに、 cd 間に他の検流計 G_0 を接続して、 G_0 の振れが零なる場合にも、 $G = \frac{P}{Q} R$ なる事は明かである。

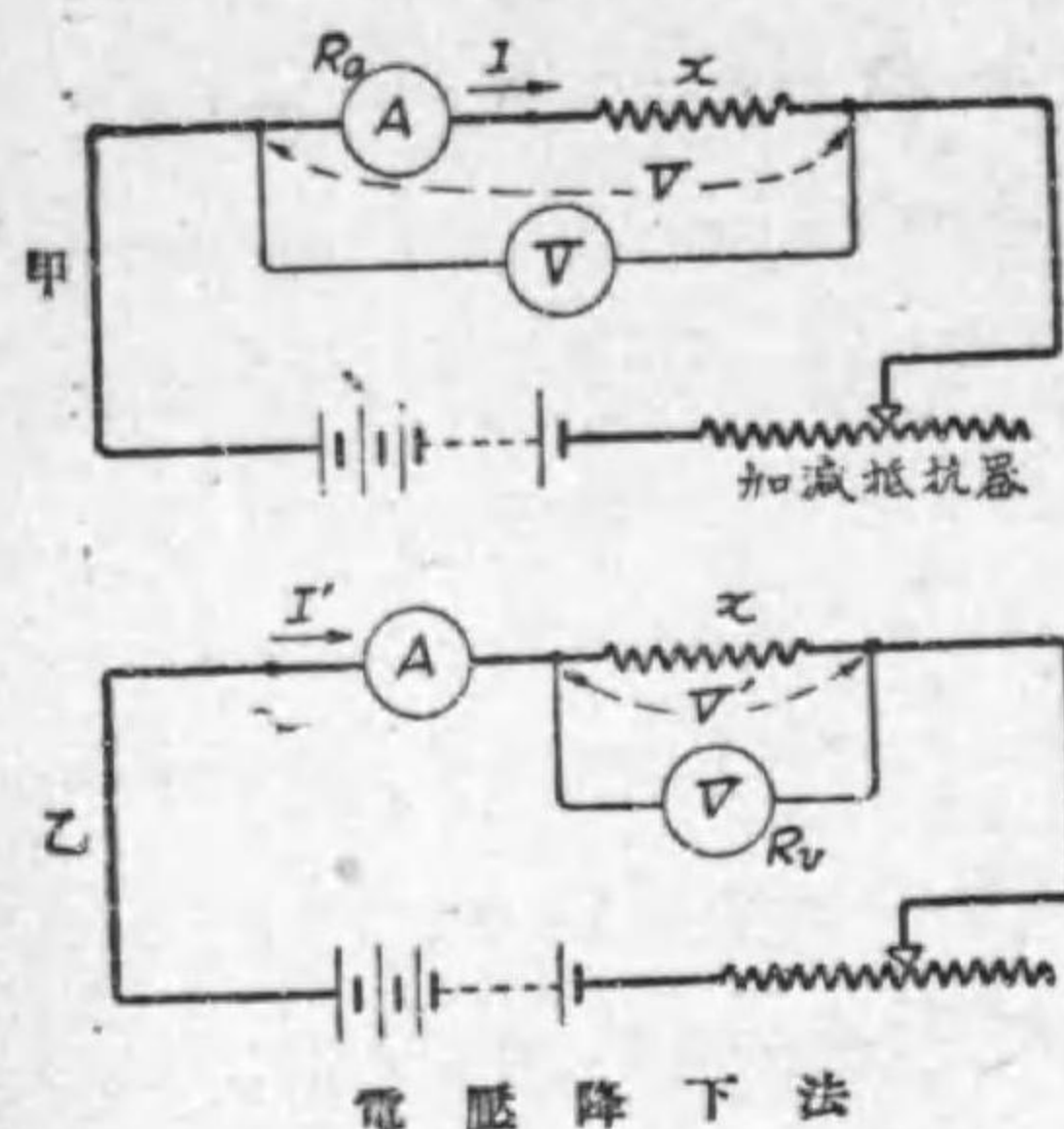
6. 電圧降下法

オームの法則から、被测抵抗 x に通する電流で、被测抵抗の両端の電圧降下を割れば x が求められる。故に電流計と電圧計とを用ひて抵抗を測定する事が出来る。直流電圧計及び電流計の根本の動作原理はガルソンプール検流計と同一である。之れ等の電圧計及び電流計の構造は後章に詳しく述べるが、電流計は抵抗の極く小なるもので、目盛盤にはその端子に流入する電流値が指針で指される様に目盛されており、又電圧計は抵抗の大なるもので、目盛盤にはその両端子間の電圧が指針で指示される様に目盛されてある。

電圧計及び電流計を接続するには第 3-7 圖甲及び乙の如く二様の方法がある。

今 R_0 を電圧計の抵抗、 R_a を電流計の抵抗とし、 x を被测抵抗とせば、甲圖の場合、電流計 A の読みは x を通る電流であるが、電圧計 V の

第 3-7 圖



等しいから、

$$x = \frac{V'}{I' - \frac{V'}{R_v}} \quad (\text{ロ})$$

(イ) に於て、 IR_a が V に比して極めて小なる場合は、 $x = \frac{V}{I}$ と見做してよい。又 (ロ) に於て、 $\frac{V'}{R_v}$ が I' に比して極めて小ならば、 $x = \frac{V'}{I'}$ と見做してよい。従つて甲圖は R_a が x に比して極めて小なる場合、乙圖は R_v が x に比して極めて大なる場合に用ふるに便利である。

此の方法は x に生ずる電圧降下を測定して抵抗を算出するものであるから、電圧降下法 (fall of potential method) と稱せられ、精密を要しない工業的方法であつて、電機子の抵抗や界磁線輪の抵抗測定に屢々用ひられる。殊に白熱電球の抵抗の如き電流の値により抵抗の値が變る様なものには、此の電圧降下法が適當して居る。

読みは x の両端の電圧と電流計内の電圧降下との和に等しいから、

$$x = \frac{V - IR_a}{I} \quad (\text{イ})$$

但し V は電圧計の読み、 I は電流計の読みである。

乙圖の場合には、電圧計 V の読み V' は x の端子電圧であるが、電流計 A の読み I' は x を通る電流と電圧計を通る電流との和に

(II) 低抵抗の測定

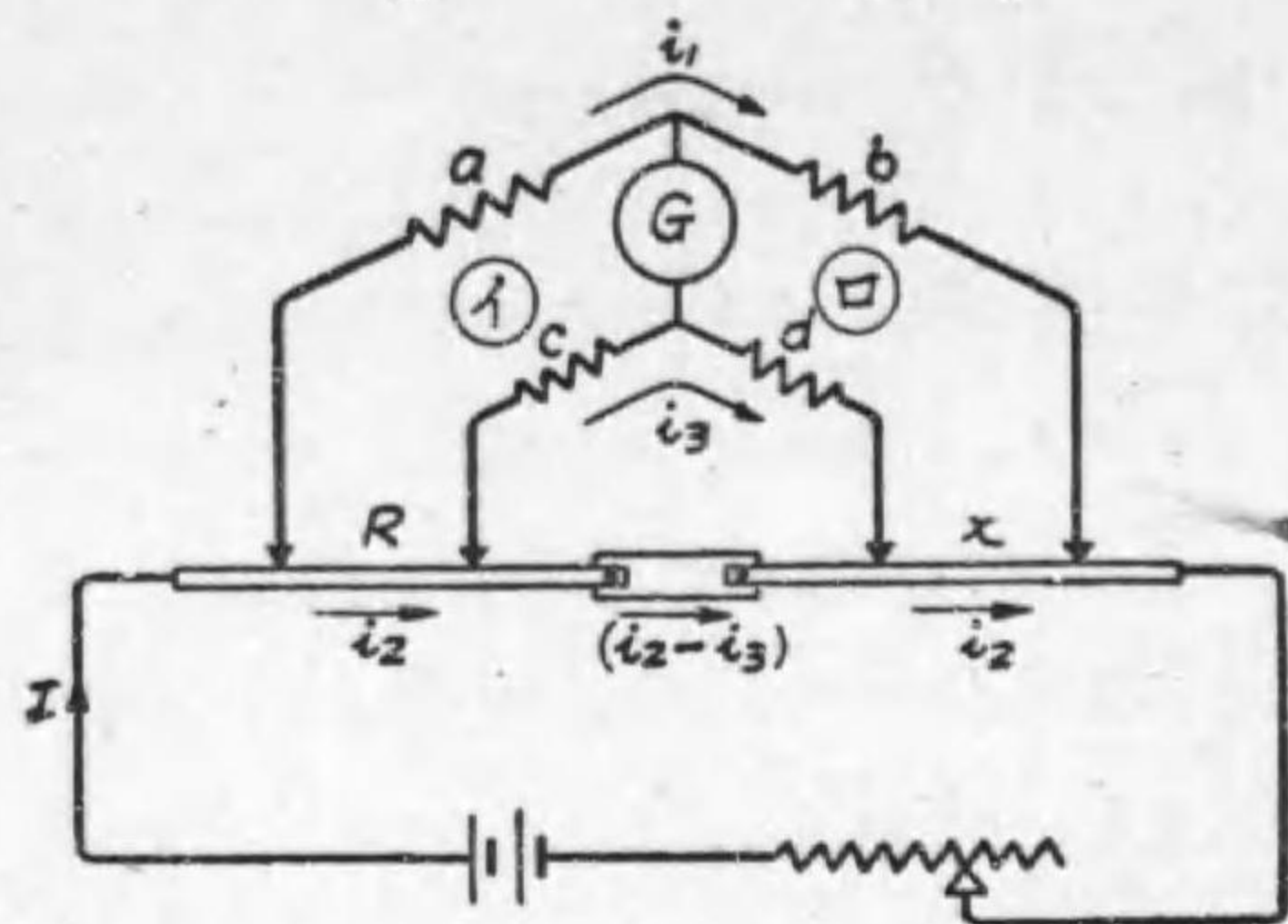
7. 低抵抗測定の要件 0.1 オーム以下の低抵抗の精密測定にはホイートストーン・ブリッジは適しない。

何故なれば、ホイートストーン・ブリッジでは低抵抗に対しては感度が悪いばかりでなく、又測定した値には被测抵抗の外に被测抵抗をブリッジに接続するための導線の抵抗及び其の回路の接觸抵抗をも含むからである。導線の抵抗は殆んど一定で、之れに対して被测抵抗が小なる程、全體の抵抗の測定結果に於て僅かの誤差があつても、全體の抵抗の値から導線の抵抗値を引き去つた残りの被测抵抗の値に対しては相當大なる誤差となる。又導線と被测抵抗との間の接觸抵抗は一定では無く、[接觸面の性質、接觸面の大小、接觸面に於ける壓力等によつて異なるものである。故に低抵抗の測定には、電圧端子を設け接觸を完全にして、電流の出入點を抵抗を測定する部分の外に出す方法を用ひる。低抵抗測定法にも種々の方法があるが、次にケルヴィン・ダブル・ブリッジを説明しよう。

8. ケルヴィン・ダブル・ブリッジ 此のブリッジは低抵抗の精密測定用である。

第 3-8 圖はケルヴィン・ダブル・ブリッジ (Kelvin's double bridge) の原理を示すものである。 a, b 及び c, d は二組の比例邊で、常に $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$ なる様にして使用するので、ダブル・ブリッジの名がある。 R は標準低抵抗で、 x は被测低抵抗である。例へば今銅棒の抵抗を測るものとする、先づ銅棒上の接觸點 (即ち電圧端子) 間

第 3-8 圖



ケルヴィン・ダブルブリッジ

の距離を 50 cm とし、
R 上の電圧端子の位置
を適當に調整して其の
電圧端子間の抵抗の値
を読み、之れを R と
す。a, b, c, d を常に
 $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$ なる比を保た
しめながら加減して検
流計の振れを零ならし

める。然る時は、此の銅棒の電圧端子間の抵抗 x は次式で算出される。

$$x = \frac{b}{a} R = \frac{d}{c} R$$

次に之れを説明しよう。検流計には電流が流れて居ないから、各部に通ずる電流は圖に示す様に、 a と b には等しい電流 i_1 、又 R と x には等しい電流 i_2 、又 c と d には等しい電流 i_3 が通ずる。(イ)、(ロ)兩回路にキルヒホッフ法則を適用して次の二式を得る。

$$\begin{cases} ai_1 - ci_2 - Ri_2 = 0 \\ bi_1 - xi_2 - di_2 = 0 \end{cases} \quad \therefore \begin{cases} \frac{a}{c} i_1 = \frac{R}{c} i_2 + i_3 & \text{(イ)} \\ \frac{b}{d} i_1 = \frac{x}{d} i_2 + i_3 & \text{(ロ)} \end{cases}$$

$$\text{然るに、} \quad \frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad \therefore \quad \frac{a}{c} = \frac{b}{d} \quad \text{(ハ)}$$

故に (ハ) より、(イ)、(ロ) の左邊が相等しい事が判るから、(イ)(ロ) の右邊は相等しい。

$$\therefore \frac{R}{c} = \frac{x}{d} \quad \therefore \quad x = \frac{d}{c} R$$

$$\text{(ハ) より、} \quad x = \frac{d}{c} R = \frac{b}{a} R$$

此のダブルブリッジで、標準低抵抗 R 及び被测低抵抗 x は夫々電圧端子間の抵抗であつて、電流端子は夫々 R, x の外部に出してある。而して比例邊の抵抗は大なるものを用ひる故、電圧端子の微小なる抵抗があるとしても、測定結果には之れ等の影響は殆んどないのである。ケルヴィン・ダブルブリッジ装置には種々の構造のものがあるが次節に、比例邊のみを變化して、標準抵抗器は測定範囲に應じ適當の値の固定抵抗を使用するものと、比例邊も標準抵抗も可變のものを用ひるものとの各一例宛を概説しよう。

9. ケルヴィン・ダブルブリッジの實例 第 3-9 圖

甲はシーメンス会社の新型ダブルブリッジで、乙圖はその接續圖を示す。 R_1, R_2, R_3, R_4 が比例邊で、常に $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$ にして使用する。 R_n が

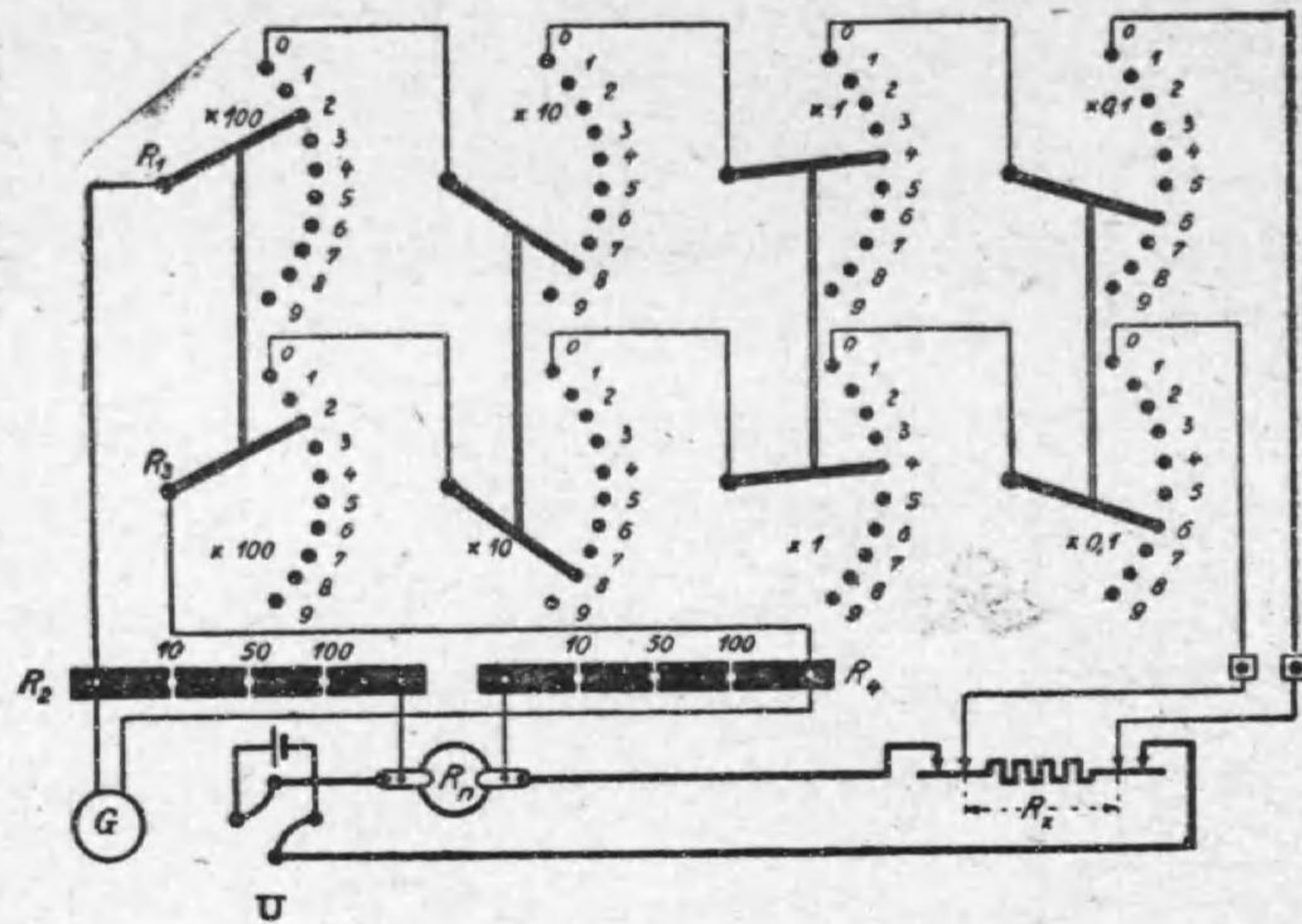


第 3-9 圖 甲
シーメンス新型ダブルブリッジ

標準低抵抗器、 R_x が被测低抵抗である。 R_1, R_3 は刷子型遮變型抵抗で、同時に同一値の抵抗が得られ 0.1Ω の抵抗變化も出来る。 R_2, R_4 は栓型抵抗で、各 10, 50, 100 Ω 三種より成り、同一の値のものを使用する。測定結果に高確度を望む爲に R_1, R_3 は 50 Ω 以上にして使用する。今圖の如く、 R_n を左側に、 R_x を右側

で、各 10, 50, 100 Ω 三種より成り、同一の値のものを使用する。測定結果に高確度を望む爲に R_1, R_3 は 50 Ω 以上にして使用する。今圖の如く、 R_n を左側に、 R_x を右側

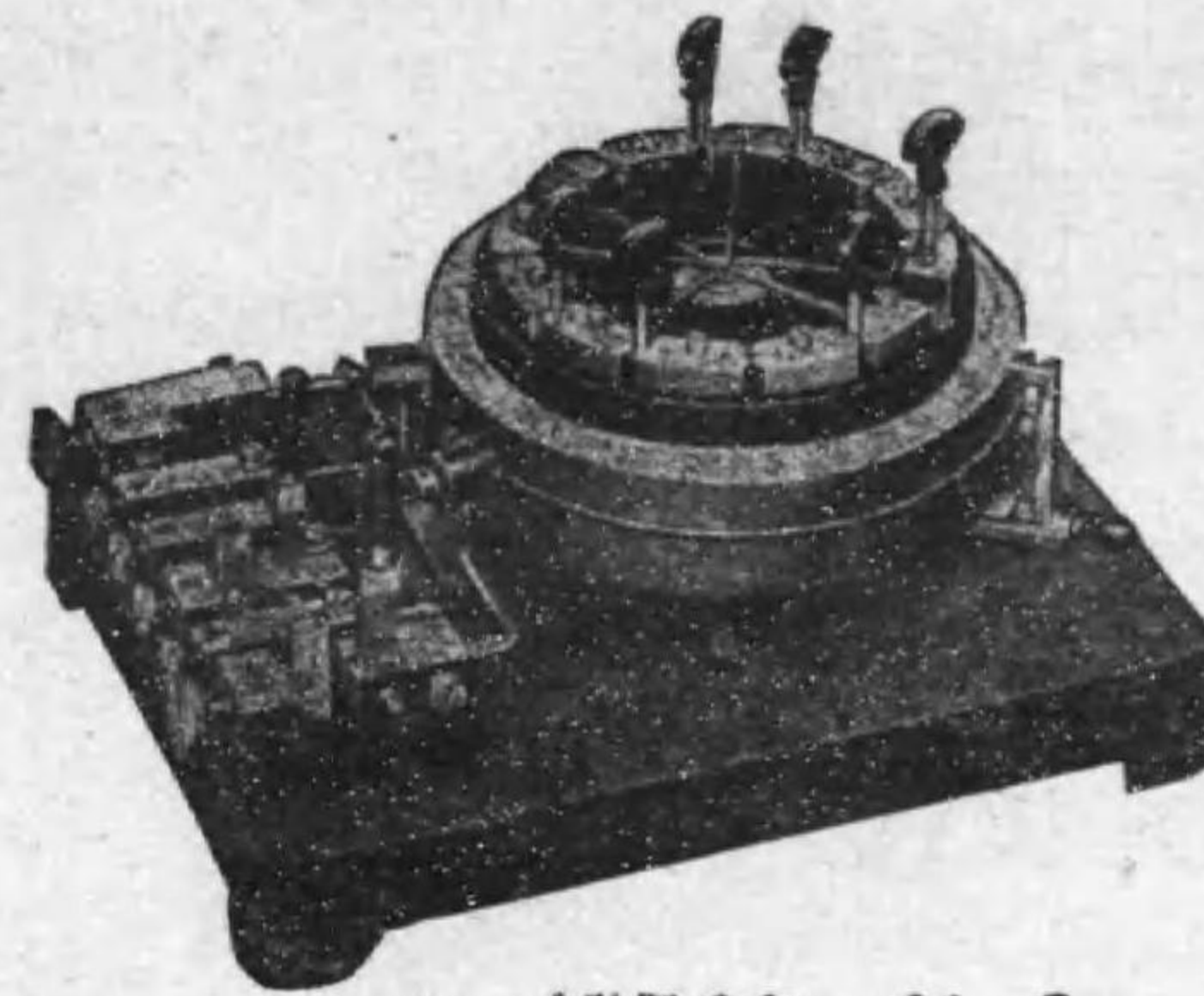
第 3-9 圖 乙



シーメンス新型ダブルブリッジの接続

に接続して平衡した場合は $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_n$ なる関係がある。若し又 R_n と R_x とを交換して R_n を右側に R_x を左側に接続して平衡せる場合は $R_x = \frac{R_2}{R_1} R_n$ なる関係がある。前者の接続にして使用の際は、標準抵抗 R_n として 0.1Ω の抵抗器を用ふれば、最小 0.05Ω から最大 10Ω まで測定出来、又 R_n として 0.0001Ω の抵抗器を用ふれば、最小 0.00005Ω まで測定出来る。後者の接続の場合は、 $R_n = 0.1 \Omega$ 使用の際は 0.001Ω 乃至 0.2Ω の測定範囲で、又 $R_n = 0.0001 \Omega$ を使用の際は最小 0.000001Ω まで測れる。尚ほ熱起電力の影響を除くために、電池の極を U なる轉換開閉器により轉換して、二回測定しその平均を取るべき事はホイートストーン・ブリッジの場合と同様である。

第 3-9 圖 丙

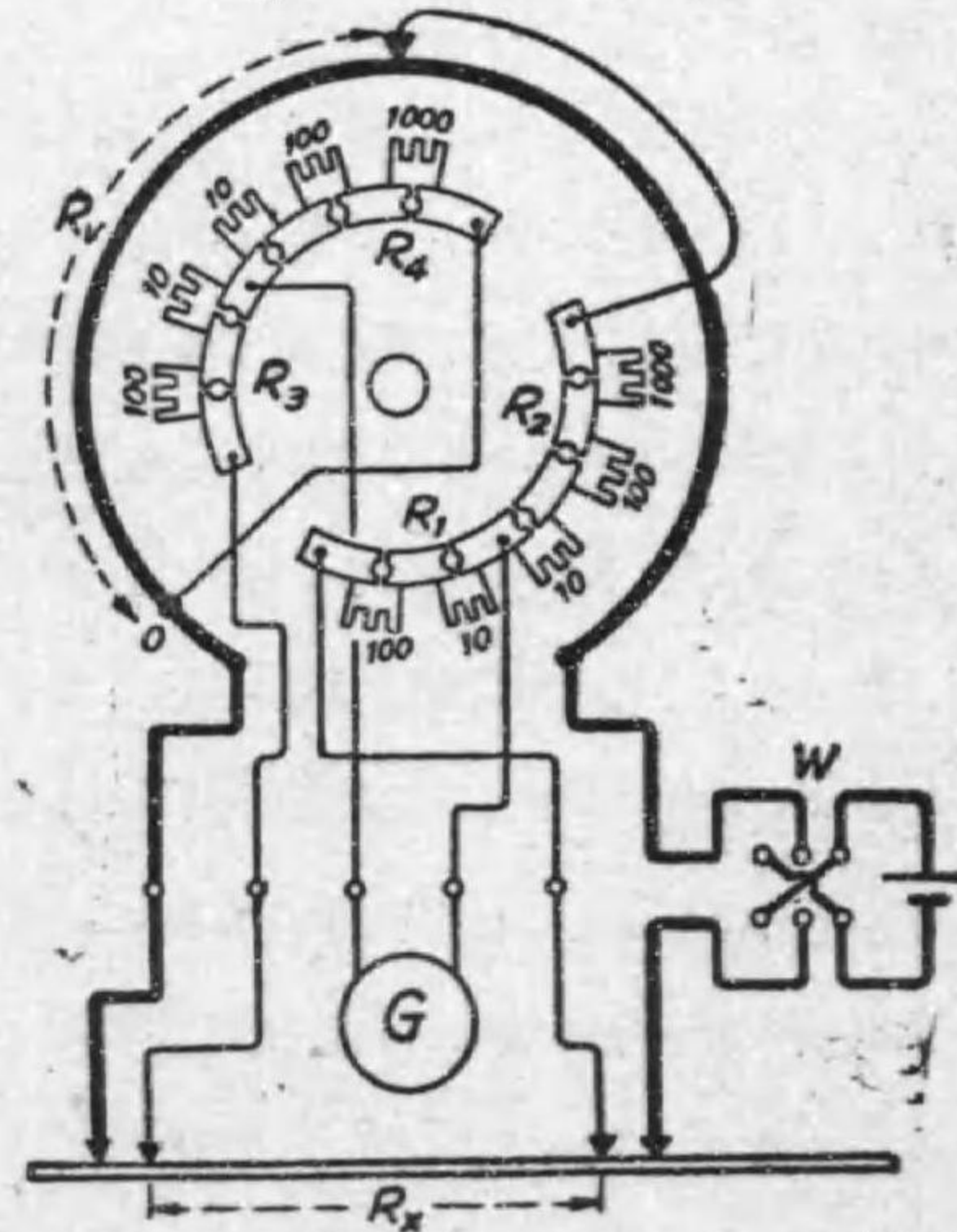


シーメンス会社製ダブルブリッジ

第 3-9 圖丙もシーメンス会社製のダブルブリッジで、丁圖はその接続を示す。これは比例邊も標準抵抗も可變のもので、 R_1, R_2, R_3, R_4 が比例邊で、 $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$ なる様にして使用する。標準抵抗としては R_n なる

摺觸線を用ひて、摺動子の位置から直ちに抵抗値 R_v が読めるのである。 R_x は被测抵抗で、銅線の如きものならばその 50 cm 間の両端に双形の電圧端子をよく接觸せしめる。外側の両端子は電流端子で銅線にしつかりとしめ付ける。戊圖は銅線クランプ装置の一例である。平衡を得た場合は $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_v$ なる関係がある。標準摺觸線には 0.01Ω を使用してあるので、

第 3-9 圖 丁



シーメンス会社製ダブルブリッジの接続

測定範囲は 0.1Ω 乃至 0.000001Ω である。 W は電池の極を變へる轉換

第 3-9 圖 戊



電線クランプ装置

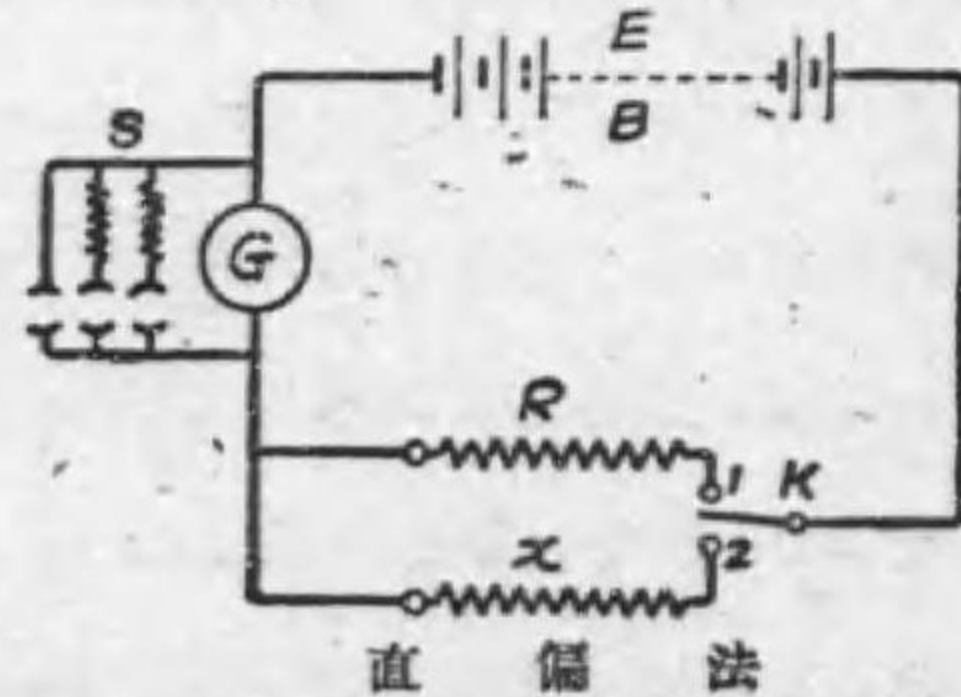
閉閉器である。ケルヴィン・ダブル・ブリッジは低抵抗や短かい銅線の抵抗を精密に測定するに適する。尙ほ電位差計法による低抵抗測定法は後節に述べる。

(III) 高抵抗の測定

10. 直偏法 抵抗の値が1メガオーム以上の高抵抗になると、ホイートストーン・ブリッジ法で之を測定することは困難である。斯様な高抵抗に対しては、ブリッジの比例邊の比を極端に大にする必要がある。然るに抵抗線輪の抵抗の調整上比例邊の比の大なる程精度が低いので、測定結果の誤差が大きくなるのである。又測定 of 感度を相当大きくする爲には高い電圧を必要とするので、線輪の絶縁が不充分だと漏洩電流の爲に誤差が大きくなるのである。

高抵抗の測定法にも種々あるが、その中理論の簡單なる直偏法 (direct deflection method) を説明しよう。第3-10圖は直偏法を示すものである。圖に於て、 R は標準高抵抗で普通十萬オームの抵抗器を用ひる。 x が被測高抵抗である。検流計 G には電流感度の良いものを用ひ、之れに振れを適當

第 3-10 圖



直 偏 法

にする爲に分流器 S を用ひる。電源は 100 ヴォルト乃至 200 ヴォルトの直流を用ひる。先づ切替閉閉器 K を 1 に閉ちて、検流計 G の振れを読み之れを d_1 とする。此の場合の分流器の抵抗を S_1 とすれば、其の倍率は $m_1 = \frac{G+S_1}{S_1}$ である。今電池の起電力を E 、内部抵抗を B 、検流計定数を K とすれば、検流計の電流 i_1 は、

$$i_1 = Kd_1 = \frac{E}{B+R+\frac{GS_1}{G+S_1}} \times \frac{S_1}{G+S_1}$$

$$= \frac{E}{(B+R) \times \frac{G+S_1}{S_1} + G} = \frac{E}{m_1(B+R)+G} \quad (イ)$$

次に K を 2 に閉ちて被測抵抗 x を代入し、分流器の抵抗 S_2 、従つて其の倍率 $m_2 = \frac{G+S_2}{S_2}$ の場合に、検流計の振れを読み之れを d_2 とすれば、此の場合の検流計電流 i_2 は前の場合と同様に、

$$i_2 = Kd_2 = \frac{E}{m_2(B+x)+G} \quad (ロ)$$

(イ) 式を (ロ) 式で邊々割つて、

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{m_2(B+x)+G}{m_1(B+R)+G}$$

$$\therefore x = \frac{m_1 d_1}{m_2 d_2} \left\{ (R+B) + \frac{G}{m_1} \right\} - \frac{G}{m_2} - B \quad (ハ)$$

普通内部抵抗 B 、検流計抵抗 G は高抵抗 R や x に比し極小なる故、かゝる場合は B 及び G を閉却して、次の式で被測抵抗は算出される。

$$x = \frac{m_1 d_1}{m_2 d_2} R \quad (ハ)$$

斯様に直偏法では (ハ) 式から判る様に検流計の振れは抵抗に逆比例す

る。或は又之れを覚えるに次の様にしても良い。(ハ)式より、 $m_1 d_1 R = m_2 d_2 x$ であるから、此の直偏法では分流器の倍率、検流計の振れ及び直列にした抵抗の相乗積は等しくして一定である。標準抵抗 R の値をメガオームを単位とした数値で表はした場合、 $m_1 d_1 R$ なる一定の常数を此の測定法のメガオーム常数 (megohm constant) と稱する。例へば、 $R=100\,000$ オーム $=0.1$ メガオームの標準抵抗を用いた場合は、メガオーム常数は $0.1m_1 d_1$ である。

高抵抗測定の場合は回路の絶縁を完全にすることが特に必要である。何故ならば、絶縁が不完全だとその漏洩電流に対する不明の抵抗が、被测高抵抗と並列になつたものゝ合成抵抗を測定することになつて、測定結果は全然無意味なものとなるからである。

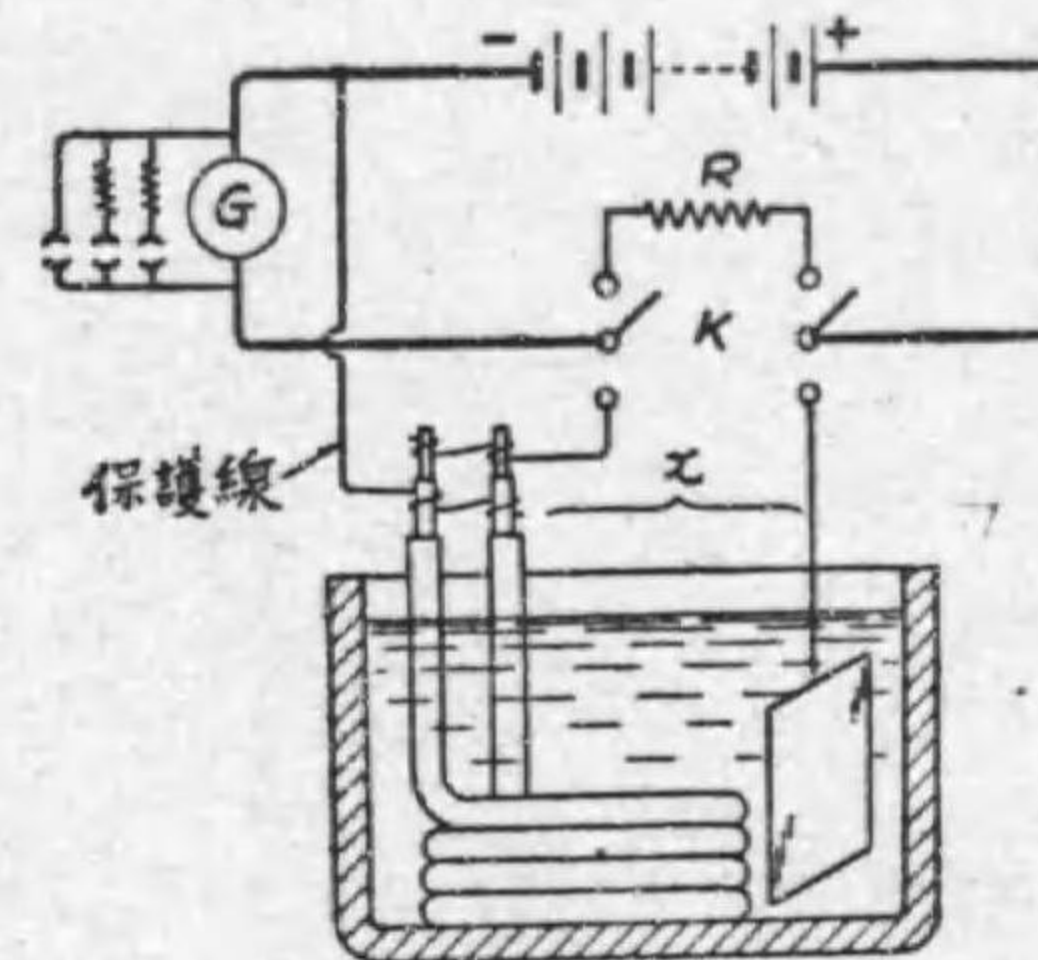
11. 電線又は電纜の絶縁抵抗測定

電線又は電纜の絶縁抵抗と云ふのは、心線と外被との間に電圧を與へた場合、電流が絶縁物を貫いて漏洩するのに反抗する絶縁物の抵抗を云ふので、即ち心線と外被間に與へられた電圧を絶縁物を貫く漏洩電流で割つた値である。絶縁抵抗は高抵抗であるから、直偏法を用ひて測定する事が出来る。

電線又は電纜の心線と外被間に直流電圧を與へた場合は、瞬間的に大なる電流が流れるが之れが急に減少して後次第に漸減する電流が流れ、最後に一定の値に達するのである。此の現象を吸収現象 (absorption) と稱し、漸減電流を吸収電流 (absorption current) と稱する。而して最後の一定値の電流が漏洩電流である。電圧を與へた瞬時から最後の一定の漏洩電流になるまでには電纜等の種類にもよるが長時間を要するものがある。充電

後長い間待つて一定の漏洩電流を求むるのは不便であるから、普通は回路を閉ぢて一分間充電後の電流を求むる規約になつて居る。之れは單に規約に過ぎないので、之れで吸収電流の影響を除外したと云ふ譯ではないのである。斯様に絶縁抵抗測定法は眞の漏洩電流のみで測定するのでなくて規約に従つて行ふ事を注意すべきである。

第 3-11 圖



電線の絶縁抵抗測定

第3-11圖は直偏法に依り電線の絶縁抵抗を測定する方法を示すもので、 R は標準高抵抗で普通 $100\,000$ オームの抵抗器を用ひる。絶縁抵抗を測定すべき電線を水槽中に浸し、其の両端を剥ぎ心線を出して検流計の一端に接続する様に切替開閉器 K を備へ置く。 K を上に閉ぢ、 R を回路に入れて、分流器の倍率 m_1

で検流計の振れ d_1 を讀む。次に K を下に閉ぢて x を回路に入れて、分流器の倍率 m_2 で振れ d_2 を讀む。然る時は、實用上次式を得る。

$$x = \frac{m_1 d_1 R}{m_2 d_2}$$

實際の測定に於ては、 K を下に閉ぢる瞬間に検流計を短絡して置いて、約 30 秒後に此の短絡を除き、其の後 30 秒後即ち K を閉ぢて充電後 1 分後の振れ d_2 を讀むのである。

此の測定に於て注意すべき事がある。心線と外被間に電圧を與へると、電池から出る電流は絶縁物を貫いて通ずる電流と、露出した外被から絶縁物の表面に沿つて心線に傳はる電流との和である。第一の電流は絶縁抵抗

に對する漏洩電流で吾々の求めんとするものであるが、第二の表面に沿う電流は吾々の求むる所のものではないから、特別の方法を講じて檢流計に之れを通さない様にする必要がある。此の表面漏洩電流を無くするには、水槽の外部に出した電線の端を、新に編組又は鉛被を約 20 纏剥き去り、ゴム又はガタパーチ等の絶縁物を露出し、更に小刀で絶縁物の先を 5 纏位鉛筆の先を削る様に切り心線を露出せしむるのである。更に完全な方法としてはプライス氏の保護線 (Price's guard wire) なるものを接続するのである。これは圖に示す様に絶縁物の表面に銅線を數回巻き付け、其の他端を檢流計と電池との間に接続するのである。此の保護線を設けると、假令表面漏洩電流が在つてもその電流は保護線を通じて、檢流計を通らないのである。従つて檢流計へは絶縁物を貫く漏洩電流のみが通ずる譯である。

尚ほ絶縁抵抗測定の場合注意すべき事項を列挙すると次の通りである。

(イ)測定前の浸水時間 絶縁抵抗を測定すべき電線又は電纜は其の両端を水槽外に出し、他は全部水に浸して測定前少くとも 12 時間以上浸水して置く必要がある。これは電線等に多少の瑕があつた場合、水分が毛細管現象によつて缺點部に浸み込んで、其の絶縁が不良なる事を示す迄には長時間を要するからである。

(ロ)試験電壓 100 ヴォルト以上の電壓を以つて試験すべきである。

(ハ)回路各部の絶縁を完全にすること

(ニ)電池の陰極を電線の心線に接続する事 一般に心線を電池の陰極に接続した場合の方が、陽極に接続した場合より檢流計の振れが大で、絶縁不良なる電線程其の差が多い。仍つて陰極を心線に接続した方が絶縁抵抗

決定上安全である。尤も陰極及び陽極電流を以つて二回の測定を行つて、其の結果を比較し良否を判定することを要求する事もあるが、普通は電池の陰極を心線に接続することゝなつて居る。

(ホ)一分充電後の振れを読む事 之れは既に述べた通りで、電線に電壓を與へる瞬時に檢流計を短絡し三十秒後檢流計を回路に入れ、其の後三十秒即ち回路を閉じた時刻から一分後の振れを読み之れを d_2 とする。

(ヘ)温度の更正 一般に絶縁抵抗は温度が昇ると減少するから、測定の際の温度を明記しなければならぬ。尚ほ之れを標準温度攝氏 15° に換算するのである。種々の絶縁物に對する換算係数はポケット・ブック等に記されて居るが、その一例としてゴム絶縁電線の換算表を抜き書きしておく。

(第 3—1 表参照)。

第 3—1 表 護膜絶縁電線の絶縁抵抗温度換算係數

測定 温度 攝氏	換算係數		測定 温度 攝氏	換算係數		測定 温度 攝氏	換算係數	
	第三種 絶縁電線	第四種 絶縁電線		第三種 絶縁電線	第四種 絶縁電線		第三種 絶縁電線	第四種 絶縁電線
0	0.300	0.477	20	1.403	1.280	40	7.406	3.438
5	0.448	0.610	25	2.230	1.639	45	11.080	4.417
10	0.670	0.781	30	3.330	2.098	50	16.500	5.635
15	1.000	1.000	35	4.973	2.686			

或る温度で測定した結果を攝氏 15 度の場合に換算するには、其の結果に其の温度に應ずる表中の係数を乗すれば良いのである。

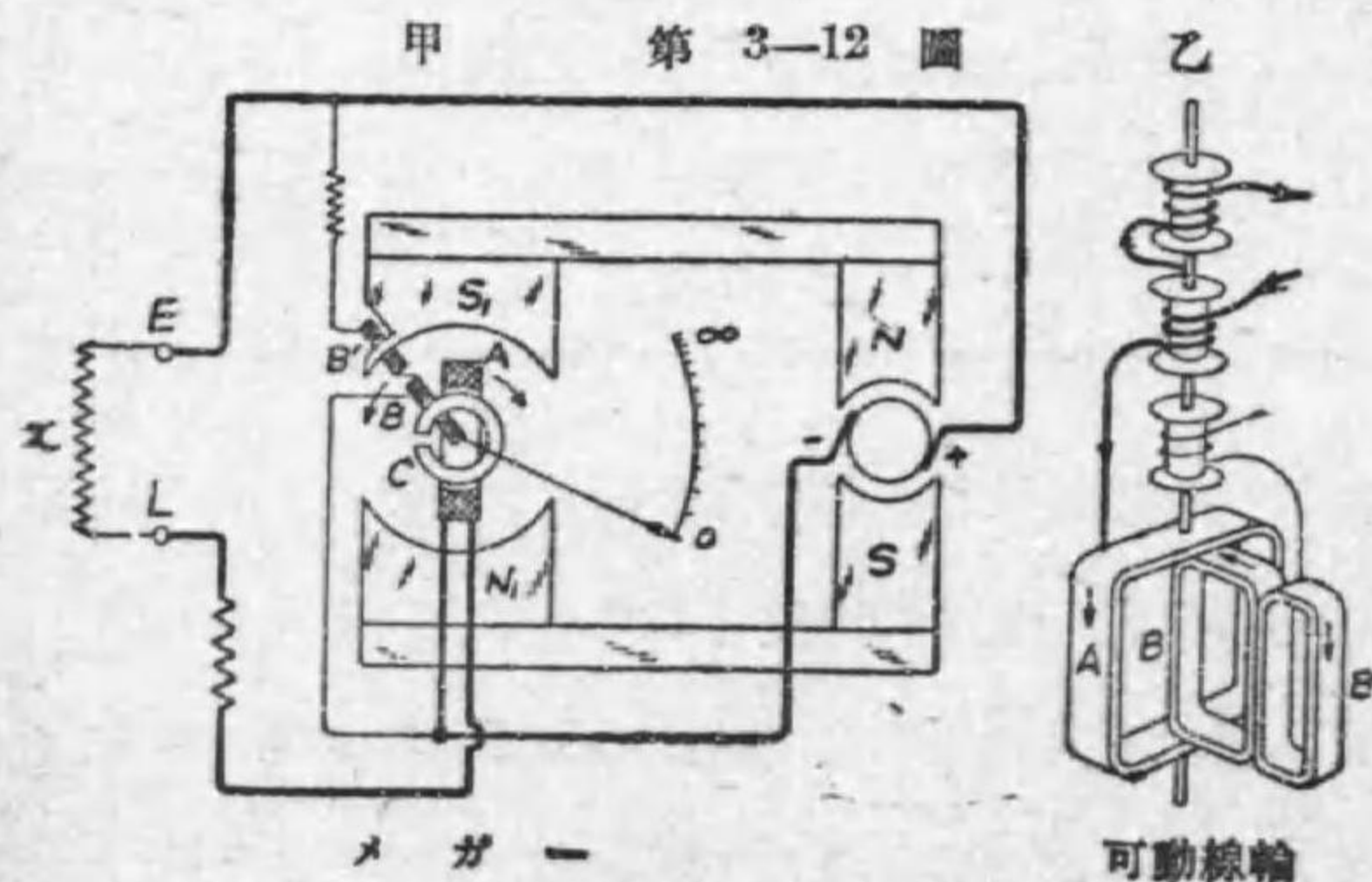
最良の方法としては、常に一定の標準温度攝氏 15 度に保たるゝ様に装置した水槽を備へ置き、此の中に電線を浸して試験するが良い。

尚ほ、電線の絶縁抵抗は電線の長さに逆比例するから、 l 米の絶縁抵抗が x メグオームであつたならば、1 杆毎の絶縁抵抗は次式で算出することが出来る。

$$1 \text{ 杆毎の絶縁抵抗} = \frac{x l}{1000} \text{ メグオーム}$$

尚ほ序ながら注意して置き度い事は、電線の絶縁と云ふ点からは、絶縁抵抗ばかりではなく、絶縁耐力が更に重要である。殊に高い電圧に用ふるには一層絶縁耐力が重要である。絶縁耐力と云ふのは、絶縁物が高い電圧に安全に耐へ得るかと云ふ事で、その爲には心線と外被間に使用電圧に應じ適當の値の正弦波交番電圧（電氣工作物規程の細則第 15 條、第 16 條等参照）を一分間加へて、絶縁物が之に依り破壊する事がないかを試験するのである。

12. メガー 絶縁抵抗を直接メグオームで讀む直讀計器 (direct-reading instrument) としてメガー (megger) と稱するものがある。第 3—12 圖甲はメガーの構造を示すものである。 A は測定すべき高抵抗 x



と直列に接続される様になつて居る線輪で、電流線輪 (current coil) と稱せられる。又 B 及び B' は電源と並

列に接続された線輪で、電源の電圧に比例する電流が流れる。之れを電圧線輪 (pressure coil) と稱する。電流線輪 A と電圧線輪 B, B' との三線輪は乙圖に示す様に回轉軸に固定され、軸は尖軸 (pivot) 及び寶石軸承に依り自由に回轉し得る様になつて居り、軸には指針が取付けられて居て、之れで一組の可動線輪を形成して居る。 $N_1 S_1$ なる永久磁石の磁極は可動線輪に對し界磁を作る。又 A 線輪の内部には C なる中空圓筒形の軟鐵心が装置され、之れは $N_1 S_1$ の作る磁界と直角なる位置で切目がある。又 S_1 は圖の如く切り込まれ、圖の位置では電圧線輪 B' を貫く様になつて居る。斯様に可動線輪の動き得る範圍 (即ち指針が目盛盤上の 0 と ∞ との間を動き得る範圍) 内では、電流線輪 A は平等輻射狀磁界内を動き、電圧線輪 $B B'$ の相隣れる部分は圖の位置、即ち目盛 0 の位置から指針が ∞ に向ふ間に反時計式に漸次弱い磁界内に来る様になつて居る。又 $N_1 S_1$ の永久磁石の他端に付けた $N S$ なる磁極は磁石發電機の電機子の界磁として用ひられる。電機子はその把手を手で回轉すれば、齒車装置により高速度で回轉せられ、電壓をその端子に發生するものである。而して把手を或る程度以上速く廻せば、電機子は一定速度になり之れには一定電壓を發生する様な構造になつて居る。

次にメガーの働作を説明しよう。被測抵抗 x を L, E の兩端子に結び、把手を廻して電機子に一定電壓を生ぜしむると、電圧線輪 $B B'$ には電圧に比例する電流が流れ、之れを反時計式に回轉しようとするトルクが働く。此の電圧線輪に働くトルクは、電圧線輪の電流と磁界の強さとの積に比例するから圖の位置で最大で、反時計式の方に動くに従ひ小となり $N_1 S_1$ の磁界と直角な位置で零となる。又電流線輪 A に働くトルクは、

時計式の方向で、 A の動く範囲内では磁界の強さが一定であるから、 A を通る電流の強さに比例し、 A の位置には無関係である。メガーに於ては、 A に働くトルクと BB' に働くトルクとが平衡する位置に於て静止するものである。例へば被測抵抗 $x=\infty$ なる場合には、 A の電流は0であるから A に働くトルクは零で、従つて BB' のトルクによつて可動線輪は全體として反時計式に廻り、 BB' のトルクが零となる位置、即ち BB' が N_1S_1 の磁界と直角なる位置に來た時可動線輪は静止し、従つて指針は目盛盤上の ∞ を指示する。又被測抵抗 $x=0$ なる場合には、 A の電流は最大で、そのトルクは最大であるから、可動部分は時計式に廻る。然るに BB' のトルクは可動部分が時計式に廻るにつれて増し、遂に圖に示す位置で、 A のトルクと平衡して可動部分は静止する様に作られて居る。従つて指針は此の時目盛盤上の0を指示する。又 x の任意の値に對しては初めに述べた様に、その時の A のトルクと BB' のトルクとが等しくなつて平衡した位置で静止し、指針は0と ∞ との間の x の値の目盛を指示する。

斯様にメガーに於ては、電流線輪 A に働くトルクを駆動トルクと考へれば、電圧線輪 BB' に働くトルクが制御トルクの役目をなすものと考え得る。従つて此の外に機械的トルクが働くとすると、電源の電圧の變化があるとそれにより電圧線輪の制御トルクの割合が變はつて來る爲め、誤差を生ずるのである。仍つて可動線輪に電流を導くべき導線は非常に可撓性で弾力のないものを用ひ、可動線輪が回轉しても制御力を生ずることがない様にする必要上、導線を乙圖に示す様に導線の捻回によるトルクが出来る丈け小なる様に作られて居る。故に實用上では此の導線の捻回による機

械的トルクは極小で閉却することが出来る。従つてメガーは、發電機の把手を回轉して電壓を發生させなければ、指針の位置は全く不定である。

メガーは、電壓100, 250, 500, 1000 ヴォルト、其の測定範囲も10, 20, 50, 100, 1000, 2000 メグオーム等に作られて居る。

メガーを以つて、電氣機械や電線路の絶縁抵抗を測る場合には、被測抵抗 x を接続すべき兩端子の中「line」と記してある端子に電氣機械の巻線又は線路を接続し、「earth」と記してある端子を大地に接続して、把手を廻はして指針の示す讀みを取ればよい。

普通のメガーの外にブリッチ・メガー (bridge megger) と稱するものがある。これは絶縁抵抗を測定するにメガーとしても使用されるが、又接続を變へてホイートストーン・ブリッチとして導體抵抗を測定するにも使用されるものである。

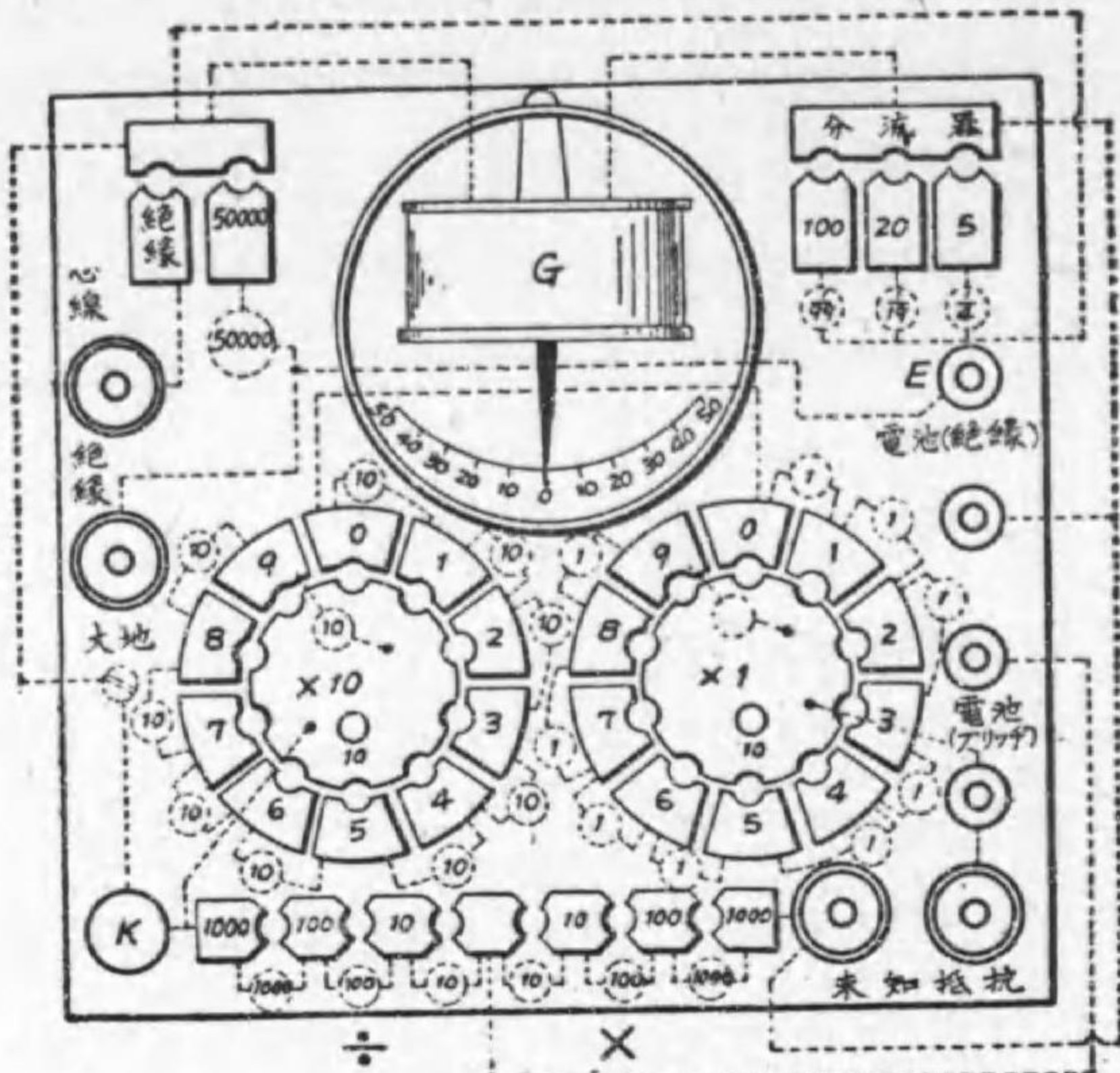
13. シルヴァータウン携帯試験器 英國シルヴァータウン

会社製の携帯試験器 (Silvertown testing set) は、ホイートストーン・ブリッチ法に依る導體抵抗測定と、直偏法に依る絶縁抵抗測定とを行ひ得るものである。第3—13圖甲はシルヴァータウン携帯試験器の内部接続を示すものである。乙圖は導體抵抗測定の場合の接続で、丙圖は絶縁抵抗測定の場合の接続である。

乙圖に於ては P, Q が比例邊で、 R が加減抵抗、 x が被測導體抵抗で、檢流計 G が振れない場合にはホイートストーン・ブリッチの原理により、 $x = \frac{Q}{P} R$ で被測導體抵抗を算出し得る。

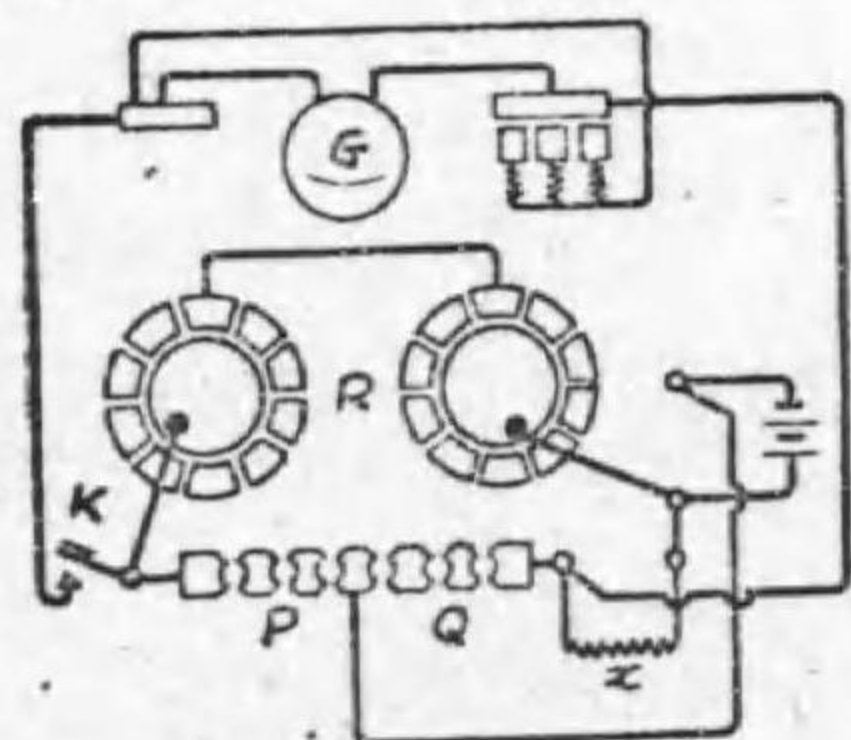
丙圖に於ては、比例邊の栓孔に全部栓を挿込み置く。次に栓を a に挿し、

第 3-13 圖 甲



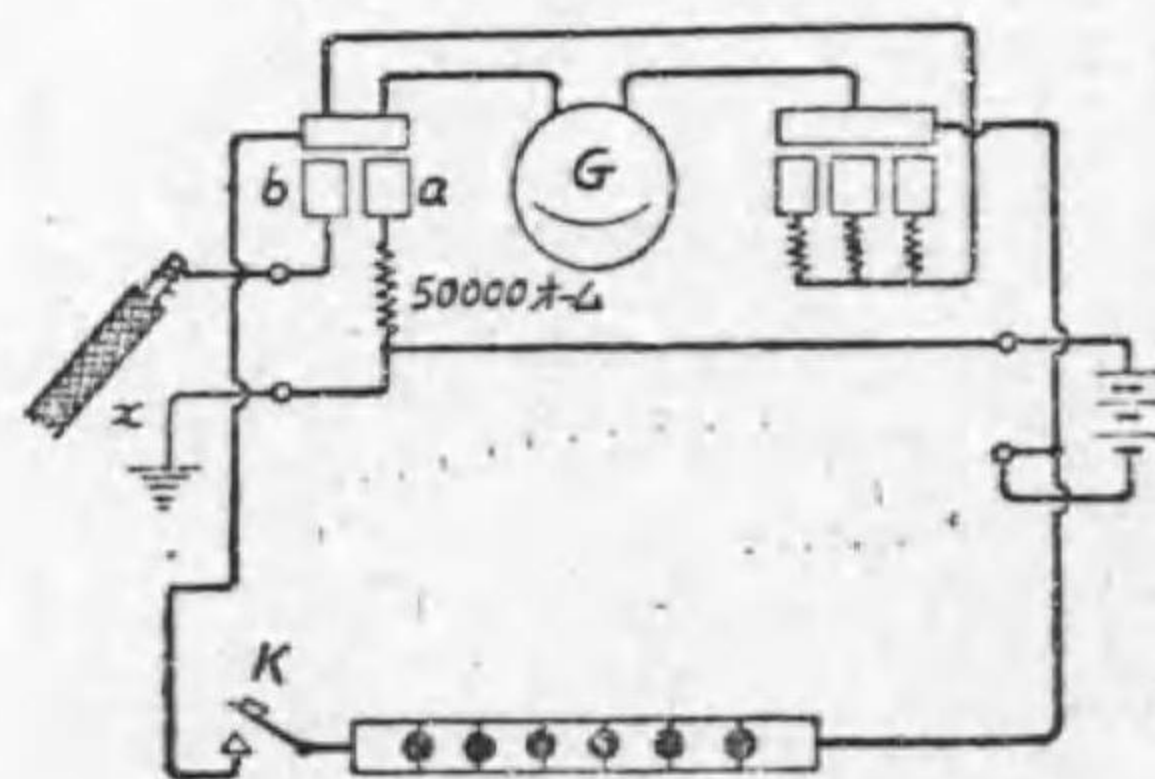
シルヴァータウン携帯試験器

第 3-13 圖 乙



導体抵抗の測定

第 3-13 圖 丙



絶縁抵抗の測定

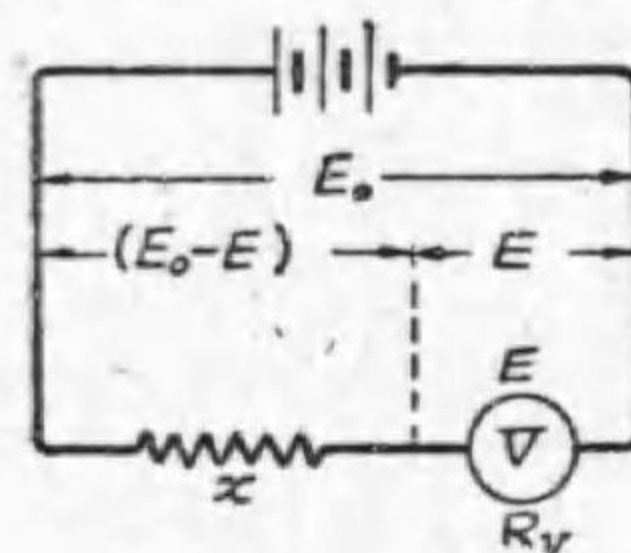
適当な分流器の位置に栓を挿込めば、50 000 オームの標準抵抗が回路内に直列になり、検流計に振れ d_1 を與へる。次に a の栓を抜き、之れを b に

挿すと、測定すべき絶縁抵抗 x が回路内に入る。電鍵 K を押へて検流計を短絡し 30 秒間電線を充電し、次に K を開き 30 秒後即ち K を押へてから 1 分後の検流計の振れ d_2 を読む。初めの場合の分流器の倍率を m_1 、後の場合の倍率を m_2 とすれば、電線の絶縁抵抗 x は、次式で算出される。

$$x = \frac{m_1 d_1 \times 50\,000}{m_2 d_2} \text{ オーム}$$

14. 電圧計に依る高抵抗測定法 高抵抗の電圧

第 3-14 圖 甲



計と被测高抵抗 x とを直列に接続して、抵抗を測定することが出来る。第 3-14 圖甲は之れを示すものである。電源の端子電圧を E_0 、電圧計の読みを E とすれば、 x の両端の電圧は $E_0 - E$ である。電圧計の抵抗を R_v とすれば、 x と R_v とが直列であるから、各電圧の比は抵抗の比に等しい。

い。

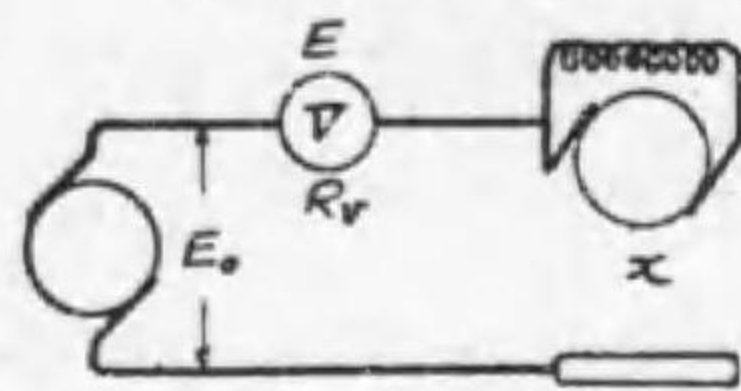
$$\frac{E_0 - E}{E} = \frac{x}{R_v} \quad \therefore x = \frac{E_0 - E}{E} R_v$$

電源の端子電圧を測るには、電圧計を直接電源に接続して電圧計の読みを取れば、大體に於て之れを E_0 としてよい。

此の原理を應用して電気機械や配電線路の絶縁抵抗を測定する事が出来る。

(イ) 電気機械の絶縁抵抗を測定する方法 第 3-14 圖乙は電気機械の絶縁抵抗 x を測定する方法を示す。試験電源、既知抵抗の電圧計 V 及び x

第 3-14 圖 乙



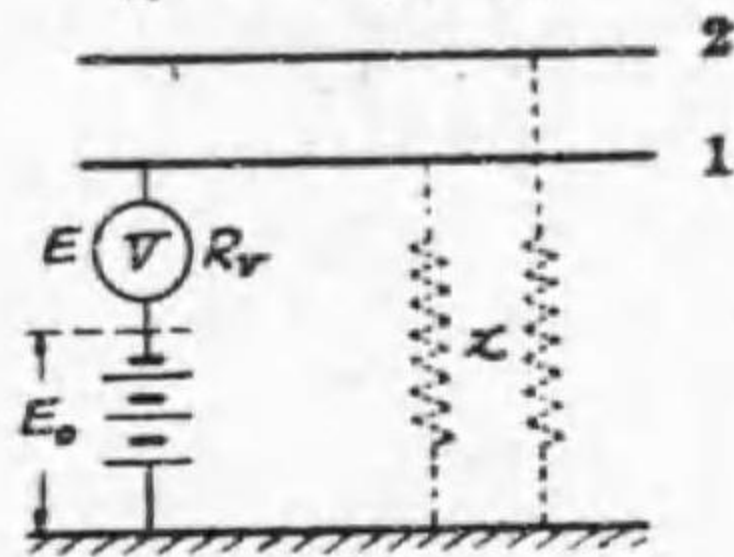
電氣機械絶縁抵抗の測定

を直列にして電圧計の読み E 及び電源の端子電圧 E_0 を求める。電圧計の抵抗を R_v とすれば、

$$x = \frac{E_0 - E}{E} R_v$$

(ロ)電流の通つてない配電線路 (dead line) の絶縁抵抗を測定する法
第 3-14 圖丙は此の場合の接続を示す。試験電源には線路電圧と略ぼ同一の電圧を有する電源を用ひる。先づ電圧計を以て電源の端子電圧 E_0 を測定し、次に圖に示す様に 1 線と大地間に電源及び電圧計を接続して電圧計の指示 E を読む。電圧計の抵抗を R_v とし、1 線の絶縁抵抗を x_1 とせば、

第 3-14 圖 丙



線路絶縁抵抗の測定

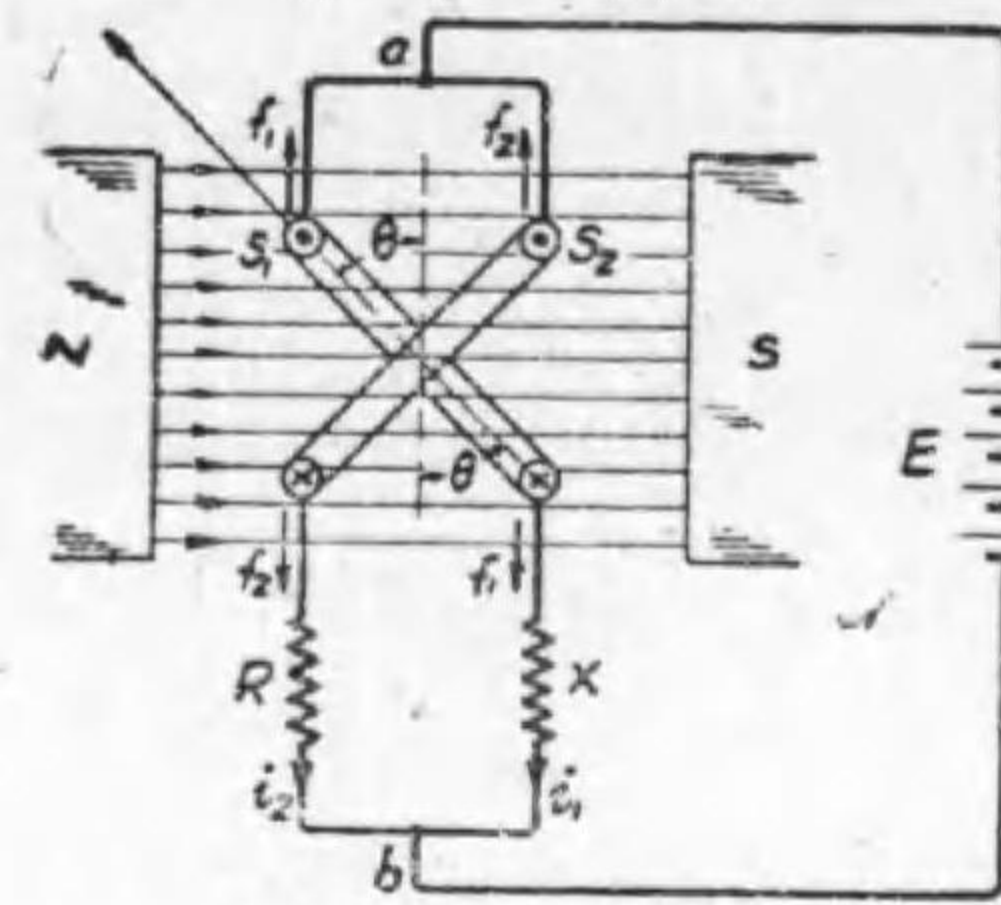
$$x_1 = \frac{E_0 - E}{E} R_v$$

2 線と大地間に就いても同様に測定を行ひ、2 線の絶縁抵抗 x_2 を求める事が出来る。尚ほ 1, 2 兩線間に負荷を接続し、1 線と大地間に電池及び電圧計を接続すれば 1, 2 兩線の大地に対する合成絶縁抵抗 x を測り得る。

15. 可動線輪型オーム計

被测抵抗のオーム数を直讀し得るオーム計 (ohmmeter) にも種々あるが、茲に交叉線輪型オーム計 (cross-coil type ohmmeter) を説明しよう。第 3-15 圖甲はブルガー (Bruger) 氏考案のもので、獨逸ハートマン・エンド・ブラウン會社やシーメンス會社等で作るオーム計の原理を示す。永久磁石 NS の作る磁界内に、互に直角に交叉して軸に取付けられた可動線輪 S_1, S_2 があり、

第 3-15 圖 甲



交叉線輪型オーム計の原理

S_1 には被测抵抗 X を直列に接続し、又 S_2 には一定抵抗 R を直列に接続したものを共に並列に接続して之れに直流電源から共通の電圧を與へる。メガーと同様に可動線輪に電流を導く導線には制御力を生じないものを用ひる。兩線輪に通する電流と磁界とによつて生ずるトルクは

互に反対方向に生ずる様になつて居て、此の兩トルクが平衡する位置に可動線輪は静止し、軸に取付けた指針は目盛盤上に被测抵抗 X の値を指示するのである。

今 ab 間の電圧を E , S_1, S_2 の抵抗を r_1, r_2 とせば各の電流 i_1, i_2 は、

$$i_1 = \frac{E}{r_1 + X}, \quad i_2 = \frac{E}{r_2 + R}$$

従つて磁界の強さを H とせば、 S_1, S_2 に働く電磁力 f_1, f_2 は夫々 $H i_1, H i_2$ に比例し、 θ を圖に示す傾斜角とすれば、 $f_1 f_1$ 間の距離は $b \sin \theta$, $f_2 f_2$ 間の距離は $b \cos \theta$ であるから (但し b は各線輪の幅), S_1, S_2 に働くトルクは夫々 $D_1 = f_1 b \sin \theta, D_2 = f_2 b \cos \theta$ で、之れに上式を代入すれば、

$$D_1 = k_1 H i_1 \sin \theta = k_1 E H \frac{\sin \theta}{r_1 + X}$$

$$D_2 = k_2 H i_2 \cos \theta = k_2 E H \frac{\cos \theta}{r_2 + R}$$

$$D_1 = D_2 \text{ であるから, } k_1 E H \frac{\sin \theta}{r_1 + X} = k_2 E H \frac{\cos \theta}{r_2 + R}$$

$$\therefore X = \frac{k_1}{k_2} (r_2 + R) \tan \theta - r_1 = K \tan \theta - r_1$$

即ち X は θ の函数で、逆に θ は X の函数であるから、目盛盤上に X の値を目盛る事が出来る譯である。

實際のオーム計に於ては、磁界の強さ従つてトルクを大にして、外部磁界の影響を除外する爲に可動線輪の内部に軟鐵心を設け、その鐵心の形状及び磁極片 NS の形状を適當の形にして、磁極と鐵心との空隙の長さを變へて、各部に於ける磁界の強さを適當に變へてある。此のオーム計には種々

の測定範圍のものが作られ、高抵抗用のものには高電壓の電源を用ひ、低抵抗用のものには低電壓の電源が用ひられる。乙圖はハートマン・エンド・ブラウン会社の交叉線輪型オーム計の一例である。此の種の交叉線輪型計器は溫度測定や壓力測定等にも應用されて居る。



第 3-15 圖 乙
交叉線輪型オーム計

尙ほ低抵抗の直讀測定器としては、内部構造はメガと同様で、接續を變へたダクター (ducter) と稱するものもあるが、之れに就いては説明を省く。

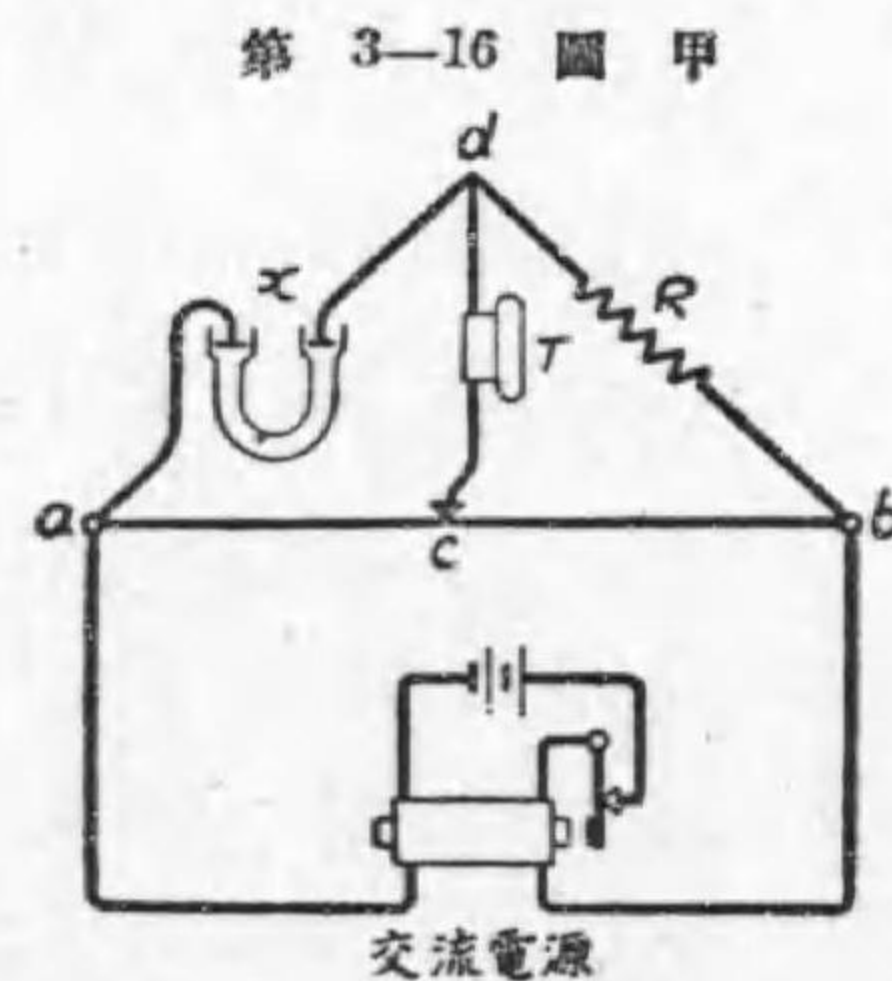
(IV) 特殊抵抗の測定

16. 電解液の抵抗測定 電解液に二つの電極を設け、之れに直流を通すと成極作用 (polarization) が起り、電流と反方向の逆起電力を生じ、その爲め電解液の抵抗が増した結果になる。成極作用に依る逆起電力は二つの電極間に電位差を生じ丁度蓄電器と同様な作用をする

のである。此の場合の静電容量を成極静電容量 (又は單に成極容量) と稱する。電解液の抵抗を測定するには出来るだけ成極作用の逆起電力を生じない様にすべきである。成極作用を最小にするには、普通電極に白金板を用ひ、白金板の表面に白金黒 (platinum black) を固着せしめて表面積を大にしたものを使用し、電源としては交流を用ひるのである。

電解液の抵抗は一般に濃度に依り異なり、又一般に溫度が昇るに従つて急激に減少し次第に變化の割合は少くなるものである。

(イ) コーラッシュ・ブリッジ法 普通に電解液の抵抗を測定するには第 3-16 圖に示すコーラッシュ・ブリッジ (Kohlrausch bridge) と稱する交流法を用ひる。之れはホイートストーン・ブリッジと同様であるが、電

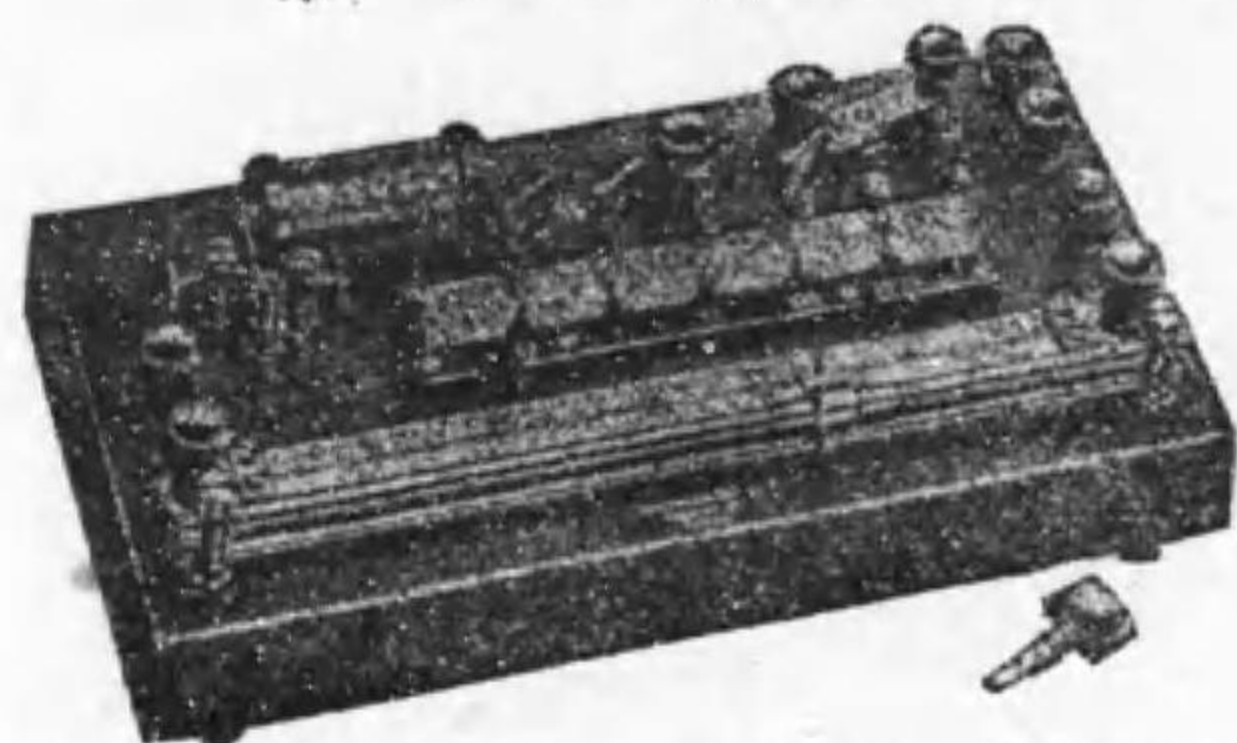


第 3-16 圖 甲
コーラッシュ・ブリッジの原理

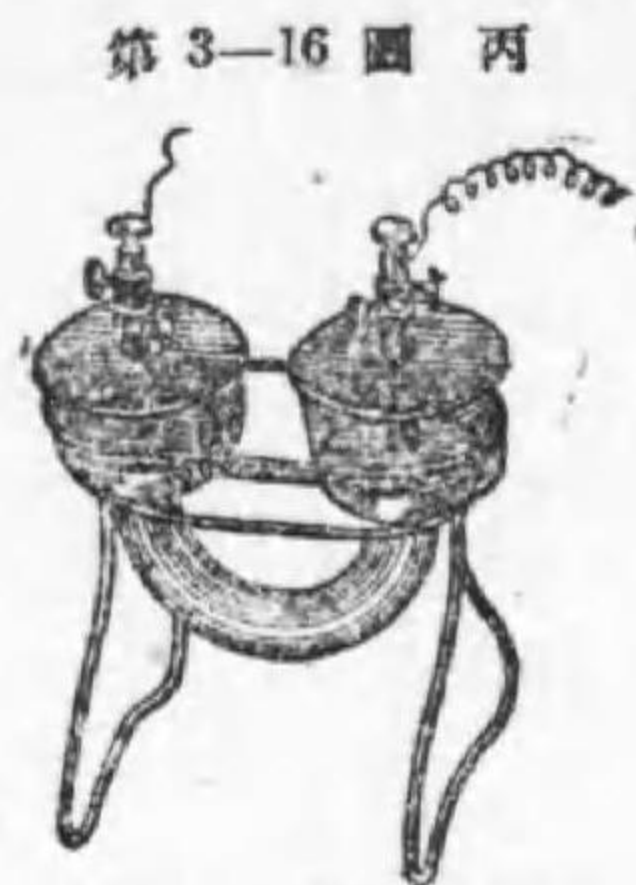
解液の成極作用を最小にするために交流電源を用ひ、従つて檢流計の代りに受話器 T を用ひてある。交流電源としては小さな誘導線輪 (induction coil) を用ひる。 x が測定すべき電解液、 R が標準抵抗、 ab が摺觸線である。 R の適當の値のものを選び、摺觸線 ab 上の摺動子を動かして、受話器 T に音の感じない點 c を見出す。(普通音の全く無くなる點を見出す事は出来ないから、音の最も微弱となる點を見出せばよい。) 此の場合には c 點と d 點とは同電位であるから、ホイートストーン・ブリッジと同様な原理に依り、次式で電解液の抵抗は算出される。

$$x = \frac{ac}{bc} R$$

電解液抵抗の値の大小により其の容器も適當のものを用ひるのである。第3-16圖乙はハートマン・エンド・ブラウン会社のコーラッシュ・ブリッジの寫眞で、抵抗 R は 0.1, 1, 10, 100 及び 1000 オームの五線輪か



ハートマン・エンド・ブラウン会社製
コーラッシュ・ブリッジ



電解液容器の一例

ら成つて居る。丙圖は電解液の容器の一例である。

電解液の固有抵抗 (ρ) 又は導電度 ($\lambda = \frac{1}{\rho}$) を求めるには、上述の様に不規則な容器から直接計算によつて算出する事が出来ないから、既知固有抵抗 (ρ_s)、又は導電度 ($\lambda_s = \frac{1}{\rho_s}$) の標準電解液を同一容器に入れて、被测電解液測定の場合と同一條件の容積の抵抗を測り、之れを x_s とせば、同一温度、同容積、同形状の條件では、固有抵抗は抵抗に比例するから、

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \frac{x}{x_s} \quad \therefore \rho = \frac{x \rho_s}{x_s} \quad \text{オーム/立方糎}$$

$$\therefore \lambda = \frac{x_s \lambda_s}{x} \quad \text{モ-立方糎}$$

(此の場合本式より明かなる通り、 $\lambda x = \lambda_s x_s$ は一定で、之れを K とすれば、此の $K = \lambda_s x_s$ を此の場合の容器の抵抗容量と稱して居る。)

標準電解液として、蒸留水 1 リットル中に純粋な食鹽 (Na Cl) 264 瓦

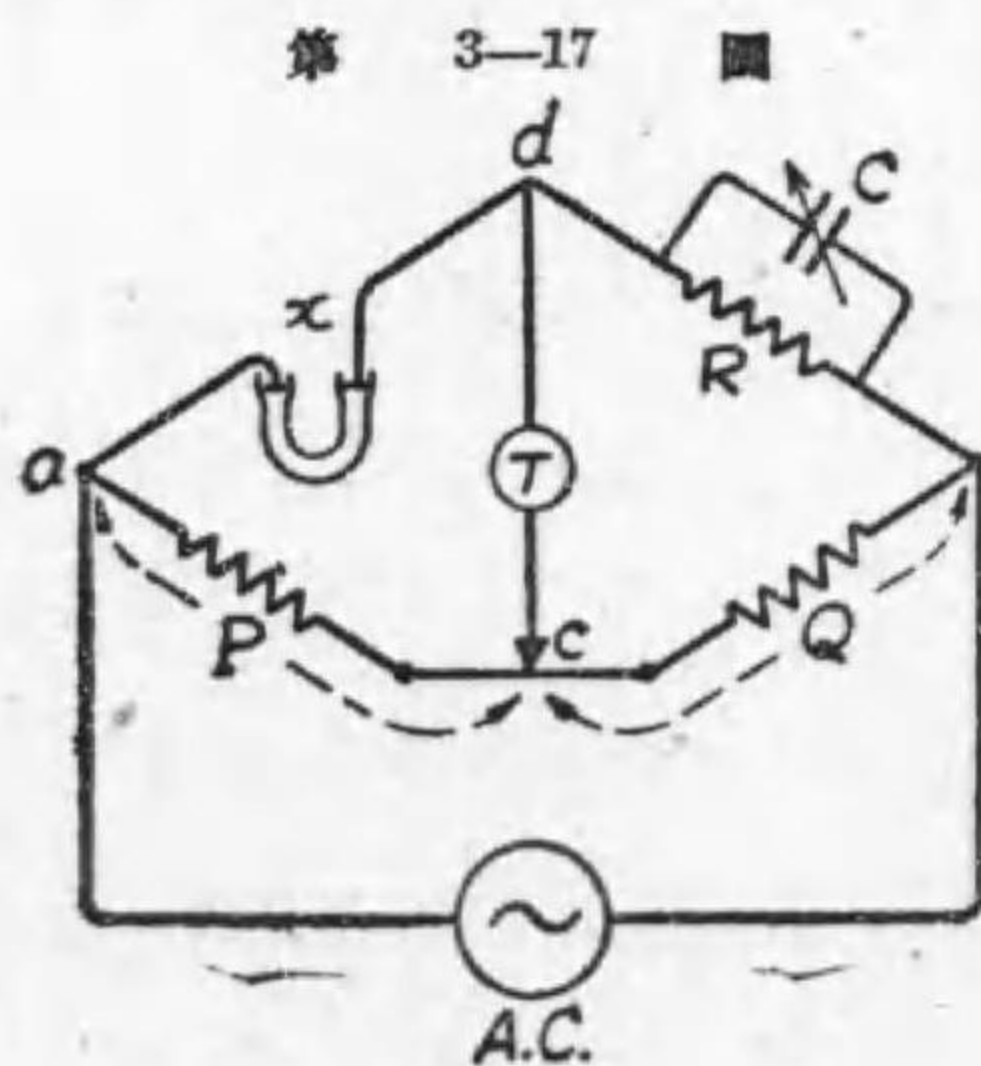
を溶かした比重 1.201 なる食鹽水を用ひると、その種々の温度に於ける導電度 (λ_s) は第3-2表の通りである。(他の標準電解液に就いては電氣工学ポケットブックを参照せよ。)

第3-2表 食鹽水の種々の温度に於ける導電度 (λ_s)

温度 (°C)	15°	16°	17°	18°	19°	20°	21°
導電度	0.2015	0.2063	0.2112	0.2161	0.2210	0.2260	0.2310

表の値は 18°C に於て、 $\lambda_s = 0.2161$ モ-立方糎 $\therefore \rho_s = 4.66$ オーム/立方糎である。

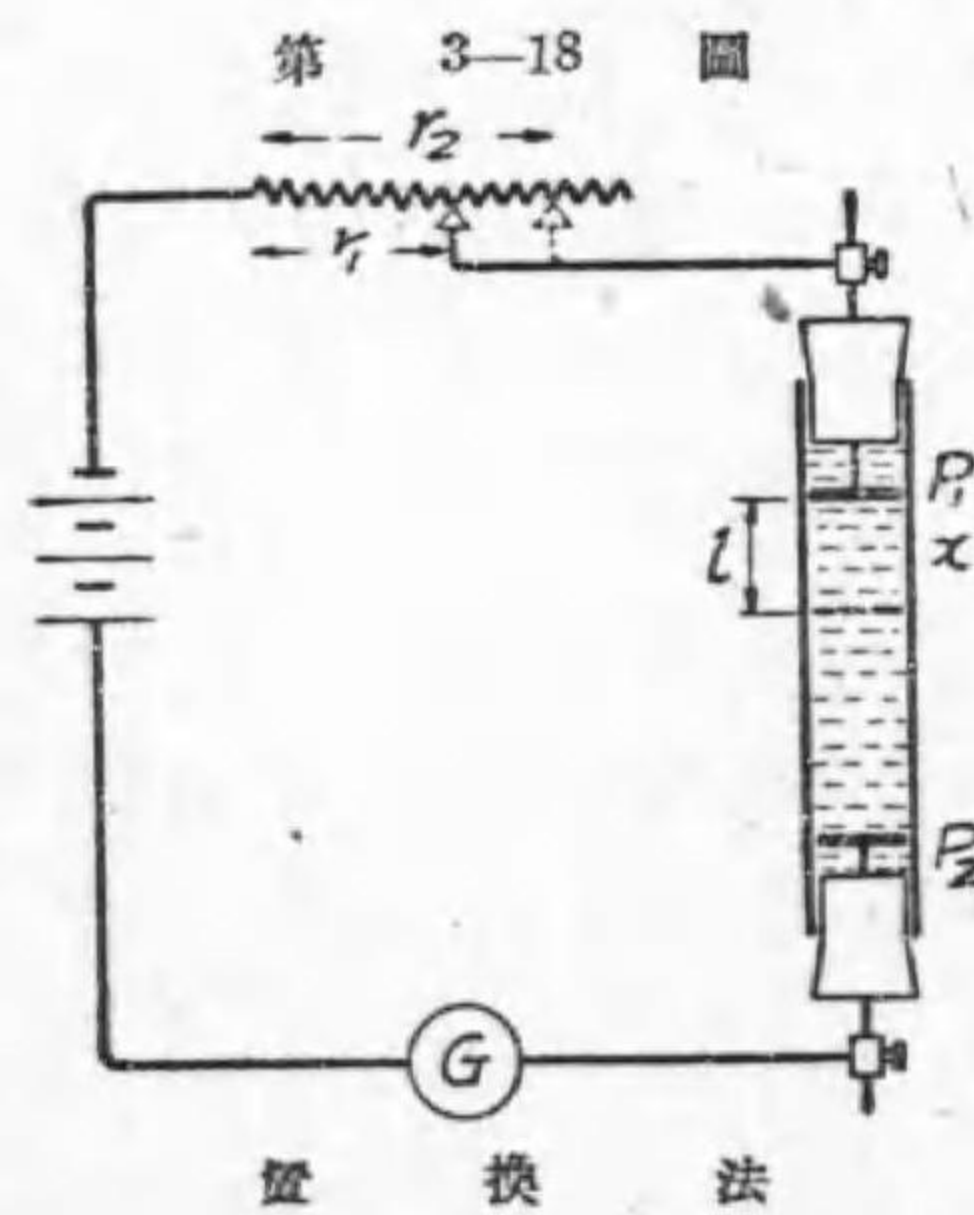
電解液の成極作用を最小にするためには交流の周波数は高い程良い。然し周波数が高い程、ブリッジ各部のインダクタンス及び容量の影響が著しくなつて来る。普通の小さな誘導線輪では周波数は 100 乃至 400 サイクル位である。又誘導線輪を電源とする場合には、これは純正弦波でない爲に完全な平衡を見出し難いので音の最微弱な點を求めるのである。尙ほ精



密測定用としては、交流電源に 1000 サイクル位の正弦波交流發生機を使用して居る。而してブリッジの抵抗 R と並列に可變空氣蓄電器 C を第3-17圖の様に接続して、之れと摺觸線上の摺動子を調整して平衡を見出す。此の場合にも圖の位置で平衡を得たる時は、 $x = \frac{P}{Q} R$ で算出される。(此の理由

は、上級に行つて交流ブリッジの理論を習ふ場合に判るから、茲では省略する。))

(□)置換法 電解液抵抗を測定する普通の方法は上述の交流法即ちコーラッシュ・ブリッジ法を用ひるのであるが、茲に直流電源を用ひる簡単な方法を述べよう。直流を用ひると成極作用が起るが、其の成極作用が同一なる様な二回の測定をなし、結果に於て之れを消去する様な方法を講ずるのである。その直流法中の置換法 (substitution method) を説明しよう。第3-18圖は置換法の接続圖を示す。電解液を充たした断面積一様な硝子管内に可動電極 P_1 と固定電極 P_2 とを装置し、之れに直流電源、加減抵抗器、及び檢流計を直列に接続する。



先づ $P_1 P_2$ 間の距離を任意にし、回路を閉ぢ檢流計の振れを読み之れを d とする。此の場合の加減抵抗器の抵抗の値を r_1 オームとする。次に P_1 極を l 厘丈下げ、回路を閉ぢて抵抗器の値を増して檢流計の振れを前と同じ d となる場合を見出す。此の場合の抵抗器の値を r_2 オームとする。此の二

回の場合を比較すると、檢流計の振れは同一 d であるから、電流は二回とも同一で、従つて成極作用も同一である。回路の全抵抗も二回とも同一であるから、電解液の l 厘の抵抗 x が、加減抵抗器の讀みの差 $(r_2 - r_1)$ オームに等しかるべきである。故に此の電解液 l 厘の長さの抵抗 x は、

$$\therefore x = r_2 - r_1 \text{ オーム}$$

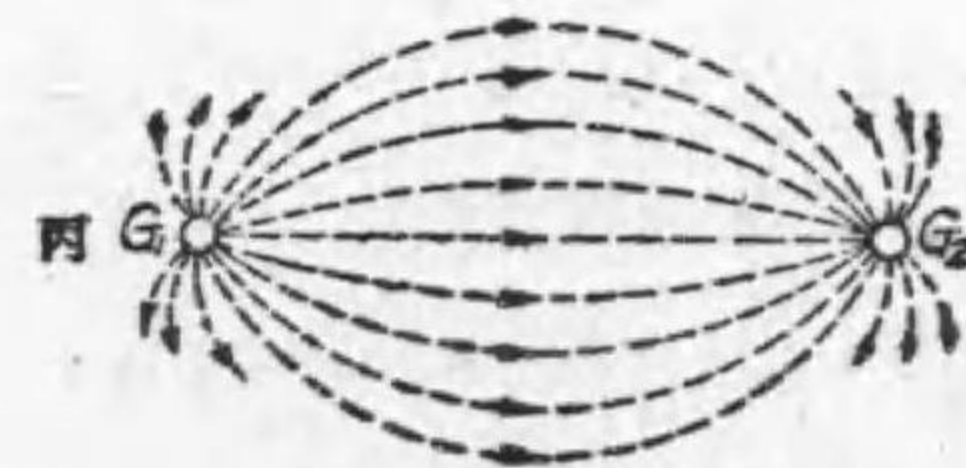
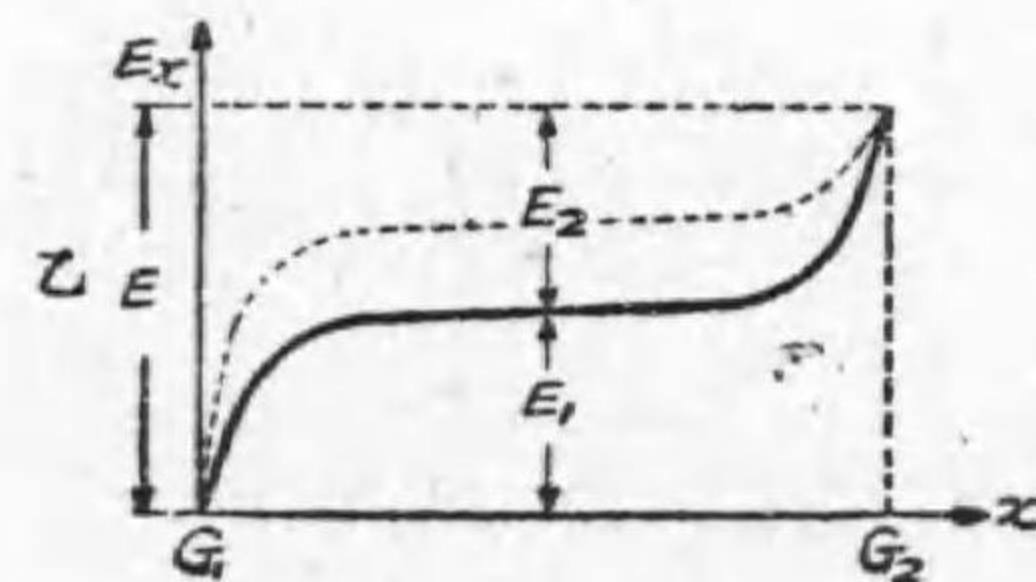
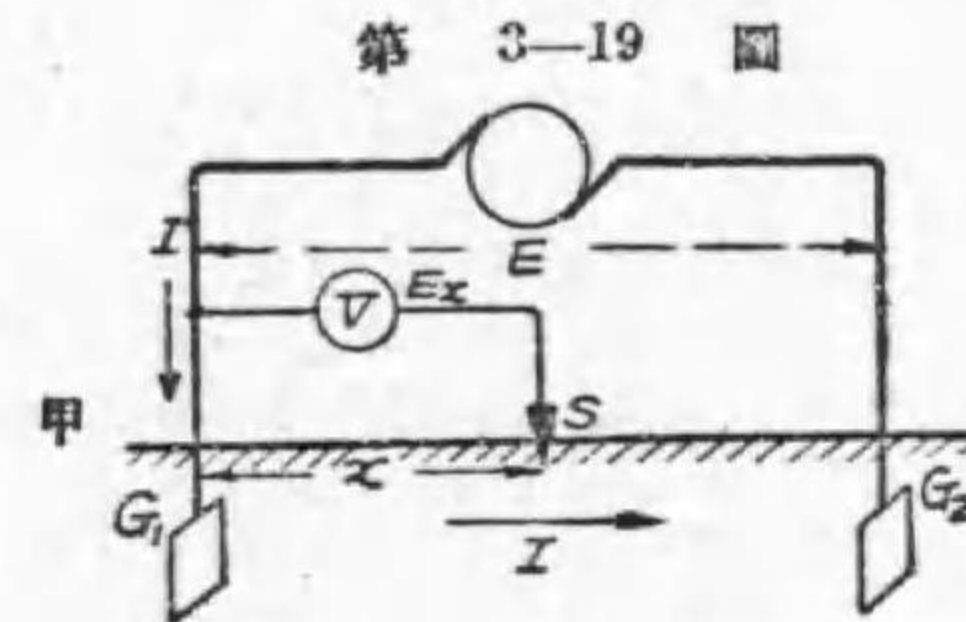
又此の場合の電解液の固有抵抗 ρ 又は導電度 λ は、電極の面積を A 平方厘とせば、

$$x = r_2 - r_1 = \rho \frac{l}{A} = \frac{1}{\lambda} \frac{l}{A}$$

$$\therefore \rho = \frac{(r_2 - r_1)A}{l} \text{ オーム/立方厘}$$

$$\lambda = \frac{l}{(r_2 - r_1)A} \text{ モー/立方厘}$$

17. 接地抵抗の測定 我國の電氣工作物規程には第一



接地抵抗の意義

種地線工事 (接地抵抗 10 オーム以下)、第二種地線工事 (地線と大地との電圧を 150 ヴォルト以下に保持するもの)、及び第三種地線工事 (接地抵抗 100 オーム以下) の三種の地線工事が規定されて居る。接地抵抗 (ground resistance) とは如何なるものかその意味を考へて見よう。今第3-19圖甲に示す様に、二個の地板 (earth plate) G_1, G_2 の間に電圧 E を與へて電流 I を通じ置く。高抵抗の電圧計 V の一端を G_1 と電源の端子との接続點に接続し、他端を S なる接地金屬棒に接続して、 S を $G_1 G_2$ 間の諸點に挿込んで、其の間の電壓降下を測ると乙圖に示す様

な電圧降下曲線を得る。(横軸 x には G_1 から S までの距離を取り、縦軸には其の間の電圧降下即ち電圧計の読み E_x を取つたものである。) 此の電圧降下曲線から見ると、 G_1, G_2 間の単位長毎の電圧降下即ち電圧降下率は地板 G_1, G_2 の附近で大であつて、電圧降下曲線の水平になつた處即ち電圧計の読みが E_1 なる處では電圧降下率は零である。此の事は地中に於ける電流通路を考へて見ると理解が出来る。即ち地中に於ける電流通路は丙圖に示す様に、電流は G_1 の小面積から次第に大地に廣がり、 G_1, G_2 の中間の大地の面積に廣がつて、之れから又 G_2 の小面積に密集して行く。此の様に G_1, G_2 の附近程電流密度大で電圧降下率大、従つて抵抗大であるが、中間の電流密度極小なる處では電圧降下率零で抵抗が殆んど零である。従つて地板 G_1 の大地との接觸の爲に生じた抵抗即ち G_1 の接地抵抗としては、電圧降下 E_1 (即ち電圧降下曲線の水平となつた時の電圧計の読み) を電流 I で割つた値で表はされるのである。

$$G_1 \text{ の接地抵抗 } G_1 = \frac{E_1}{I}$$

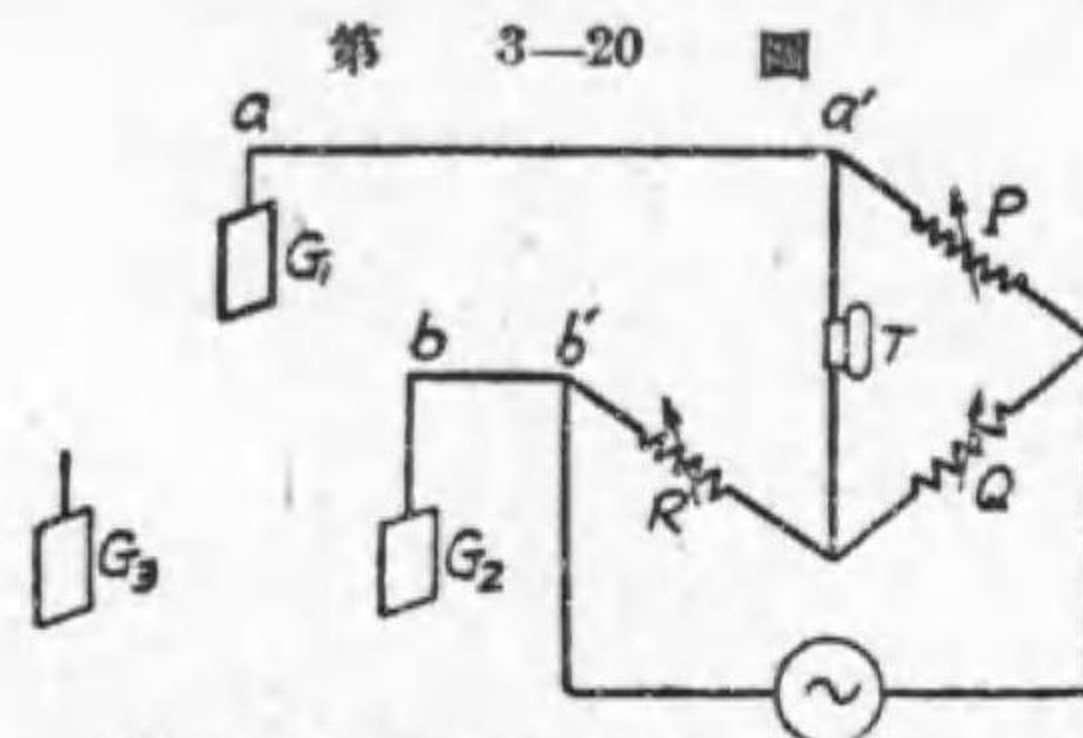
同様に、 G_2 の接地抵抗は、 G_2 の電圧降下 $E_2 = E - E_1$ を電流 I で割つた値で、

$$G_2 \text{ の接地抵抗 } G_2 = \frac{E_2}{I}$$

電圧降下曲線の水平部分は地板の周圍約 5 米距つた所から生ずるから、地板 G_1 の接地抵抗測定のため別に補助地板 G_2 を用ふる時は少くも G_1, G_2 間を 10 米以上となる様に補助地板 G_2 を設ける必要がある。大地に直流を通すと成極作用を生ずるから、電源としては低い周波数の交流電源を用ひる。茲に二個の補助地板を用ひるニッポルト (Nippoldt) 法、一

個の補助地板を用ひるウィーヘルト (Wiechert) 法及びベーレンド (Behrend) 法に依る接地抵抗計を説明しよう。

(イ) 二補助地板を用ひる法 (ニッポルト法) 第 3-20 圖に示す様に、被测地板 G_1 と二補助地板 G_2, G_3 とを相互間の距離 15 米位の正三角形の頂點を形成する様に G_2, G_3 を臨時に埋設し、二つ宛の接地抵抗をコー



ラッシュ・ブリッジで測定し、之れ等三回の測定結果から各の接地抵抗を算出する方法である。

先づ、圖に示す様に、 G_1 と G_2 とをブリッジの一辺を成す様に、

二補助地板を用ふる法 (ニッポルト法) 導線 aa', bb' に接続して、 P, Q, R を調整して受話器 T が無音となる場合の P, Q, R の値より、 $G_1 + G_2$ の値を算出し置き、之れを α オームとする。即ち、

$$G_1 + G_2 = \frac{P}{Q} R = \alpha \quad (イ)$$

次に導線を G_1, G_3 に接続し、 P, Q, R を調整して平衡した場合を見出し、之れより $G_1 + G_3$ を算出し、之れを β オームとする。

$$G_1 + G_3 = \beta \quad (ロ)$$

最後に、 G_2 と G_3 とを導線に接続して平衡を得た時の P, Q, R の値より、 $G_2 + G_3$ を算出して、之れを γ オームとする。

$$G_2 + G_3 = \gamma \quad (ハ)$$

(イ), (ロ), (ハ) 三式より、被测接地抵抗 G_1 は次式で表はされる事明らかである。

$$G_1 = \frac{\alpha + \beta - \gamma}{2}$$

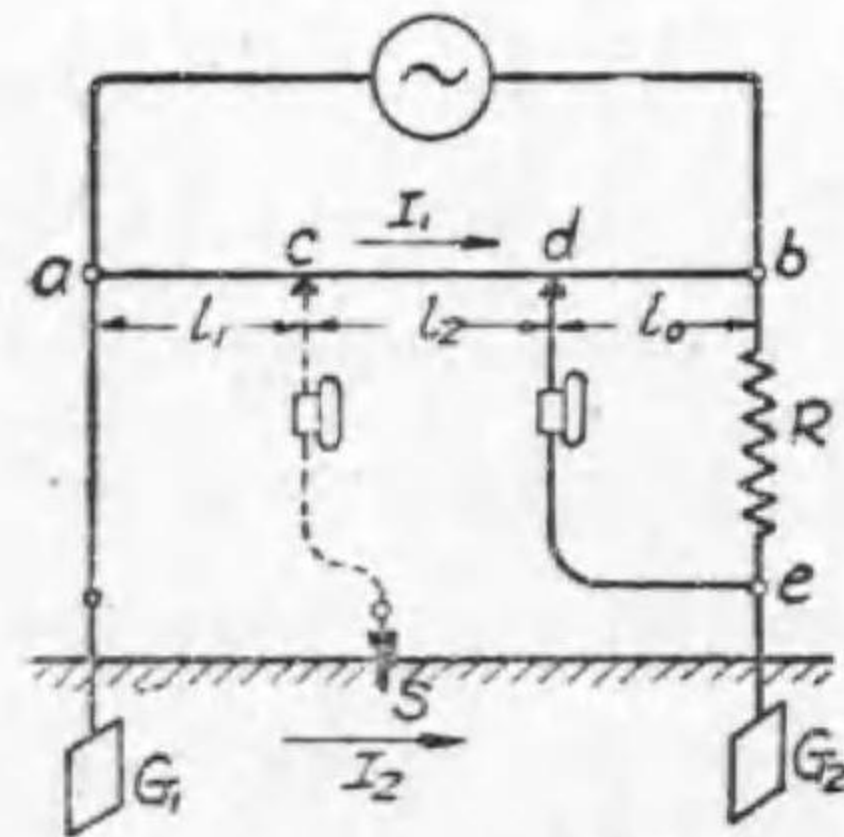
序に他の補助地板の抵抗は次式で表はされる。

$$G_2 = \frac{\gamma + \alpha - \beta}{2}, \quad G_3 = \frac{\beta + \gamma - \alpha}{2}$$

茲に注意すべきは、導線 aa' , bb' の抵抗が上式の α, β, γ 中に含まれて居るから、二條の導線抵抗（之れを r とせば）を α, β, γ より差引きたるものを夫々 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ とし、 $G_1 = \frac{\alpha_1 + \beta_1 - \gamma_1}{2}$ で算出すべきである。

(ロ)一補助地板及び探針を用ひる法 (ウィーヘルト法) 之れもコーラッシュ・ブリッジを用ひる方法である。第3-21圖に示す様に、被测接地抵抗 G_1 の外に、一個の補助地板 G_2 と、中間に電位点として金属棒 S (之れを探針と稱する) を地中に挿込んでおく。 R は既知抵抗である。先

第 3-21 圖



ウィーヘルト法

づ受話器の下端を R と G_2 との接続点 e に接続して、摺觸線 ab 上の摺動子を動かして平衡点 d を見出す。次に點線で示す様に受話器の下端を探針 S に接続して、摺動子を動かして平衡点 c を見出す。今 $acdb$ の電流を I_1 , aG_1G_2Rb の電流を I_2 とし、 ac, cd, db の長さを夫々 l_1, l_2, l_0 とし、摺觸線單位長の抵抗を r とせば、 c と

S とは同電位で、又 d と e とは同電位であるから、次式が成立する。

$$I_1 r l_1 = I_2 G_1, \quad I_1 r l_2 = I_2 G_2, \quad I_1 r l_0 = I_2 R$$

$$\therefore \frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{r l_1} = \frac{G_2}{r l_2} = \frac{R}{r l_0}$$

$$\therefore G_1 = \frac{l_1}{l_0} R$$

若し、摺觸線の目盛に摺動子の左右の長さの比を目盛つて置けば、

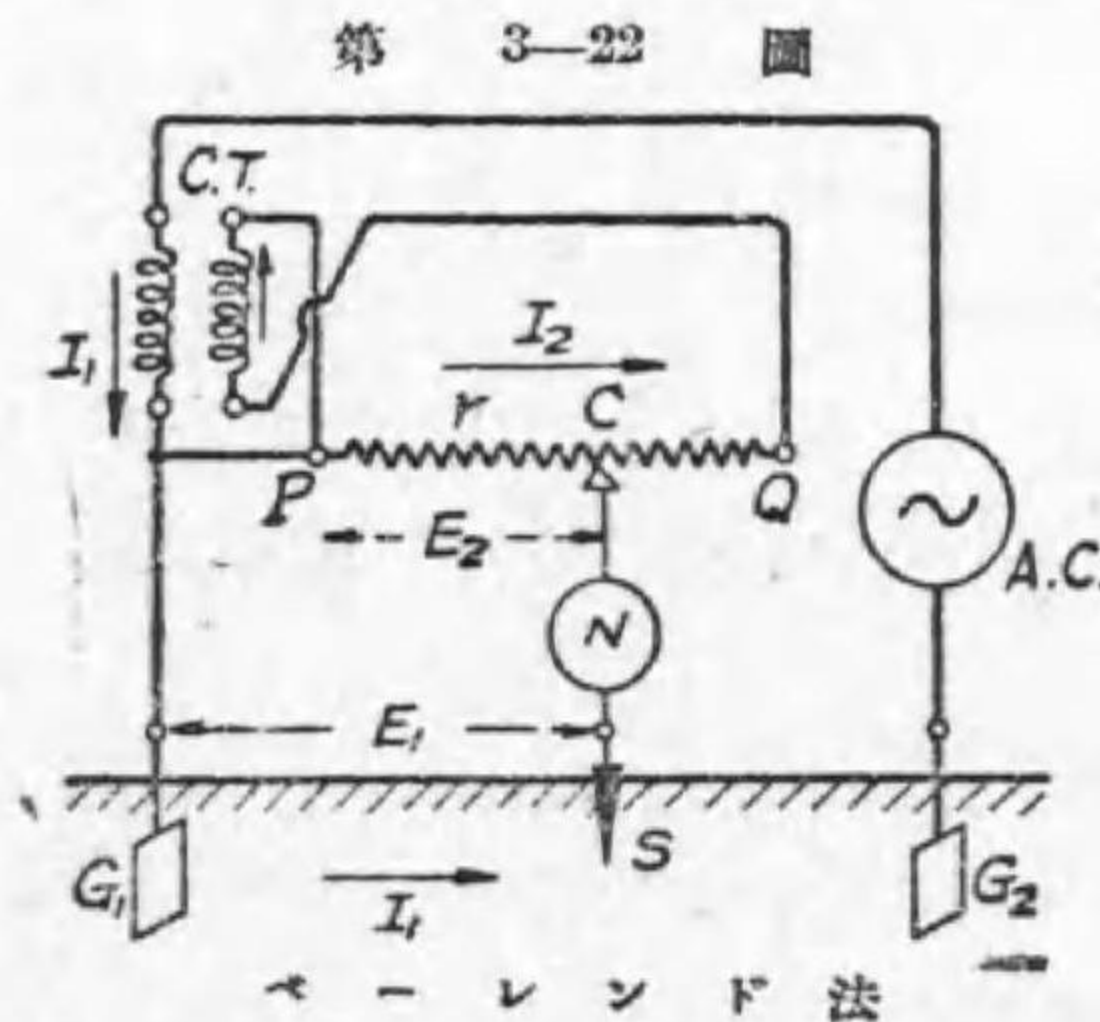
$$\text{初めの } d \text{ 點の目盛は, } \alpha_1 = \frac{G_1 + G_2}{R}$$

$$\text{後の } c \text{ 點の目盛は, } \alpha_2 = \frac{G_1}{G_2 + R}$$

此の兩式より、 G_1 を求むれば、

$$G_1 = \alpha_2 R \times \frac{1 + \alpha_1}{1 + \alpha_2} \text{ オーム}$$

(ハ)ベーレンド法 第3-22圖はベーレンド法の原理を示す。A.C. は



ベーレンド法

交流電源で、C.T. は變流器である。

G_1 は被测接地板、 G_2 は補助地板、

S は中間電位點を得る探針である。

抵抗 PQ 上の摺動子を動かして交流

檢電器 N に電流が通じない點

を見る。圖に示す様に變流器の一

次に G_1 を接続し、電源の他端に

は G_2 を接続して、 G_1, G_2 に I_1

なる交流を通すと、 G_1, S には E_1 なる電壓降下を生じ $E_1 = I_1 G_1$ であ

る。變流器は變壓器と同様な原理の下に電流を變ずるもので、その一次電

流 I_1 と二次電流 I_2 との比は大體一次と二次との巻數の比に逆比例する

ものであるが、茲では、一次電流と二次電流との比即ち變流比が1なる様、

巻数を適当に選んである。従つて二次電流 I_2 は一次電流 I_1 と値が等しい。此の變流器の二次を PQ なる抵抗に接続し、 PQ に I_2 なる電流を通ずる。 P 點は圖に示す様に一次回路の一點と接続して同電位にする。 PQ 上には摺動子を備へ、此の摺動子を動かして C 點の位置で、 N に電流が通じない平衡の場合を得たとすれば、 C, S は同電位で、 P, C 間の電壓降下 E_2 は電壓降下 E_1 に等しかるべき筈である。 PC 間の抵抗を r とせば、 $E_2 = I_2 r$ であるから、 $E_1 = E_2$ より次の關係を得る。

$$I_1 G_1 = I_2 r$$

然るに、 $I_1 = I_2$ であるから、 $G_1 = r$ 即ち G_1 は PC 間の抵抗に等しい。

上述のベーレンド法を應用したシーメンス接地抵抗計が作られて居る。上述の原理に於ては、交番電壓降下 E_1 と E_2 とはその値も位相も一致したるものと假定したが、實際に於ては變流器の性質上、 E_1 と E_2 とは値を等しくする事は出来るが、その位相は全く一致せしむることは困難である。さうすると値は等しくても位相が合はないと N には交流が通り平衡點 C を見出すことが出来ない。 E_1, E_2 の値が等しくて N に交流が通つても平衡點 C を見出す方法としてシーメンス

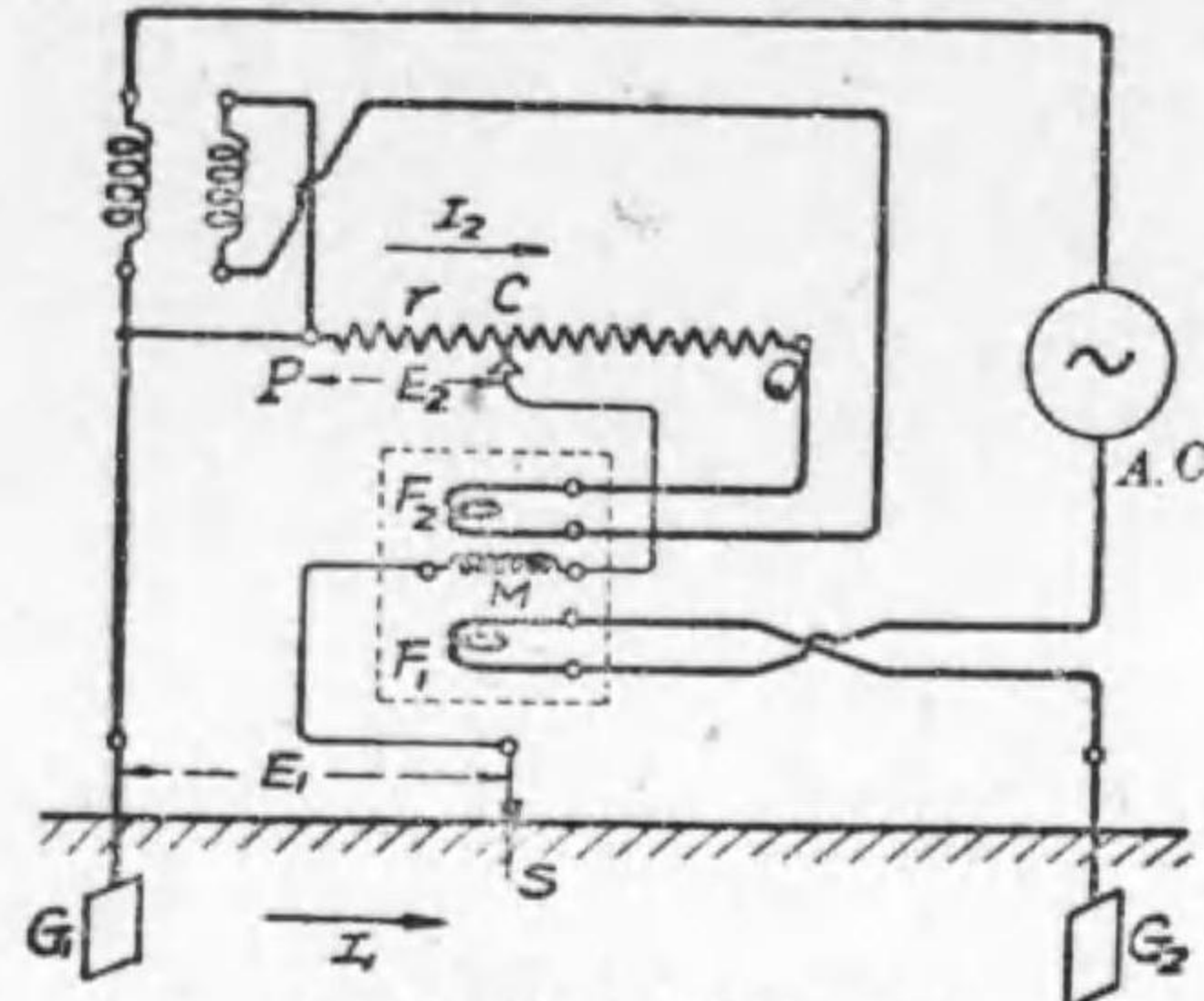
第 3-23 圖 甲



シーメンス接地抵抗計

ス接地抵抗計では検電器として電流計型計器を用ひてある。(電流計型計器の動作原理は後章で説明する。) 第 3-23 圖甲はシーメンス接地抵抗計を示す。乙圖は其の接続を示す。 F_1, F_2 は電流計型計器の固定線輪で、 M はその可動線輪である。 F_1, F_2 には夫々 I_1, I_2 を通じ、 M は CS 間に接続される。詳しい理論は省略するが、 E_1, E_2 の間に相差があつても其の値が等しい場合には、 F_1, F_2 の生ずる合成磁界と M

第 3-23 圖 乙



シーメンス接地抵抗計の原理

に通る電流とは 90 度の相差を生じ、可動線輪 M には何等のトルクを生じない。従つて PQ 上の摺動子を動かして、可動線輪 M に取付けられた指針がその目盛盤上の中央の零位を指示した場合の摺動子の位置を C とせば、 E_1 と E_2 とは値が相等しいから、 $G_1 = r$ となる。

交流電源 $A.C.$ は把手を以つて回轉する磁石交流發電機で、把手を 120 回/分位の速さで廻すと 35 サイクル/秒の交流を發生するものである。通常補助地板 G_2 を G_1 から 40 米の距離に設け、其の中間に探針 S を挿込んで測定を行ふのである。シーメンス新接地抵抗計では検電器として高價な電流計型計器の代りに他の原理による検電器を用ひたものが作られて居る。

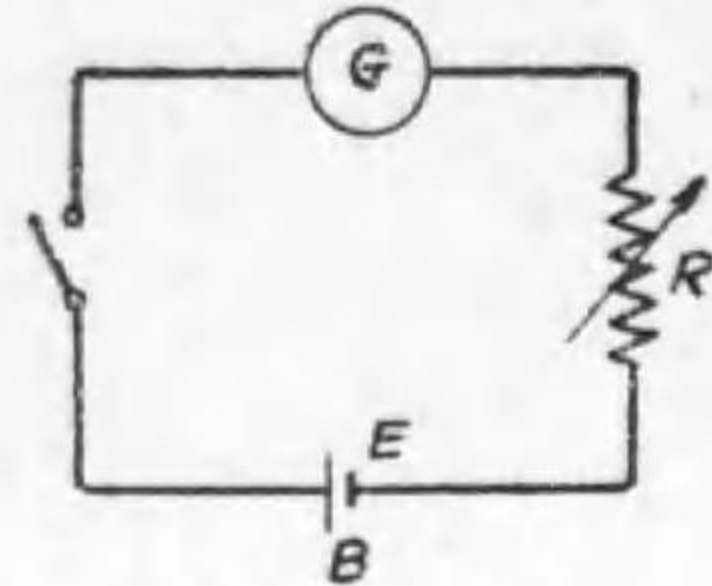
尙ほ接地抵抗計には、上述のものゝ外に種々の構造のものがあるが、その説明は省略する。

18. 電池内部抵抗の測定

電池の内部抵抗は、成極作用のためにその電流の値により抵抗の値が異なるものである。茲に電池自身を試験電源とする二三の方法と交流電源を使用するコーラッシュ・ブリッチ法とを説明しよう。

(イ)半傾斜法 (half-deflection method) 第 3-24 圖に示す様に既知抵抗の検流計 G 、可變抵抗 R 及び測定すべき電池 B を直列に接続し、先づ R の値が R_1 の時の検流計の振れ d を讀む。次に R の値を増して検

第 3-24 圖



半傾斜法

流計の振れが前の半分 $\frac{d}{2}$ なる時の R の値を求め之れを R_2 とする。検流計定数を K , 電池の起電力を E , 被测抵抗を B とせば, 二回の電流は夫々次の如くなる。

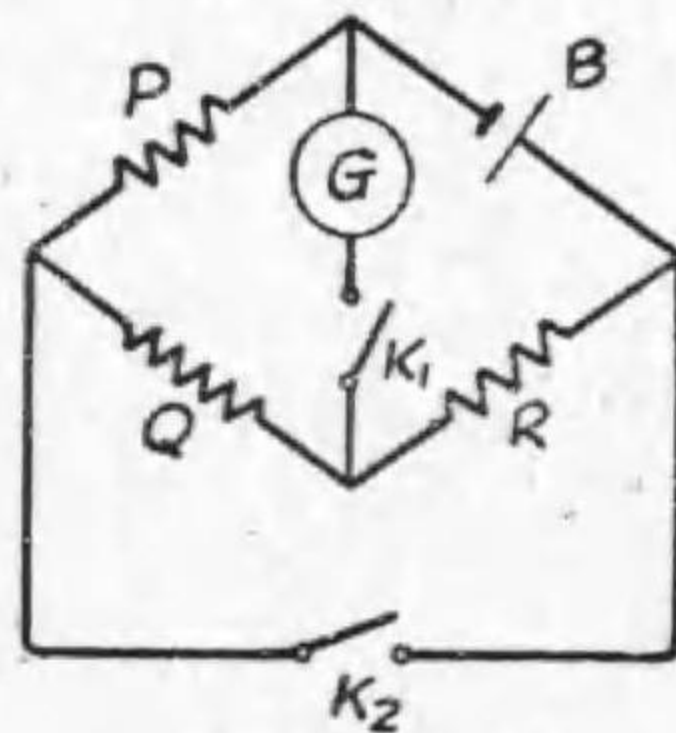
$$Kd = \frac{E}{B+G+R_1} \quad \text{及び} \quad K\left(\frac{d}{2}\right) = \frac{E}{B+G+R_2}$$

此の二式から, B の値は次式で算出される譯である。

$$B = R_2 - 2R_1 - G$$

(ロ) マンス法 (Mance's method) 此の方法は検流計抵抗を測定するケルヴィン法とよく似て居る。第 3-25 圖はマンス法の接続を示す。測定すべき電池 B をホイートストーン・ブリッジの一邊に接続し, ブリッジ電源を取除き其の位置に電鍵 K_2 を備へる。此の實驗では検流計 G に大なる電流が流れるから, 高抵抗の検流計を用ひるか又は高抵抗を検流計に直列に接続して置くべきである。検流計電鍵 K_1 を閉ちて置いて, P, Q, R

第 3-25 圖



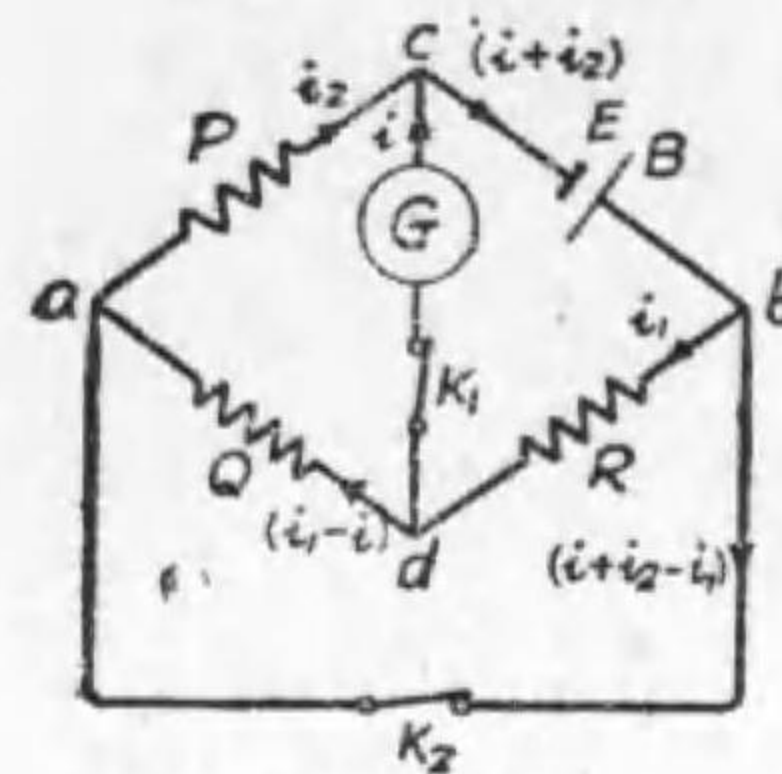
マンス法

を適當に調整して K_2 を閉ちても開いても検流計の振れが變らないで一定の振れである場合を見出す。此の場合には次の關係がある。(註参照)

$$B = \frac{P}{Q} R$$

此の方法の缺點は K_2 を開閉する事により, 電池電流が變はり電池の抵抗を變へる傾向がある事である。又短時間に成極作用を生ずる様な電池に對しては本法は不適當である。

第 3-26 圖



マンス法の原理

註 第 3-26 圖に示す様に K_2 を閉ちた場合の各部の電流方向を圖示の如くに取り, G, R, P の電流の値を夫々 i, i_1, i_2 とせば, キルヒホッフ第一法則により, B, Q, K_2 の電流の値は圖に記入せる通りとなる。 $dcbd$ 回路及び $acda$ 回路にキルヒホッフ第二法則を適用して次の二式を得る。

$$iG + B(i+i_2) + i_1R = E \quad \text{及び}$$

$$i_2P - iG + Q(i_1 - i) = 0$$

此の二式を書き換へると,

$$\left. \begin{aligned} i_1R + i_2B &= E - i(G+B) & (イ) \\ i_1Q + i_2P &= i(G+Q) & (ロ) \end{aligned} \right\} (A)$$

今 K_2 を開いた場合にも検流計電流 i は變はらない故, K_2 を開いた場合の R, P の電流を夫々 i_1', i_2' とすれば, 此の場合 E と i とは變はらないから前式 (A) に於て, R の電流 i_1 の代りに i_1' , 又 P の電流 i_2 の代りに i_2' を入れて次の關係を得る。

$$\left. \begin{aligned} i_1'R + i_2'B &= E - i(G+B) & (ハ) \\ i_1'Q + i_2'P &= i(G+Q) & (ニ) \end{aligned} \right\} (B)$$

故に (イ), (ハ) 及び (ロ), (ニ) より次の關係を得る。

$$\left. \begin{aligned} i_1R + i_2B &= i_1'R + i_2'B & (ホ) \\ i_1Q + i_2P &= i_1'Q + i_2'P & (ヘ) \end{aligned} \right\} \therefore \begin{cases} R(i_1 - i_1') = B(i_2' - i_2) & (ト) \\ Q(i_1 - i_1') = P(i_2' - i_2) & (チ) \end{cases}$$

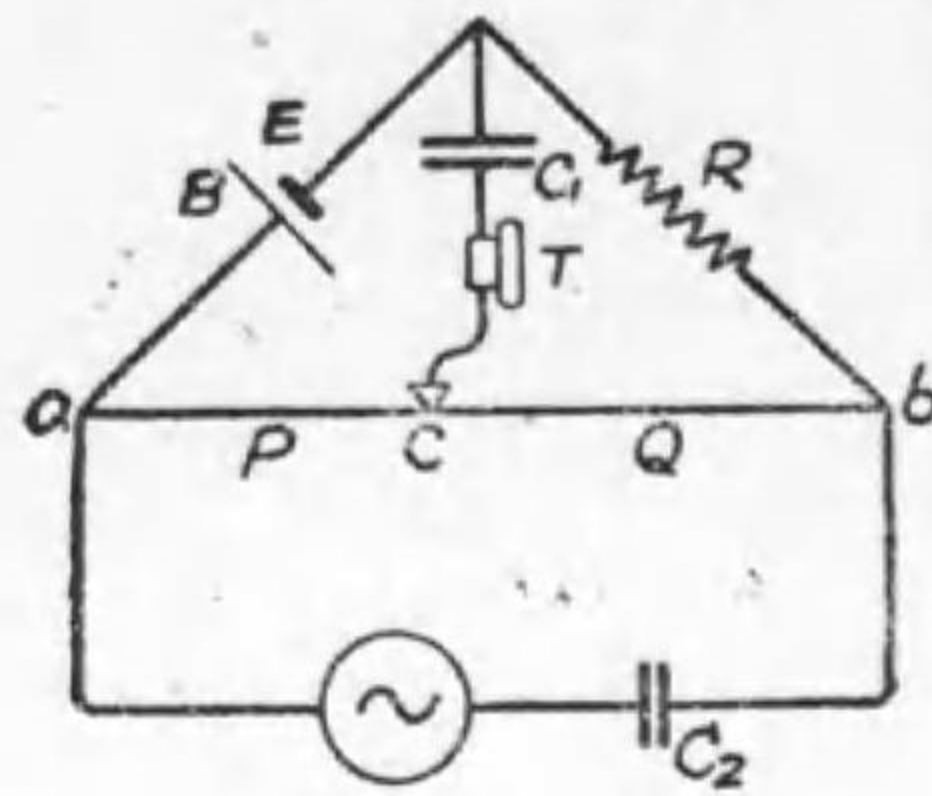
(ト), (チ) 兩式を邊々割れば,

$$\frac{R}{Q} = \frac{B}{P}$$

$$\therefore B = \frac{P}{Q} R$$

(ハ) 交流ブリッジ法 之れは電解液の抵抗測定に用ひるコーラ・シュ・ブリッジ法である。第 3-27 圖の様に, コーラ・シュ・ブリッジの一邊に測定

第 3-27 圖



交流ブリッジ法

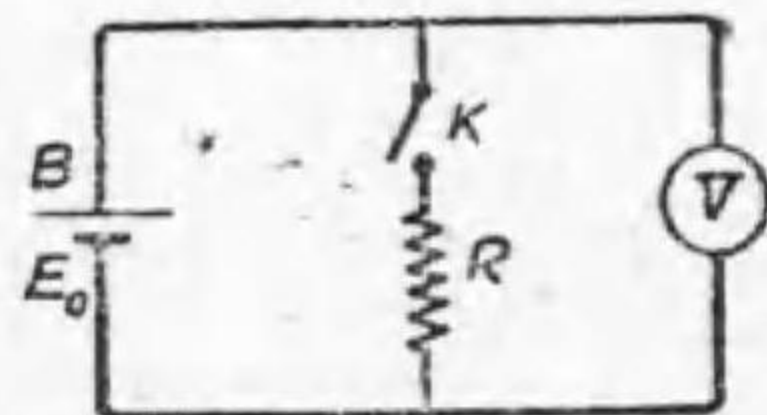
すべき電池 B を接続し、尙ほ交流電源及び受話器 T の回路に夫々蓄電器 C_1 , C_2 を接続し置き、之れ等の回路に直流が通じない様にして置く。 R 又は摺動線上の摺動子 C を調整して受話器 T の無音となる場合を見出す。平衡せる場合は

$$B = \frac{P}{Q} R$$

此の場合に電池による直流は $B P Q R$ に通ずる故、電池を流るゝ直流 i は $i = \frac{E}{B+P+Q+R}$ にて求められる。従つて R の値を種々に變じて此の實驗を繰返へし、電池抵抗が電流増加によつて如何に變化するかを研究する事が出来る。

(二)電壓計法 此の方法は近似的方法で、第3-28圖に示す様に、電壓計 V 、電池 B 、既知抵抗 R を接続する。先

第 3-28 圖



電 壓 計 法

づ電鍵 K を開き置き、電池の電壓 E_0 を電壓計で讀む。(電壓計の抵抗は高いから、 E_0 は實用上電池の起電力と見做される。) 次に K を閉ちて電池の端子電壓 E を電壓計で讀む。電壓計は高抵抗であるから、電壓計電流を閉却して、端子電壓 E は、

$$E = \frac{E_0}{B+R} R$$

$$\therefore B = \frac{E_0 - E}{E} R$$

蓄電池の充電又は放電の場合の抵抗を電壓計及び電流計を用ひて測る事

が出来る。即ち充電の場合は、充電々流 I_c を測ると共に蓄電池の端子電壓 E を測り、又別に蓄電池に電流を通じない場合の電壓 E_0 を測れば、此の場合の蓄電池の内部抵抗 B_c は、次式で算出される。

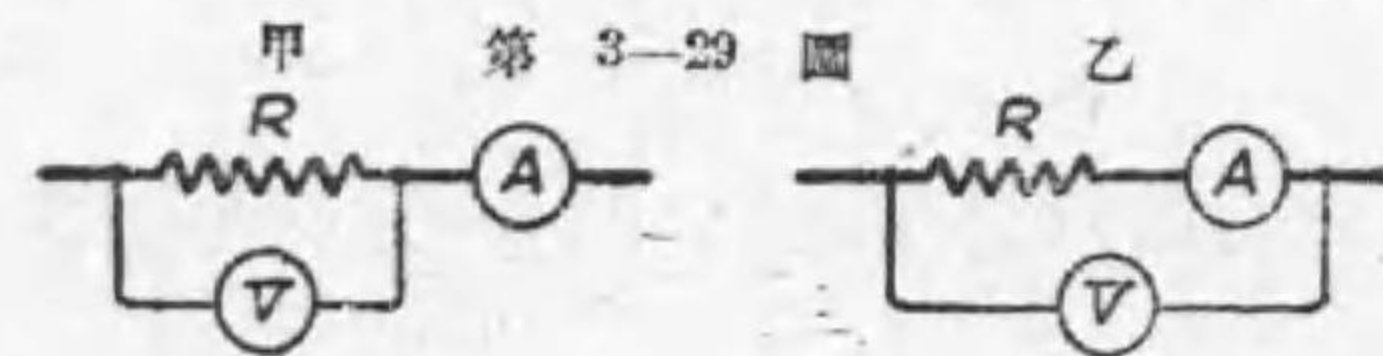
$$B_c = \frac{E - E_0}{I_c}$$

又放電の場合の放電々流 I_a を測ると共に端子電壓 E' を測り、電流を通さない場合の蓄電池の電壓 E_0' を別に測れば、此の場合の内部抵抗 B_a は、

$$B_a = \frac{E_0' - E'}{I_a}$$

問 題 (選試)

1. ホイートストーン・ブリッジに依る電氣抵抗測定の原理を説明せよ。
2. ホイートストーン・ブリッジを用ひて抵抗を測定するに當り、先づ電池電鍵を閉ち而して後に檢流計電鍵を閉づる事を適當とする理由を述べよ。
3. 檢流計あり、他の檢流計を用ひずして其の抵抗を測定する方法の一を記載せよ。
4. ブリッジ用抵抗線の抵抗線輪の配列方式2種を挙げ、其の優劣を説明せよ。
5. 第3-29圖甲の如き接続を以つて R なる抵抗を電流計と電壓計とを用ひて計りしに 15 アムペア、30 ヴォルトを示せり。而して此

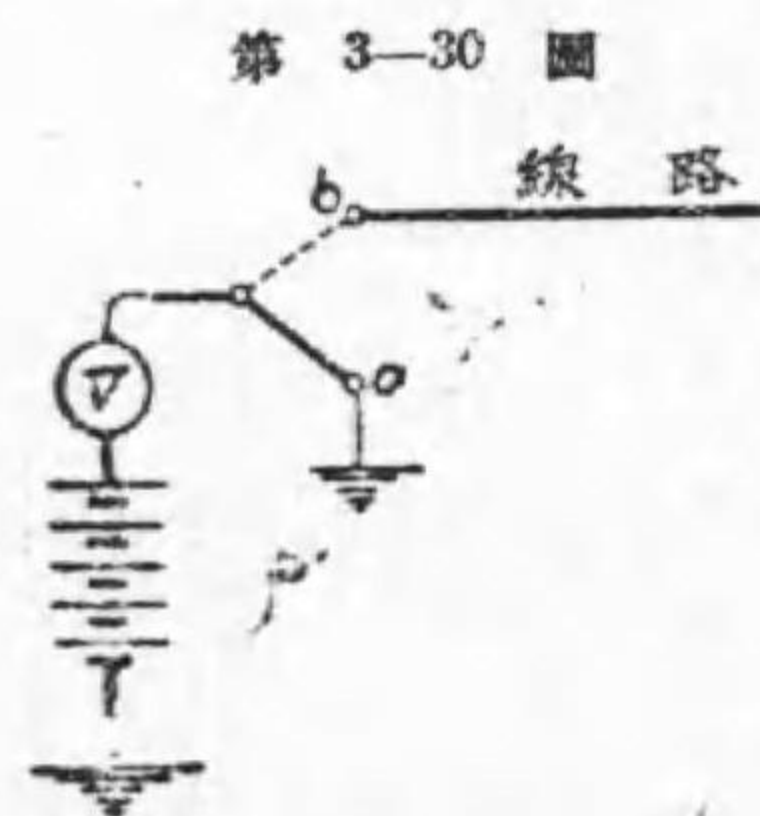


の電壓計の抵抗甚だ小にして僅かに 20 オーム

なりと云ふ。 R を計算せよ。

答 2.22 オーム

6. 第3-29 圖乙の如く電圧計及び電流計を接続し、 R の抵抗を測定せんとす。電流計の讀數 0.5 アムペア、電圧計の讀數 6 ヴォルトなる時は R の抵抗は幾オームなるか。但し電圧計及び電流計は誤差なきものとし、電流計の抵抗は 1.2 オームとす。 答 10.8 オーム
7. ケルヴィン・ダブル・ブリッジの原理及び用途を述べよ。
8. 検流計を用ひて絶縁抵抗を測定する方法を説明せよ。
9. 護謨被覆電線を購入するに當り、其の絶縁抵抗を精密に測定する方法を述べよ。
10. メガーの構造の要點を圖示し其の作用を説明せよ。
11. 第3-30 圖の如き接続により、既知抵抗の電圧計を用ひて架空電線



路の絶縁抵抗を測定する場合に、開閉器を a 側に閉ぢたる時に電圧計の指示 E_0 ヴォルトにして、 b 側に閉ぢたる時は E ヴォルトなりしと云ふ。線路の絶縁抵抗を求めよ。但し電圧計の抵抗は R オームとす。

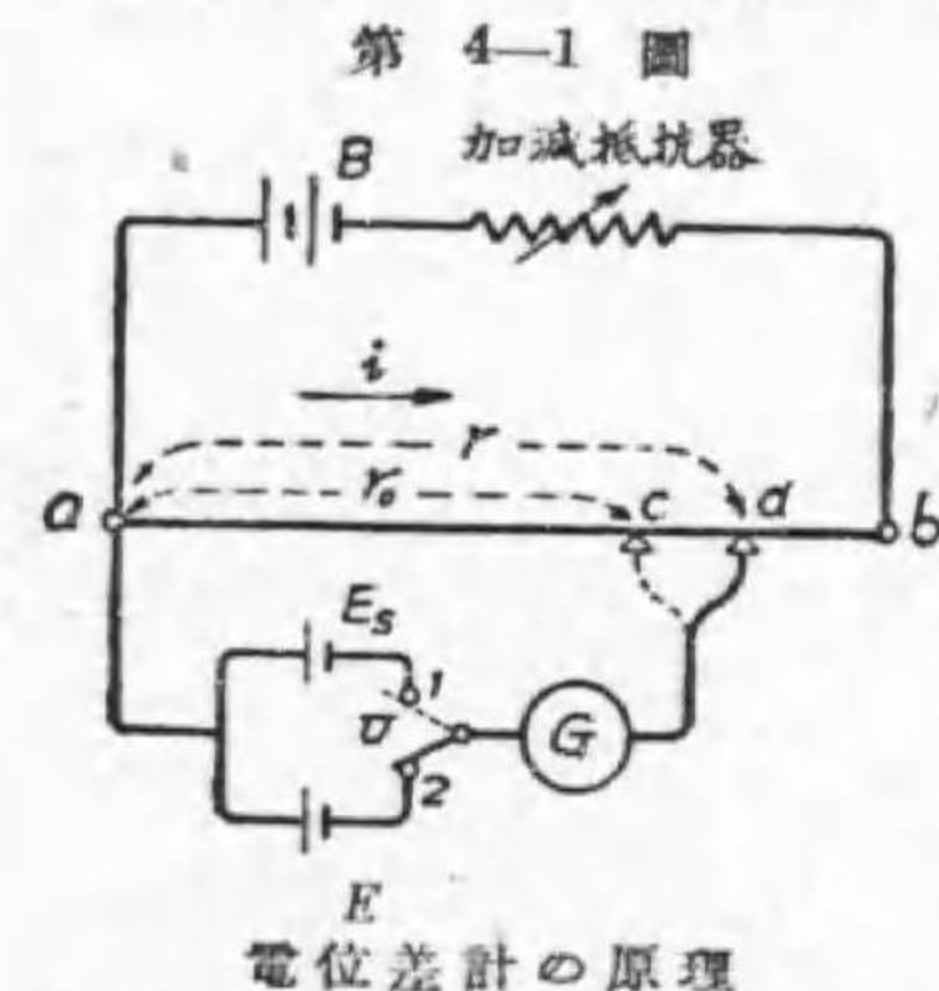
$$\text{答 } \frac{E_0 - E}{E} R \text{ オーム}$$

12. 抵抗を測定するに交流を用ふるを必要とする場合を挙げ、其の理由を説明し且つ其の方法を記載せよ。
13. コーラッシュ・ブリッジの原理及び用途を記せ。
14. 地板の抵抗を測定する方法の一に就き説明せよ。

第四章 電 位 差 計

1. 電位差計の原理 電位差計 (potentiometer) とは零

位法により標準電池の起電力と比較して任意の起電力を測定する装置である。電位差計には直流電位差計の外に交流電位差計もあるが、本書では後者を説明しないで専ら前者のみに就いて説明する。第4-1 圖は電位差計



電位差計の原理

の原理を示すものである。 ab は一定の抵抗で、之れに蓄電池 B から一定値の電流 i を通じ置く。先づ開閉器 U を點線で示す様に (1) に閉ぢて標準電池 E_s と検流計 G とを直列とし、 ab 抵抗線上の摺動子を動かして検流計が振れない場合の位置を c 點とする。 ac

の抵抗を r_0 とせば、 $acGE_s a$ 回路にキルヒホッフ第二法則を適用して次の関係が得られる。

$$i r_0 = E_s \quad (イ)$$

次に開閉器 U を實線で示す様に (2) に閉ぢて摺動子を動かして検流計が振れない場合の位置を見出し之れを d 點とする。 ad の抵抗を r とすれば、 $adGE a$ 回路にキルヒホッフ第二法則を適用すると次の関係が得られる。

$$i r = E \quad (ロ)$$

(イ) の i の値を (ロ) に代入して、

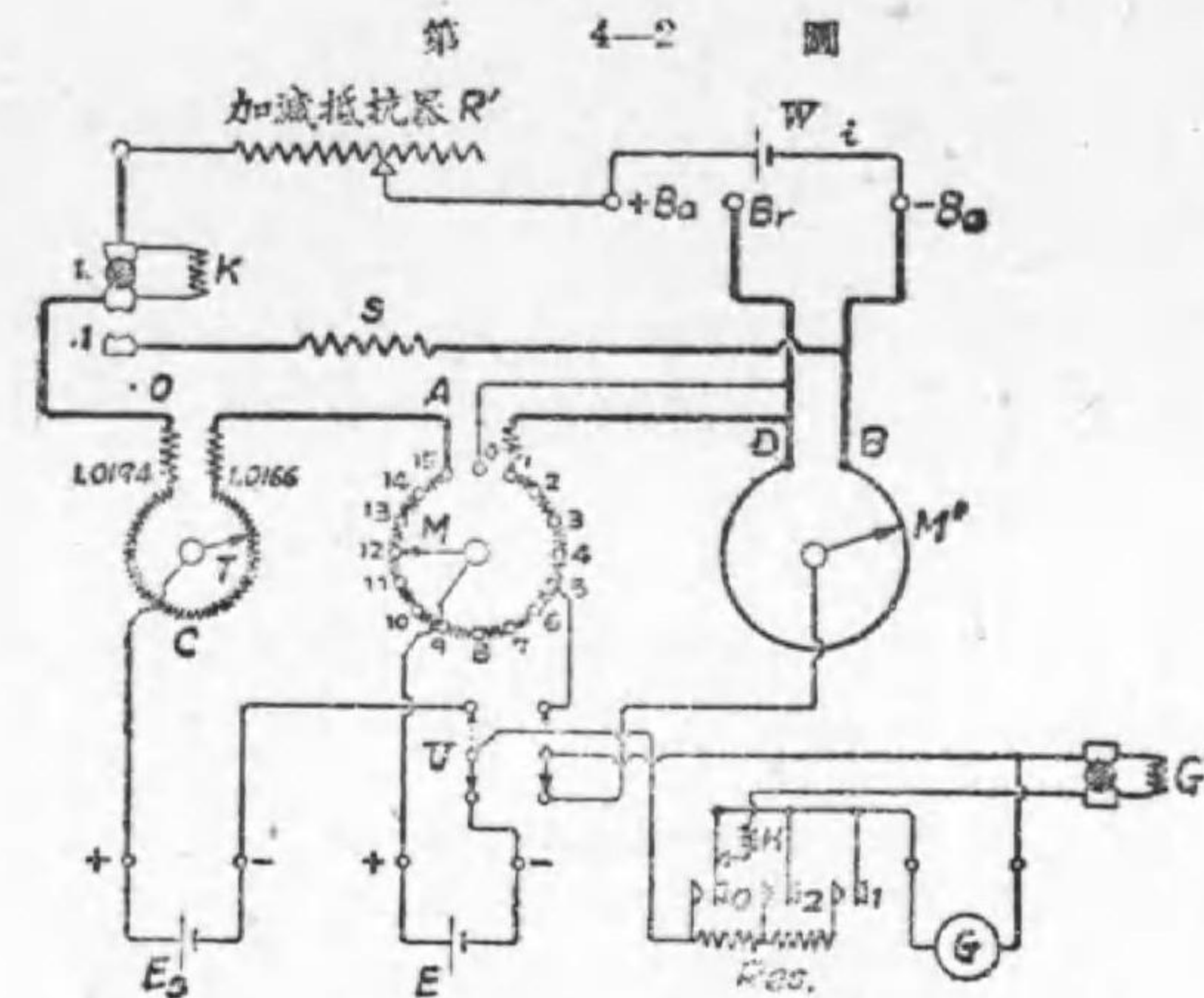
$$E = ir = \frac{E_s r}{r_0}$$

即ち測定せんとする電池の起電力 E は E_s, r_0, r の値より求められる。之れが電位差計の原理である。 i を一定にして置けば、電位差計抵抗 ab 上に於て、抵抗値 r の代りに (ir) なる電圧値を目盛つて置けば直ちに電圧 E が讀まれる譯である。尙ほ E_s は温度に依り異なる値を有する（第一章参照）から、 i を一定ならしむる爲には其の時の温度に應じ r_0 の値も變へて置く。仍つて實際の電位差計では、電位差計抵抗 ab に適當な値のものを用ひる。 U を (1) 側に閉ぢ其の時の温度に於ける E_s に應ずる抵抗 ac の適當な値 r_0 の時、檢流計が振れない様に加減抵抗器を調整し置いて一定の電位差計動作電流 i を通じ置き、次に U を (2) 側に閉ぢて檢流計が振れない場合の ad の抵抗 r の電壓降下從つて被测起電力 E を讀む様に出て居る。

電位差計抵抗の構成法には種々あるが、低抵抗型のものと同抵抗型のものとの大別する事が出来る。低抵抗型のは抵抗線輪と摺觸線との組合せから出来て居て、之れを一名摺觸線型電位差計とも稱する。又高抵抗型電位差計は抵抗線輪の組合せから出来て居て、之れを一名抵抗線輪型電位差計とも稱する。低抵抗型電位差計の特徴は測定之感度が良い事であり、又高抵抗型電位差計の特徴は動作電流が極めて小なる結果、線輪の加熱作用が少く蓄電池 B の電壓の變化も小さい事である。

2. 電位差計の實例

(イ) 低抵抗型電位差計 第 4-2 圖は低抵抗型の一列で、米國リープ・エンド・ノースラップ (Leeds & Northrup) 會社製の電位差計の接続圖



リープ會社電位差計

を示す。電位差計抵抗は OCA の抵抗と AD の抵抗線輪と DB の摺觸線とから成る。 AD は 5 オーム宛の抵抗線輪 15 個から成る。摺觸線 DB は直径 15 厘の大理石圓筒の周邊に設けた螺旋溝に巻き付けられ、その巻数は 11 回である。此の摺觸線に塵の附く事や機械的損傷を防ぐため、その圓筒上の巻線と同一のピッチ (pitch) を有する螺旋溝の上に廻り得る可動蓋を備へ、その内面には摺觸線と常に接觸して居る摺動子 M' が取付けられて居る。又蓋の下縁に摺觸線一卷の 100 等分目盛があるから、 DB の全長 (その抵抗は 5.5 オームある) は 1100 等分される譯になる。 OCA の抵抗は、標準電池により、電位差計動作電流 i を調整する際、其の時の温度に於ける E_s に應ずる抵抗 r_0 の一部として使用される温度補償用抵抗である。又 S 及び K なる抵抗は檢流計の補償型分流器と同一原理を應用せるもので、電位差計抵抗に並列の抵抗 S は電位差計抵抗の $\frac{1}{9}$ の値、又 K なる直列抵抗は電位差計抵抗の $\frac{9}{10}$ の値を有するものを用ひてある。普通使用する場合には栓を上側の 1. に挿込む。栓を下側の .1 に挿替へれば、電位差計には前の場

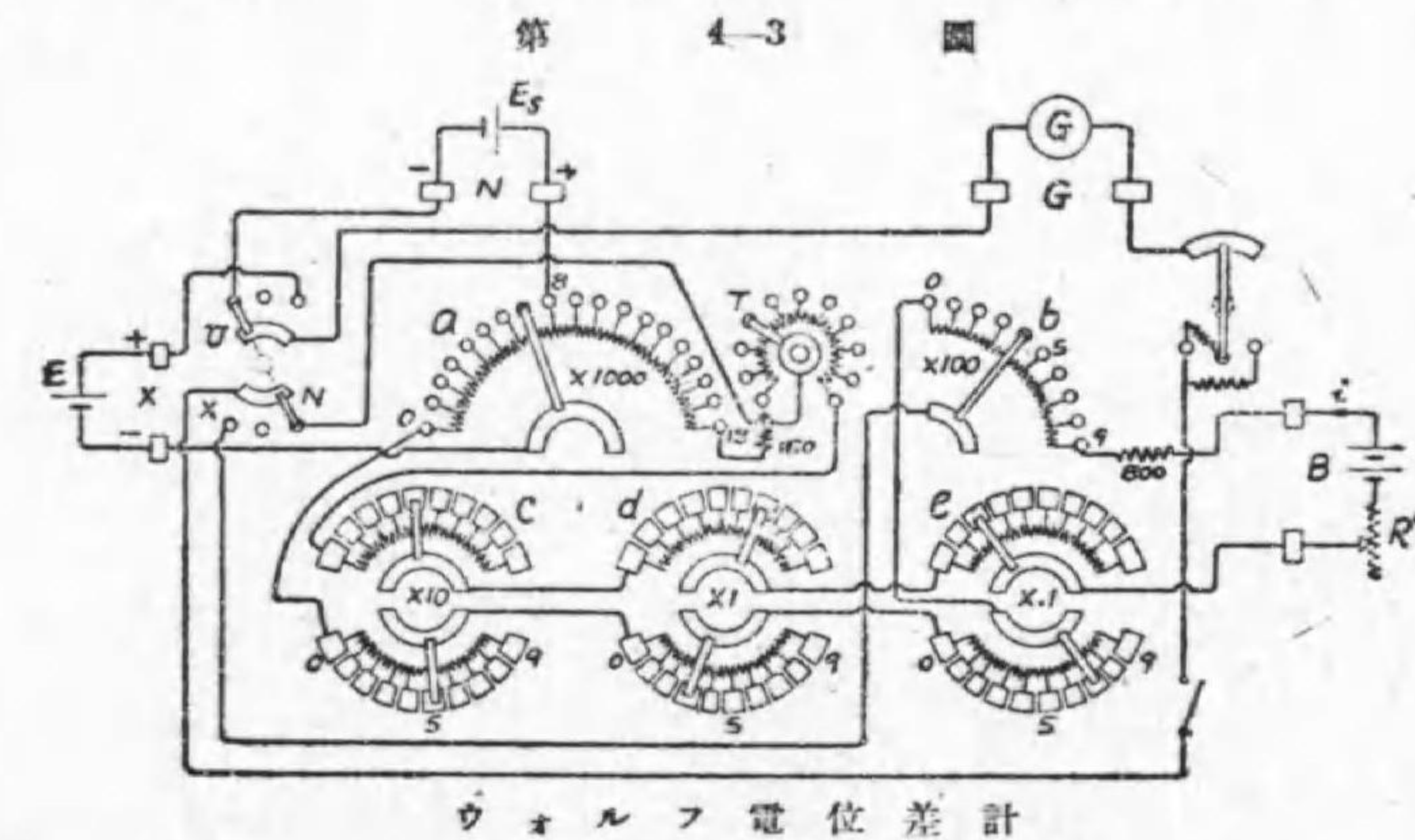
合の $\frac{1}{10}$ の電流が流れ測定範囲が十分の一になる。

測定に際しては、先づ栓を上側の 1. に挿込み置き、動作電流を調整する。それには其の時の温度に依る標準電池の起電力 E_s の値に應じた U の目盛 (E_s の値の目盛つてある) の點に接點 T を定め、開閉器 U を上側即ち E_s 側に閉ぢる時は、 E_s の他端は檢流計を経て常に抵抗線輪 AD 上の五つ目の點 5 に接続されて居るから、加減抵抗器 R を調整して檢流計の振れを零ならしめる。此の場合には、 $TA5$ 間の抵抗電壓降下 iR_0 が丁度 E_s に等しく、動作電流 $i = \frac{0.1}{5} = 0.02$ アムペアとなる。従つて抵抗線輪 1 個につき 0.1 ヴォルト宛の電壓降下である。故に摺觸線一目盛は $\frac{0.1}{1000}$ ヴォルトになつて居る。次に被測電壓 E を測るには、 U を下側に閉ぢて、接點 M 及び M' を動かして檢流計の振れを零ならしめると、 MM' 間の電壓降下が即ち求むる電壓 E の値である。尙ほ檢流計側の抵抗 $Res.$ は、平衡に未だ達しない場合に電池と檢流計に電流が通じるから、始め電鍵 1 を押して大抵抗を入れ、次第に平衡に近づくに従つて電鍵 2 を押して小抵抗とし、全く平衡を得るに至つて電鍵 0 を押して、測定の感度を良くする爲に使用する。又抵抗 G' は、若し $Res.$ の電鍵の何れをも押さない場合に、檢流計回路が切れて無限大抵抗となり、制動不足のために檢流計が中々靜止しないから、そんな事のない様に、檢流計抵抗の如何によつて、抵抗 H と共に臨界制動を保持しめるための抵抗である。

栓を 1. の孔に挿せば、最高 1.6 V 又最低は 0.1 mV までの電壓が得られる。次に栓を .1 の孔に挿換へると、前の十分の一即ち最高 0.16 V 又最低は 0.01 mV まで得られる。尙ほ B_r 端子は摺觸線の校正のために備へたものである。此の校正の場合には、蓄電池 W を B_r と $-B_a$ に接続し、

被測起電力 E を接続すべき兩端子を短絡し、又 $-B_a$ と電位差計の左の端子とを短絡して、ホイートストーン・ブリッジを形成せしめ、抵抗線輪の各抵抗で摺觸線の正否を検するのである。

(□)高抵抗型電位差計 第 4—3 圖は高抵抗型に屬するもので、獨逸オットー・ヴォルフ (O. Wolff) 會社製の新型電位差計を示す。之れは a, b, c, d, e の五種の抵抗線輪と外に標準電池の温度補償用抵抗 T と 180 オ



ーム及び 800 オームの抵抗より成り、全抵抗が 20 000 オームある。 a, b, c, d, e 線輪は次の様になつて居る。

- a ……1000 オーム線輪 18 個 1 組,
- b ……100 オーム線輪 9 個 1 組,
- c ……10 オーム線輪 9 個 2 組,
- d ……1 オーム線輪 9 個 2 組,
- e ……0.1 オーム線輪 9 個 2 組,

c, d, e を各二組にしたのは、被測起電力 E を檢流計回路に閉ぢて平衡を得るために各線輪の接觸子をどの位置に置くも、檢流計回路に接続された丈けの間の抵抗が減じた丈けの抵抗を蓄電池回路に入れる爲で、かくし

て常に電位差計抵抗を一定にする事が出来る。[此の様な抵抗器をフォイスナー型 (Feusner type) 抵抗器と稱する]。動作電流は 0.1 mA であるから a, b, c, d, e 各線輪 1 個宛の電圧降下は夫々 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001, 0.00001 V 宛となる。

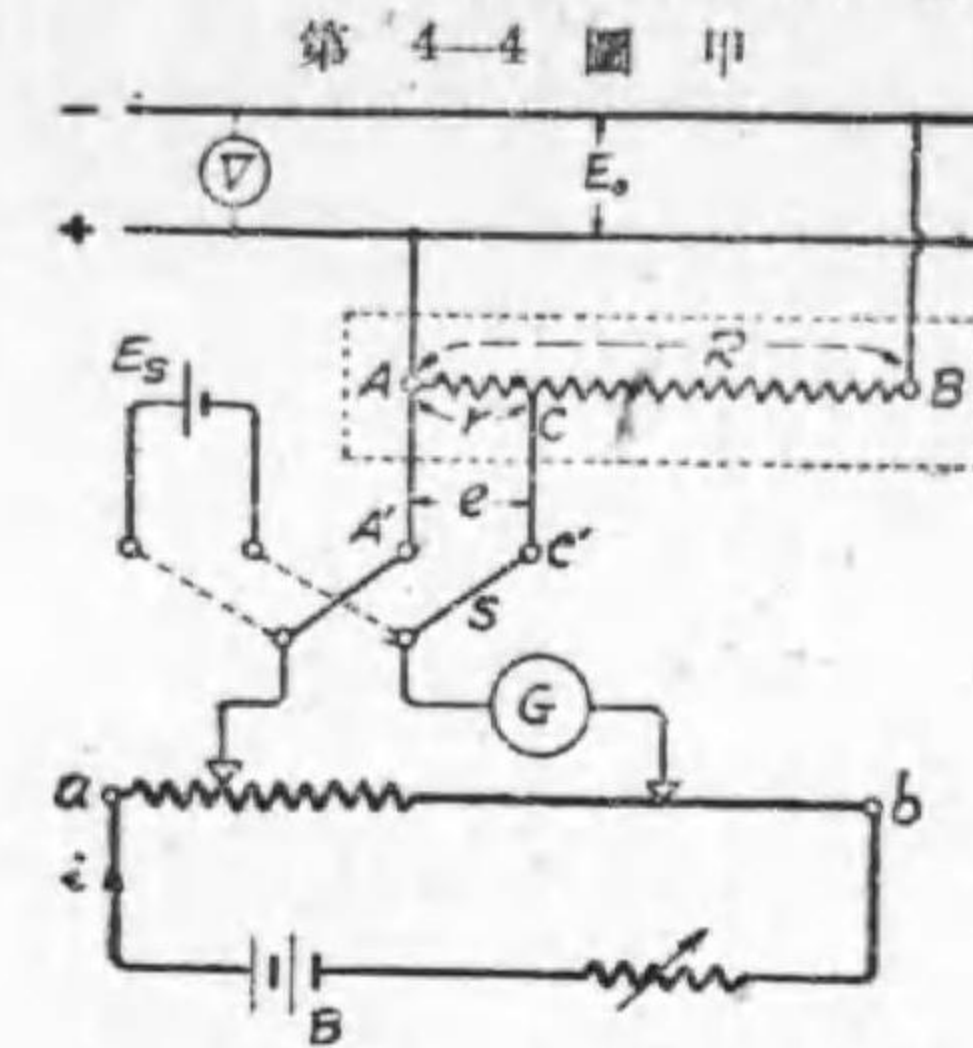
先づ標準電池 E_s により電位差計の動作電流 i を調整するには、リーゾ型と同様に、温度補償用抵抗器の接觸子 T を測定温度に於ける E_s の値の目盛の所に定め、切替開閉器 U を N 側に閉ぢて、電源 B の直列加減抵抗器 R' を調整して検流計の平衡を見出せばよい。(此の場合には $i = \frac{E_s}{r_0}$ で、 r_0 は ST 間の抵抗である。) 此の場合には電位差計には 0.1mA の電流が流れる。次に、起電力 E を測定するには、 U を X 側に切替へて a, b, c, d, e の各接觸子を調整し平衡を得れば、各電圧降下の和が即ち E の値である。検流計に直列の抵抗は平衡に近づくに従つて次第に之れを減少し、遂に零とすべき事は (イ) の場合と同様である。以上の電位差計の外に、低抵抗型と高抵抗型との利點を併有する横河電機製作所式電位差計や、各部の熱起電力の影響を減するものもある。

3. 電位差計の應用 電位差計は零位法を用ひるから其の測定結果は確度が高い。従つて之れを用ひて工業用の直流電圧、電流及び電力等を測定する方法を講ずると、確度の高い測定が出来、又之れによつて直流電圧計、電流計等の正否を判別する事が出来る譯である。

(イ) 直流電圧の測定及び電圧計の較正 電位差計のみで測定し得る最大の電圧は 2 ヴォルトにも足りない低電圧である。これ以上の高い直流電圧を測るには、電圧降下の原理を應用した分壓箱 (voltage box) と稱する抵抗

器を併用するのである。

第 4-4 圖甲は電位差計 ab に、分壓箱 AB を併用して直流電圧 E_0 を測定する場合の原理を示す。分壓箱 AB は高抵抗 R から成り、之れに全



第 4-4 圖 甲
直流電壓測定及び電圧計の較正

抵抗 R の分數に相當する抵抗 r の兩端から AA' , CC' の口出 (tap) を引出したものである。分壓箱 AB の兩端に電圧 E_0 を與へて置いて、其の分數の電壓即ち $A'C'$ 間の電壓 e を電位差計で測定する。 AB 間の電壓と AC 間の電壓との比は抵抗 R と抵抗 r との比に等しいから、

$$\frac{E_0}{e} = \frac{R}{r} \quad \therefore E = e \frac{R}{r}$$

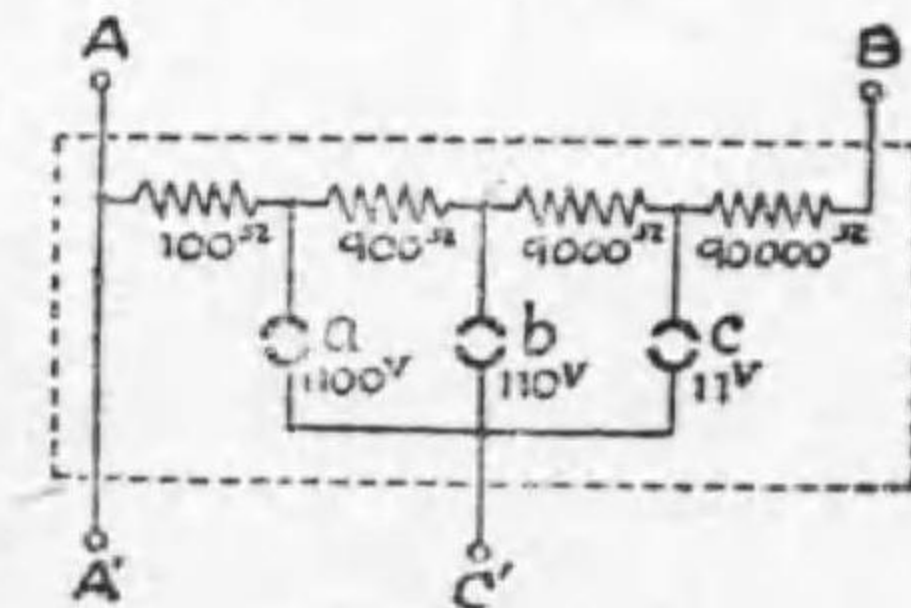
例へば、 $R=20\,000$ オーム、 $r=100$ オームで、 $e=1.275$ ヴォルトならば、被测電圧 E_0 は、

$$E_0 = 1.275 \times \frac{20\,000}{100} = 255 \text{ ヴォルト}$$

分壓箱には 20 000 オーム 300 V 用、30 000 オーム 450 V 用等種々のものがある。乙圖は 100 000 オーム 1 100 V

第 4-4 圖 乙

用の一例で、1 000 V 内外の電圧ならば、之れを AB に與へて孔 a に栓を挿して、 $A'C'$ 間の電圧を電位差計で測る。又 100 V 又は 10 V 内外の電圧ならば、之れを AB 間に與へ栓を b 又は c に挿し



1100V 用分壓箱

置いて、 $A'C'$ 間の電圧を電位差計で測る。

電位差計では通常一万分の一ヴォルト位迄は測定し得るから、分圧箱の分圧比が精確のものを用ふれば、上述の様にして測定した結果 E_0 は實用上被測電圧の眞値として良い譯である。此の理を應用して直流電圧計の讀みの正否を判断する事が出来る。若し電圧計 V を甲圖の如く接続して其の讀みを E ヴォルトなりとせば、眞値 E_0 から電圧計の讀み E を引いた $E_0 - E$ を此の電圧計の更正 (correction) と稱し、更に之れが電圧計の讀み E に対する比 $\frac{E_0 - E}{E}$ を更正率 (correction factor) と稱する。電圧計に限らず一般に計器の讀みを M 、眞値を T とせば、更正率 α は次式で表はされる。

$$\text{更正率 } \alpha = \frac{T - M}{M} \quad (イ)$$

此の式から、 $T = M(1 + \alpha)$ の関係があるから、 M 、 α を知つて置けば T が算出されるのである。

次に計器の誤差 (error) と云ふのは、計器の讀み M から眞値 T を引いたもの、眞値に対する比で表はす。即ち誤差 ϵ は次式で表はされる。

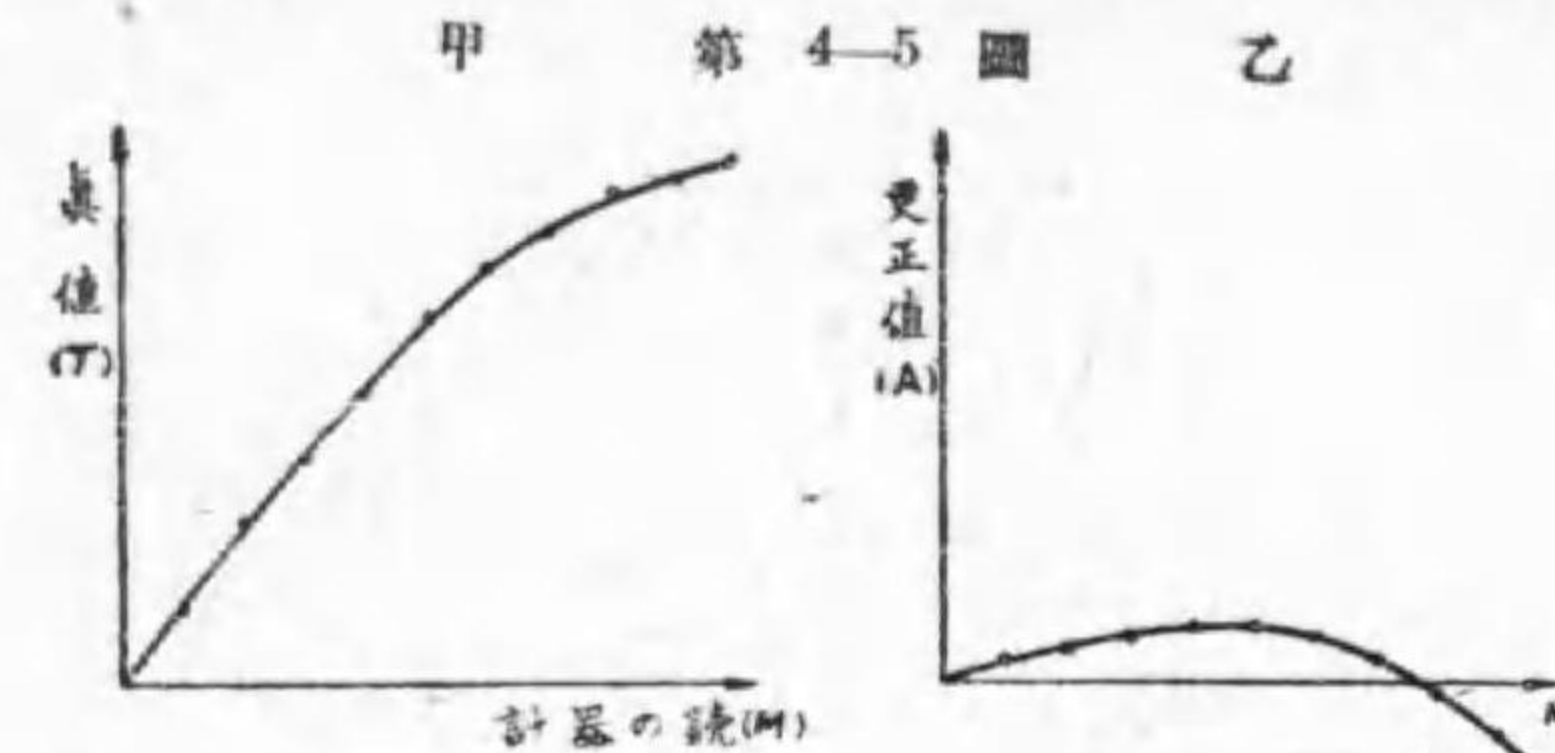
$$\text{誤差 } \epsilon = \frac{M - T}{T} \quad (ロ)$$

之れ等の誤差及び更正率は百分率で表はす。例へば、第 4-4 圖甲に於て、 $E_0 = 255 \text{ V}$ 、 $E = 250 \text{ V}$ ならば、此の場合の電圧計の誤差及び更正率は夫々次の如くなる。

$$\text{誤差 } \epsilon = \frac{250 - 255}{255} \times 100\% = -1.94\%$$

$$\text{更正率 } \alpha = \frac{255 - 250}{250} \times 100\% = +2.00\%$$

計器の目盛の正否を試験することを較正試験 (calibration test) と稱する。電圧計 V を第 4-4 圖甲の様にして電位差計で較正するには、電源側の電圧を調整して電圧計の指針をして試験せんとする目盛 E を指示せしめ、此の時の電位差計により測定した眞値 E_0 を求むれば、電圧計の更正率及び誤差を夫々上の (イ)、(ロ) の公式によつて算出し得る。斯様に

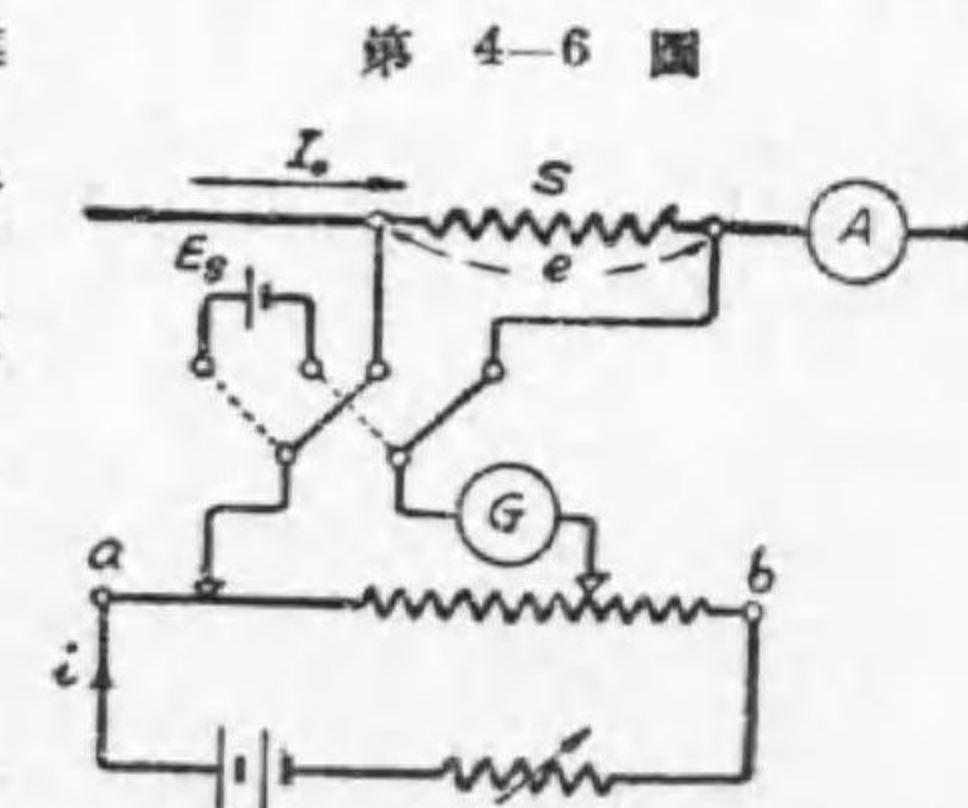


較 正 曲 線

電圧計の各目盛に就き同様な方法で試験し、計器の讀み M に対する眞値 T 、又は更正 ($A = T - M$) の關係を表又はグラフ

(第 4-5 圖甲、乙) にして置けば、その電圧計を使用する場合に便利である。計器の讀み M に対する眞値 T 、更正 A 又は更正率 α の關係を示す曲線を較正曲線 (calibration curve) と稱する。

(ロ) 直流電流の測定及び電流計の較正 電位差計は電圧を測定するものであるから、被測電流を適當な値の標準抵抗に通じ其の兩端の電圧を電位差計で測定すれば、オームの法則を利用して被測電流を算出することが出来る譯である。第 4-6 圖は此の原理により電流を測定する場合の接続圖である。 S は標準低抵抗器で之れを電位差計分流器と稱す



直流電流の測定及び電流計の較正

ることある。 S に通ずる被测電流を I_0 とし、 S の両端の電圧を電位差計で測り、これを e ヴォルトとせば、オームの法則より、被测電流 I_0 は、次式で求められる。

$$I_0 = \frac{e}{S}$$

分流器 S の値は被测電流の値に應じ第 4-1 表の如きものを用ひる。

第 4-1 表 分流器 S の 値

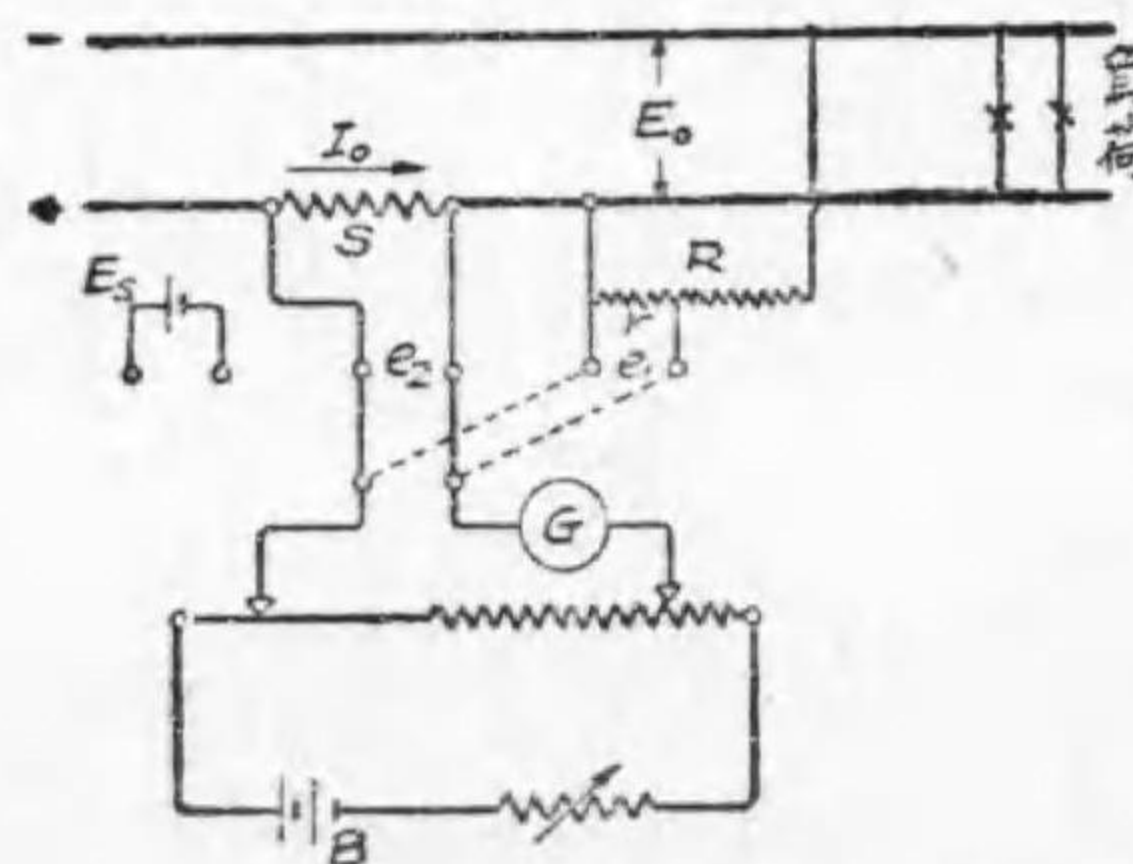
抵抗 S (オーム)	0.1	0.01	0.001	0.00004	0.00002	0.0001
最大電流 アムペア	15	100	600	1500	2000	3000

直流電流計を校正するには、圖の如く S と直列に電流計を接続し、電流計の読みを I とせば、此の時の電流計の誤差 ϵ 及び更正率 α は夫々次○如くなる。

$$\epsilon = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\%, \quad \alpha = \frac{I_0 - I}{I} \times 100\%$$

此の場合にも電流計の各目盛に就いて、それに対する眞値を求めて置き校正曲線を畫いて置けば、此の電流計を使用する場合に便利である。

第 4-7 圖



直流電力の測定

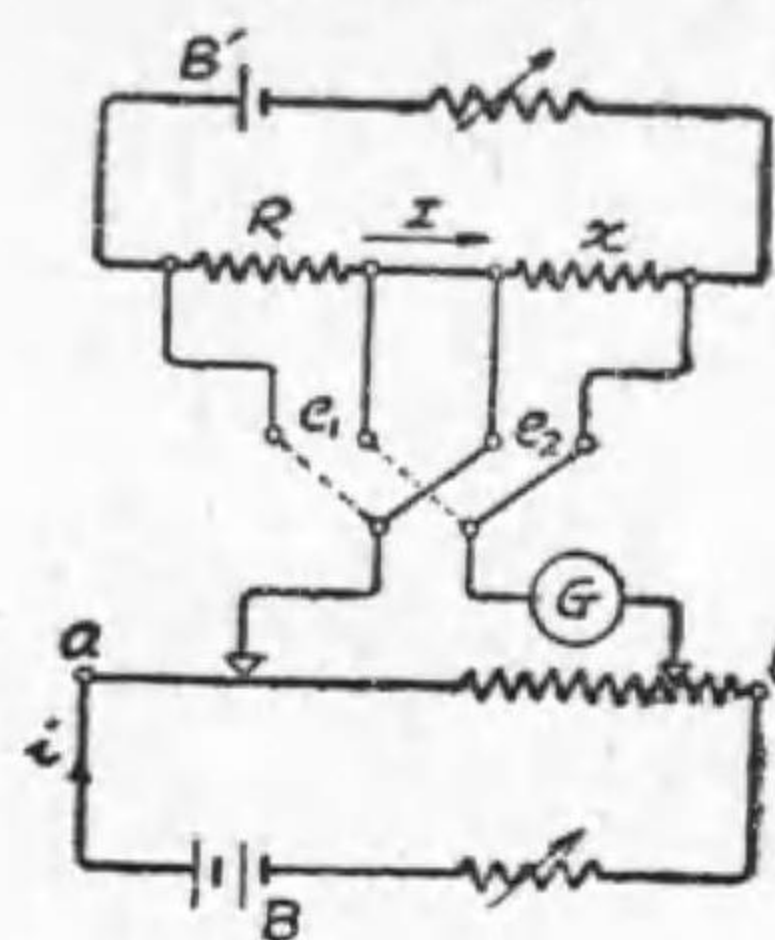
(ハ)直流電力の測定 (イ)及び(ロ)に於て電位差計に依り直流電圧及び電流を測定する方法を述べた。従つて此の二つの方法を併用すれば直流電力を測定し得る譯である。第 4-7 圖に示す様に分圧箱 R 及び分流器 S を接続し、電位差計により

電圧 e_1 を測定し、次に電圧 e_2 を測定する。負荷電圧を E_0 、電流を I_0 とせば、

$$E_0 = e_1 \frac{R}{r}, \quad I_0 = \frac{e_2}{S}$$

故に負荷の電力 $P_0 = E_0 I_0 = e_1 e_2 \frac{R}{rS}$ ワット

第 4-8 圖



低抵抗の測定

此の原理を利用して直流電力計を校正し得る事は明であるが、茲には之れを省略する。

(ニ)低抵抗の測定 第 4-8 圖は電位差計により低抵抗を測定する方法を示す。標準低抵抗 R と被测低抵抗 x とを直列に接続し、之れに直流電源 B' により一定電流 I を通じ置き、 R 及び x の電圧 e_1, e_2 を電位差計で測定する。

$$e_1 = IR, \quad e_2 = Ix \quad \therefore \frac{x}{R} = \frac{e_2}{e_1}$$

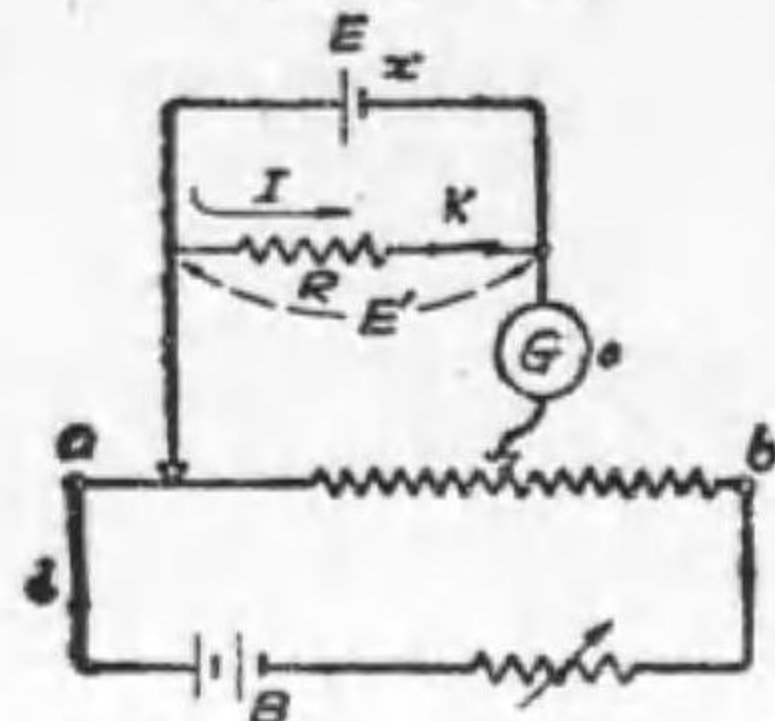
$$\therefore x = \frac{e_2}{e_1} R$$

尙ほ此の場合には、 e_2, e_1 の値を求めなくても $\frac{e_2}{e_1}$ なる比を知ればよいかから、電位差計の動作電流 i を精密に調整する必要はなく、只電位差計の電流 i を一定に保ち置きさへすれば、 $\frac{e_2}{e_1}$ の比は、平衡を得た各の場合の電位差計上の接點間の抵抗の比 $\frac{r_2}{r_1}$ に等しいから、 x は次式で算出される。

$$x = \frac{r_2}{r_1} R$$

(ホ)電池の内部抵抗の測定 第 4-9 圖に示す様に、測定すべき電池 E を接続する。先づ電鍵 K を開き置き、普通の方法で電位差計により電池の

第 4-9 圖



電池内部抵抗の測定

起電力 E を測定する。次に圖に示す様に K を閉じて電池に抵抗 R を接続し、電池の端子電圧 E' を普通の方法で電位差計で測定する。電池より R を通じて流れる電流 I は此の場合に、 $I = \frac{E}{x+R}$ であるから、端子電圧 $E' = IR = \frac{ER}{x+R}$ となる。此の式から電池の内部抵抗 x は、

$$x = \frac{E - E'}{E'} R$$

従つて R の値を種々に變化して同様の實驗を繰返へし、電池電流 I の増加に對し内部抵抗 x が如何に變化するかを研究する事が出来る。

問 題

1. 直流電位差計 (potentiometer) の原理を説明せよ。(選試)
2. 電位差計 (potentiometer) を用ひて直流電壓及び電流を測定する方法を説明せよ。(選試)

第五章 電壓及び電流測定器

1. 電氣計器の種類 電壓、電流其の他電氣諸量を測定するものを電氣計器 (electric meter) と稱し、これを動作上より分類すれば次の通りになる。

(イ) 指示計器 (indicating instrument)……被測量を指針により目盛盤上に指示する計器で、電壓計、電流計、電力計、力率計、周波計等は之れに屬する。

(ロ) 自記計器 (recording meter)……時々刻々變化する電氣諸量を圖紙上に記録する計器で、自記電壓計、自記電流計、自記電力計等は之れに屬する。

(ハ) 積算計器 (integrating meter)……或る期間内に消費された電力量又は電量を積算する計器で、積算電力計、電量計等は之れに屬する。

尙ほ以上の外に遠隔測定装置 (remote-measuring equipment or telemetering equipment) と稱し、被測量を遠く離れて測定する装置がある。之れは被測量に關係する量を發生する送量装置 (sender) と、之れを遠方に送る傳送線 (transmission line) と受量装置 (receiver) との三部分から成るものであるが、本書では遠隔計器 (telemeter) に就いては説明しない。

本章では指示計器中電壓及び電流の測定器に就いて述べる。

2. 指示計器の要素

電圧計及び電流計を説明するに先立ち一般指示計器の構造の要素を説明しよう。検流計と同様に、指示計器は構造上三つの要素即ち駆動トルクを生ずる装置、制御トルクを生ずる装置及び制動装置が必要である。尚ほ此の外に指針(pointer)、尖軸(pivot)及び軸承(bearing)、目盛盤(scale)及び之れ等を藏める外函(case)等が必要である。茲に各要素に就き説明しよう。

(イ)駆動トルクを生ずる装置 駆動トルクは被測定量の増減に伴ひ増減すべき事が必要である。かゝるトルクとしては、磁石と電流との間に働く力、電流と電流との間に働く力、磁界内の鉄片に働く力、電流に依る熱作用、二つの充電體間に働く静電力、回轉磁界内に在る導體に働くトルク等が利用せられる。此の駆動トルクを生ぜしむる原理によつて、計器は第5-1表の様に種々の型に分類される。

第5-1表 計器の分類

使用回路	型名	原理	計器
I. 直流回路	(イ)可動線輪型	磁石と電流間の力	電圧計, 電流計
II. 直流及び交流回路	(ロ)電流力計型	電流と電流間の力	電圧計, 電流計, 電力計, 力率計, 周波計, 同期檢定器
	(ハ)可動鐵片型	磁界内の鐵片に働く力	電圧計, 電流計
	(ニ)熱型 (ホ)静電型	電流の加熱作用 二充電體間の静電力	電圧計, 電流計 電圧計, 檢漏器
III. 交流回路	(ヘ)誘導型	回轉磁界内の導體に働く力	電圧計, 電流計, 電力計

以上の外に交流用として被測交流を整流器により整流し、之れを直流可動線輪型計器に通じて可動部分を動作せしめ、目盛盤には交流値を目盛つた整流型計器がある。尚ほ交流高電壓の最大値を測定する測定器として、

火花放電、コロナ放電、ネオン放電管の如き原理を利用したものもあるが之れ等は本書には述べない。

駆動トルクは成る可く大であつて、軸承等に於ける摩擦力が無視し得る程度を必要とする。然し駆動トルクを大にしようとして可動部分の重量が大になる様な事になつたら、摩擦も大になるから何等の利益もない事になる。一般に駆動トルクと摩擦力との比の大小を以つて計器の設計の良否を判断する目安とし、此の比を計器の機械的良度 (mechanical factor of merit, or ruggedness) と稱する。配電盤用計器の様に水平軸を有するものでは摩擦力は重量に比例し、又垂直軸を有する計器では摩擦力は重量の1.5乗に比例する。依つて可動部分の重量を瓦で表はした値を W とし、指針を 90° 回轉せしむるに要するトルクを瓦耗で表はした値を D とすると、水平軸を有する計器では $\frac{D}{W}$ 、又垂直軸を有する計器では $\frac{D}{W^{1.5}}$ で機械的良度を表はすので、之れが大なるもの程良くて耐久力が大である。

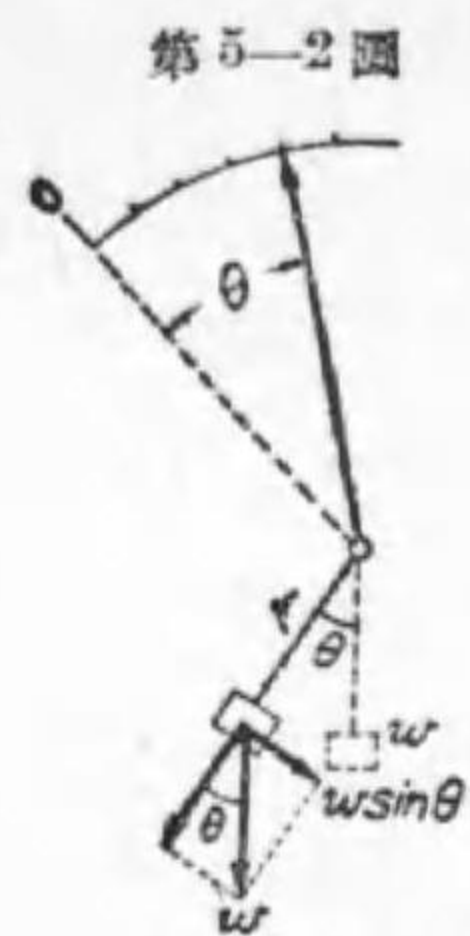
(ロ)制御装置 制御トルクを生ずる爲に普通用ひられる方法としては螺旋彈條 (spiral spring) を用ひる方法と重力 (gravity) を利用する方法とがある。



(a)螺旋彈條は、第5-1圖甲及び乙に示す様に、磷青銅 (phosphor bronze) の細い薄片を螺旋状にしたものゝ一端を可動部分の回轉軸に取付け他端は固定されたものである。指針が駆動トルクにより傾斜せられる時 (甲は螺旋が廣がり、乙は縮まる)、彈條は彈性の爲に元の零位に復歸しようとし制御トルクを生じる。駆動トルクと制御トルクと平衡して指針が零位よ

り θ 角をなして静止した時は、制御トルクは θ に比例するものである。

(b) 重力制御法は、配電盤用計器の様に指針の回轉軸が水平になつて居



る場合に用ひられる方法で(第5-2圖参照), 指針の軸にネジを切つた腕が取付けられ、之れに軸から r なる距離に捻ぢ込まれた制御重錘 w がある。指針が零位より θ だけ傾斜して静止した時は、零位に復帰せしむべき制御トルク T は、圖より明かな通り、 $T = w \sin \theta \times r$ で表はされる。 T は $\sin \theta$ に比例する。 T は w を變へるか又は r を變へる事により増減する事が出来る。

重力制御法 以上の外、駆動トルクの小さな計器では、磷青銅線の懸垂線に依り制御する方法もある。此の場合の制御トルクは傾斜角に比例する。

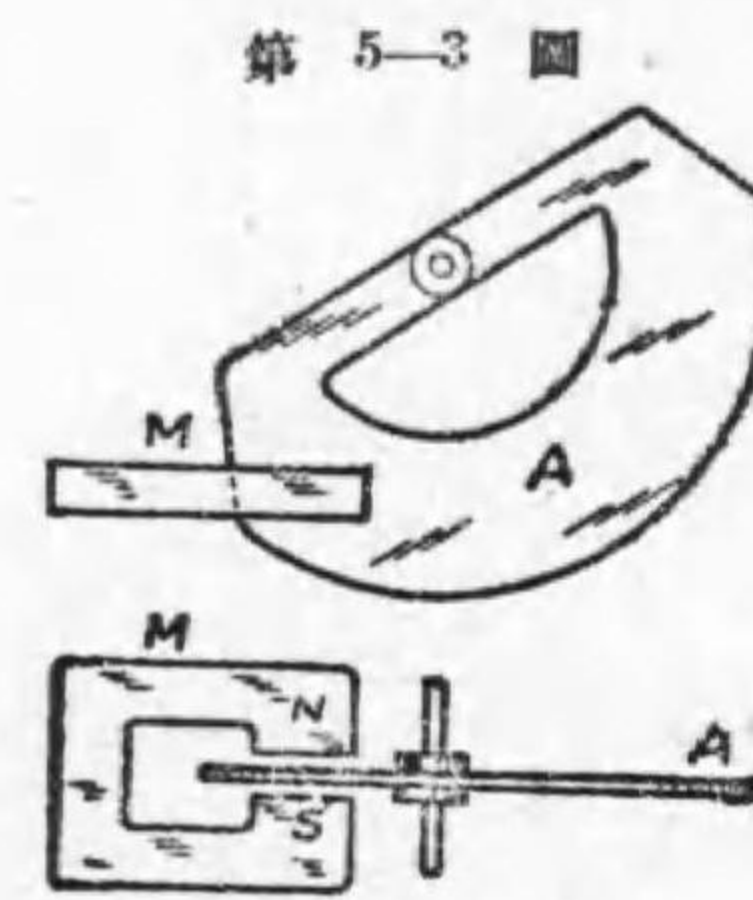
(ハ) 制動装置 適當な制動は計器の讀取り上必要であるばかりでなく、計器の耐久性を良好にする上にも必要である。制動の程度は、計器の目盛の約 $\frac{2}{3}$ に相當する電壓又は電流を急に與へた瞬時から指針が静止するに至る迄の時間及び振動回数で表はされる。此の時間及び振動回数の小なるもの程良い。制動法としては、(a) 渦流(eddy current)に依る法、(b) 空気に依る法、(c) 液體に依る法等がある。

(a) 渦流制動法 此の電磁制動法は更に二種に分けられる。

(i) 可動線輪型計器に用ひられる渦流制動法 之れは可動線輪型檢流計に就いて述べた様に、可動線輪の卷棒に金屬棒を用ひる方法である。可動部が動くとき金屬棒が磁束を切る爲め棒内に渦流を誘導し、之れが磁束と作用して回轉と反方向に制動トルクを生ずる。此の制動トルクは磁束と渦

流との相乗積に比例する。然るに渦流は磁束と棒の回轉角速度とに比例するから、制動トルクは磁束の自乗と角速度との相乗積に比例する。尙ほ制動トルクは棒の厚さにも關係するから、その厚さを増減する事により制動トルクは増減せられる。

(ii) 他型の計器に用ひられる渦流制動法 之れは第5-3圖に示す



渦流制動法

様に、可動部分の回轉軸に金屬片 A を取付け、之れを永久磁石 M の磁極間に運動せしめて A に誘導する渦流と M の磁束との作用で制動トルクを生ぜしむる方法である。此の場合の制動トルクも磁束の自乗と A の角速度との相乗積に比例する。尙ほ制動トルクは磁極の位置にも關係するから、その位置即ち回轉軸よりの距離を變へて制動トルクを調節する事が出来る。此

の渦流制動法を用ひる場合には、 M 磁石に依るもの以外の磁氣作用が A に働かぬ様になし置くことが必要である。

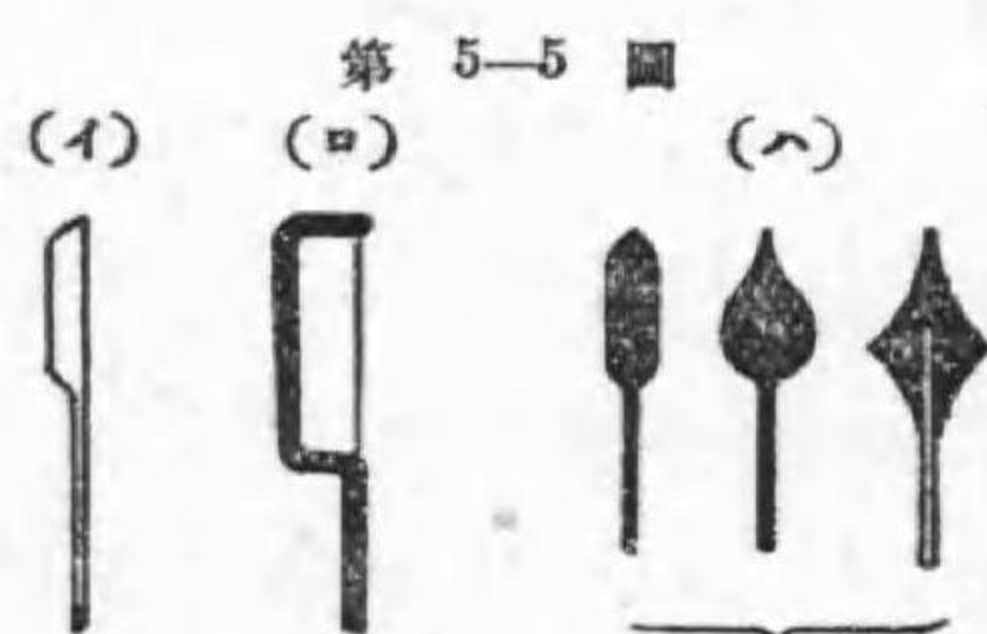
(b) 空氣制動法 之れは交流計器によく用ひられる方法で、第5-4圖甲に示す様なピストン式と乙に示す様な密閉式のもの等がある。何れも可動部の回轉軸に取付けたアルミニウムの羽根を制動箱内に運動せしめ、運動エネルギーを空氣抵抗に消費せしむる方法である。

(c) 液體制動法 之れは油又はグリセリンの様な



液體を充たした箱の中で可動部分に取付けた羽根を運動せしめて、可動部分の運動のエネルギーの一部を液體抵抗に消費せしめる方法である。之れは可動部分の慣性能率の異なるもので、他の方法では制動が弱過ぎる様な場合に用ひられる。

次に計器の他の部分を摘記しよう。可動部分は普通上下に鋼鐵の尖軸を有し之れを寶石軸承で支へて摩擦の影響を防いで居る。指針は普通アルミニウムの如き軽い金屬管を用ひ、其の支持點の兩側で自身の重量を平衡せしめる爲め指針の他端に釣合錘を取付けてある。又指針の形は第 5-5 圖に示す様に使用目的により種々あるが、(イ)指針の先端を双形にした双形



指 針 の 形

指針 (knife-shaped pointer), (ロ) 絹糸又は金屬の纖維を張つた纖維指針 (string pointer), (ハ) 槍形指針 (spear pointer) 等がある。精密測定用には双形又は纖維形のものが用ひられ、目盛も細線で目盛られ視差を避け

るために目盛に沿うて鏡が取付けられて居る。配電盤用計器では槍形指針が用ひられ、目盛も太い線で引かれ遠くからもよく讀める様にしてある。

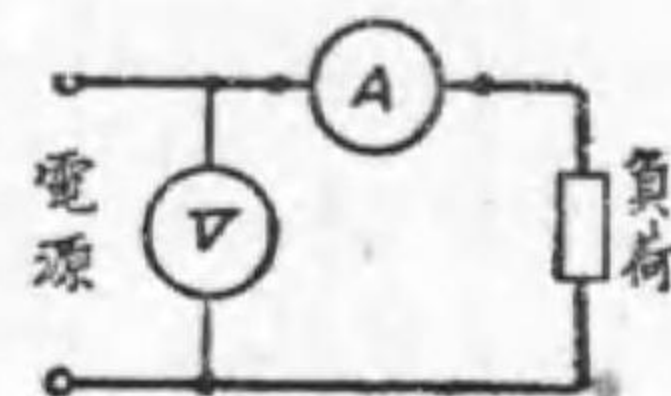
又普通に使用される計器の外函を區別すると丸形 (round form), 縁形 (edgewise form), 扇形 (sector form) 及び角形 (rectangular form) 等の外函がある。

3. 電壓計と電流計 指示計器中、指針の指示に依り電壓をヴォルトで讀む計器が電壓計で、又電流をアムペアで讀む計器が電流

計である。

電壓計は之れを電壓を測定すべき回路の二點間に接続すれば其の二點間の電壓を指示し、電流計は之れを電流を測定すべき回路に直列に接続すれば之れに通ずる電流を指示する。第 5-6 圖は電壓計 V 及び電流計 A の

第 5-6 圖 接続を示す一例で、A は之れに通ずる電流を、又 V は其の兩端子間の電壓を測定するものである。電壓計及び電流計は靜電型計器を除けば、其の構造は異なるが、動作原理は同一である。電流計は之れに通る電流に依つて指針を傾斜せしめ、目盛盤上にはアムペアで目盛してある。電流計を回路に接続すれば電流計内の電壓降下を生ずる故之れを出來得る限り小にすべきで、従つて電流計の抵抗は出來得る限り小にしなければならない。又電壓計は之れに與へられた電壓に比例する電流によつて指針を傾斜せしめ、目盛盤にはヴォルトで目盛してある。電壓計を回路に接続したるために回路の主要電流に影響を及ぼさしめない爲には、電壓計内には出來得る限り小なる電流を通すべきで、従つて電壓計の抵抗は大にする必要がある。斯様に電壓計と電流計とは構造上は異なるが其の動作原理は同一に造られる。即ち電壓計は之れに與へられた電壓に比例する小電流で動作する一種の電流計である。仍つて本章では電壓計と電流計とを同時に説明する。



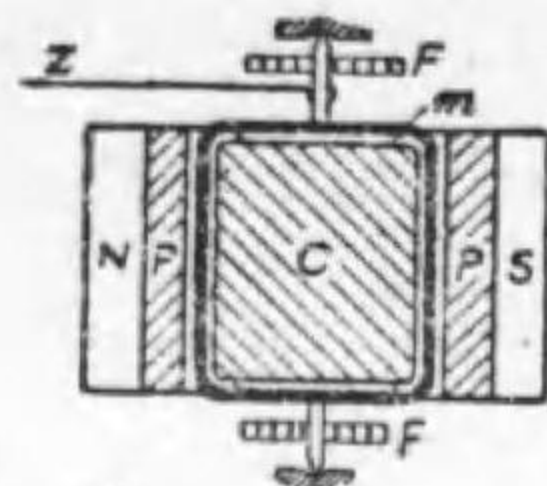
電 壓 計 と 電 流 計

(I) 直 流 用 計 器

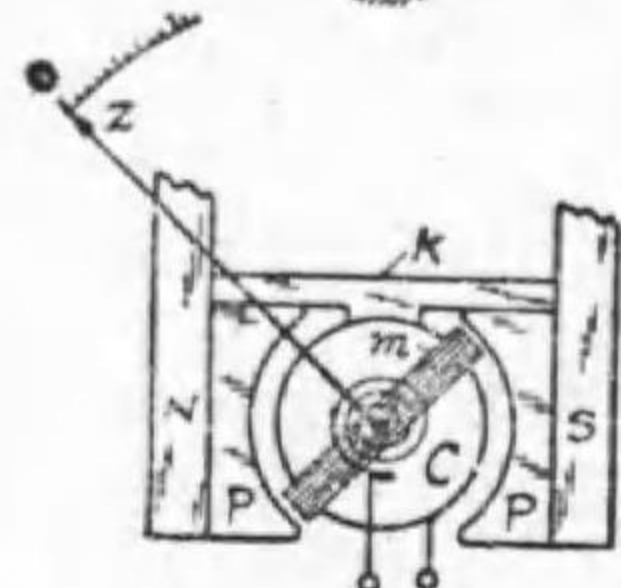
4. 可動線輪型計器 可動線輪型計器は同型檢流計と同

一原理で、第 5-7 圖は之れを示す。NS の永久磁石により輻射状磁界を

第 5-7 圖



作るため圖の如く極片 P, P を備へ、圆柱形軟鐵心 C を無磁性金屬 K で支持せしめてある。m は可動線輪で軸により上下に於て尖軸及び軸承で支持され、制御用螺旋彈條 F, F' を上下に装置してある。彈條 F, F' は又電流を可動線輪に導く役もする。上下の F, F' は互に反對に巻かれてある。之れは温度の變化による彈條の伸縮の影響を無からしめる爲である。



可動線輪型計器

今線輪 m に i なる電流が流れて指針が θ 角だけ傾斜して静止して居るとする。驅動トルク D は NS の作る一定の強さの磁界 H と電流 i とに比例し、

螺旋彈條の制御トルク T は傾斜角 θ に比例するから、

$$D = k_1 Hi, \quad T = k_2 \theta$$

D と T とが平衡して静止して居るから、 $k_1 Hi = k_2 \theta$

$$\therefore i = \frac{k_2}{k_1 H} \theta = K \theta \quad \left[\text{但し, } K = \frac{k_2}{k_1 H} = \text{常數} \right]$$

即ち線輪に通ずる電流は指針の傾斜角に正比例する。従つて目盛盤には一様に等分された目盛即ち平等目盛 (uniform scale) を施し得る譯である。一般に計器の目盛で實用上の確度を保證し得る範囲を目盛の有効範囲と稱するが、此の平等目盛の場合には有効範囲は最大目盛より其の $\frac{1}{10}$ に相當する目盛の範囲である。此の計器の制動法は既に述べた通り、可動線輪の卷枠に金屬棒を用ひ、之れと NS の作る磁界とを利用した渦流制動法である。

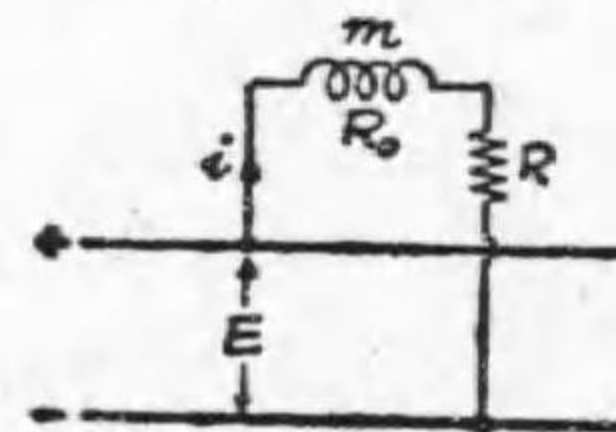
此の計器では、 $i = K \theta$ なる式から判る通り、電流の方向が絶えず變はる

交流回路には用ひられないので、直流回路にのみ用ひられるのである。

可動線輪は細い銅線を用ひ軽く出来て居て極めて小なる電流で動作する。斯様に動作電流を小にする事は線輪及び彈條の温度上昇を小にし、且つ計器の電力損失又は電壓降下を小ならしめる上に必要である。従つて此の計器を普通の電壓計又は電流計とするには適當な抵抗を併用する必要がある。即ち電壓計とするには適當な抵抗を直列に接続し、又電流計とするには適當な分流器を接続するのである。

(イ)電壓計 第 5-8 圖は可動線輪型電壓計の接続を示す。m が第 5-7

第 5-8 圖



圖に示した可動線輪で之れに直列にマンガニン抵抗器 R を接続したものである。直列抵抗 R の値は、その電壓計の最大目盛に相當する電壓を此の電壓計に與へた時電壓計の指針が最大値を示す様

可動線輪型電壓計の接続に選定する。今可動線輪の抵抗を R_0 とし、電壓計の最大目盛の電壓を E_0 とし、之れに應ずる最大動作電流を i_0 とすれば (之れは約 0.01A 程度である)、電壓計の全抵抗は $R_t = R_0 + R = \frac{E_0}{i_0}$ であるから、直列抵抗の値は、 $R = \frac{E_0}{i_0} - R_0$ で決定される。

次に此の電壓計の目盛を考ふるに、圖に示す様に、被測電壓を E、此の時の電壓計内に通ずる電流を i とし、指針の傾斜角を θ とせば、

$$E = i (R_0 + R), \quad i = K \theta$$

$$\therefore E = K (R_0 + R) \theta = K_r \theta \quad \text{但し } K_r = K (R_0 + R)$$

即ち目盛盤には θ の位置に被測電壓値 E を目盛る事が出来る。

直列抵抗 R は計器の外函の内部に装置される場合と外函の外部に装置される場合とある。配電盤用の高電壓の電壓計では普通外部に装置する。

上式で明かな様に R の値を大にすれば高い測定範囲の電圧計が出来る譯である。此の理によつて、一個の電圧計に更に抵抗器 R_m を直列に接続して使用すると測定範囲を擴張し得る。此の場合電圧計に固着した直列抵抗 R と區別して、分離し得る直列抵抗器 R_m を電圧計の倍率器 (multiplier) と稱する。

例 1. 最大目盛 $E_0=150$ V, 全抵抗 $R_0=R_0+R=18\,000\Omega$ なる電圧計あり、此の電圧計に更に直列に倍率器を接続して最大 750 V 迄の測定範囲を得るためには幾オームの倍率器を用ふべきか。

解 求むる倍率器の抵抗を R_m とすれば、

$$i_0 = \frac{150}{R_0+R} = \frac{750}{(R_0+R)+R_m} \quad \therefore \frac{150}{18\,000} = \frac{750}{18\,000+R_m}$$

$$\therefore R_m = 18\,000 \times \left(\frac{750}{150} - 1 \right) = 72\,000 \Omega$$

上述の直列抵抗の原理を應用して、一つの抵抗器から適當な抵抗値に相當する數種の端子を出したものを使用すれば、同一計器で數種の測定範囲を有する所謂多重測定範囲の電圧計が出来る。

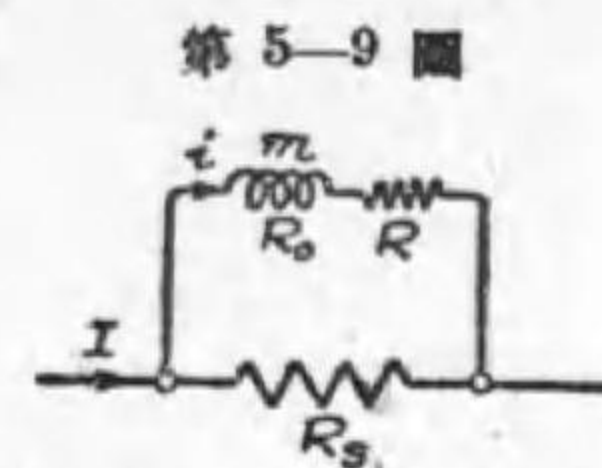
直列抵抗 R にマンガニを用ひる理由は、マンガニが固有抵抗高いため比較的短いもので高抵抗が得られる事と、又マンガニの温度係数小で實用上殆んど零であるため、電圧計全體 (即ち可動線輪と直列抵抗) の合成温度係数を極めて小にする事が出来、従つて温度變化による動作電流への影響を極小にする事 (即ち温度補償をする目的) とからである。

例 2. 線輪の抵抗 $R_0=1\Omega$, 温度係数 $\alpha_0=0.004=0.4\%$, 又マンガニ直列抵抗 $R=100\Omega$ (温度係数 $\alpha=0$ とす) なる電圧計の合成温度係数 α' は幾%なるか。

解 温度上昇 t なる時の合成抵抗 $= (R_0+R)\{1+\alpha't\} = R_0(1+\alpha_0 t) + R$

$$\therefore \alpha' = \frac{\alpha_0 R_0}{R_0+R} = \frac{0.004 \times 1}{1+100} = 0.00004 = 0.004\%$$

(□)電流計 第 5-9 圖は可動線輪型電流計の接続を示す。 R_s はマン



可動線輪型電流計の接続

ガニ抵抗で、可動線輪 m に所定の動作電流を通ずるために接続された分流器 (shunt) である。 R はマンガニ抵抗で前の電圧計で述べた理由によつて温度補償用の抵抗で、之れを吸収抵抗 (swamping resistance) とも稱して居る。

分流器 R_s の値は、此の電流計の最大目盛に相當する電流を電流計の端子に通じた時、電流計の指針が最大値を示す様に選定する。即ち今電流計の最大目盛を I_0 とし、此の時の m の最大動作電流を i_0 とせば (之れは約 0.015 A 程度である)、 R_s には $I_0 - i_0$ なる電流が通じ、並列兩回路の電壓降下が等しいから、 $(I_0 - i_0)R_s = i_0(R_0 + R)$

$$\therefore R_s = \frac{i_0}{I_0 - i_0} (R_0 + R)$$

次に此の電流計の目盛を考ふるに、圖に示す様に、被测電流を I , 此の時の可動線輪の電流を i , 又指針の傾斜角を θ とせば、

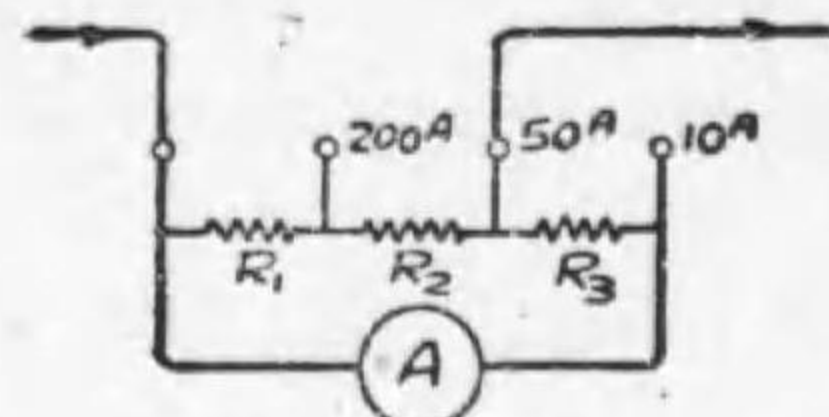
$$I = i \times \frac{R_0 + R + R_s}{R_s}, \quad \text{又 } i = K\theta$$

$$\therefore I = K \frac{R_0 + R + R_s}{R_s} \theta = K_a \theta \quad \left[\text{但し } K_a = K \frac{R_0 + R + R_s}{R_s} \right]$$

即ち目盛盤には θ の位置に直接被测電流 I を目盛る事が出来る。

分流器 R_s は計器の外函内に装置される場合と外部に装置される場合とある。配電盤用の大電流用計器では外部に装置するのが普通である。

第 5-10 圖



三重測定範囲の電流計

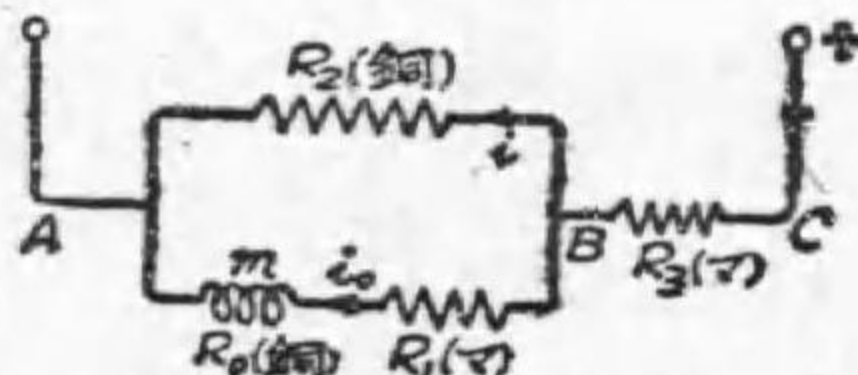
$\frac{R_0 + R + R_s}{R_s}$ を分流器の倍率と稱する。分流器 R_s の値を種々に變へれば測定範囲を種々に變へる事が出来る。この理により多重測定範囲の電流計も造られる(第 5-10 圖参照)。分流器がマンガニンで作られるのは

温度係数が極小なる事及び銅に対する熱起電力が殆んど閉却し得る事による。電流計の電壓降下は普通最大目盛に於て 45 mV, 75 mV, 100 mV 等に定められる。

可動線輪型計器の誤差の原因は温度及び外部磁界の影響である。

可動線輪の温度補償法としては既述の通りマンガニン直列抵抗を利用して居るが、他の方法の一例として第 5-11 圖に示すシーメンス會社の精密級 10 オーム 45 ミリヴォルト計器に用いた温度補償法を説明しよう。可動線輪 m と R_2 とは銅で、 R_1 と R_3 とは温度係数の殆んど零なるマンガニン抵抗である。其の温度補償の原理は、温度が昇ると $R_0 + R_1$ も R_2 も抵抗は増すが、銅のみの R_2 の増加の割合が大きい。従つて若し AB 間に電壓を與へると、温度上昇のための電流減少は i_0 は i 程甚しくない。故に i_0 が一定になるためには温度上昇に応じて AB の電壓が適當に幾分か増せばよい。それには R_3 なるマンガニン直列抵抗を用ひてあるから、計器の端子 AC 間に一定電壓を與へると、温度上昇につれて、全電流 I は少しく減じ、 R_2 の電壓降下が減ずるから AB 間の電壓を幾分増す事になり、結局可動線輪電流 i_0 を一定に保たしめる事が出来る譯である。

第 5-11 圖



シーメンス 10Ω 45mV 計器

尙ほ温度の影響は以上の外にもある。温度が昇ると永久磁石の強さが少しく弱く(攝氏 1 度に付き 0.02% 位)なり、又螺旋彈條の制御力も少しく

弱く(約攝氏 1 度に付き 0.04%) なる。然るに前者は驅動トルクを小にし後者は制御トルクを小にするから、此の兩者は互に打消し合ふ様に働く譯であるから、實用上は此の兩者の影響は閉却して差支へないのである。

次に外部磁界の影響は、強い永久磁石を利用してあるから、地球磁界の様な弱い磁界の影響は殆んど無いが、附近に強電流を使用した直流回路又は強い磁界がある場合は之れに影響するから、使用の際は注意すべきである。

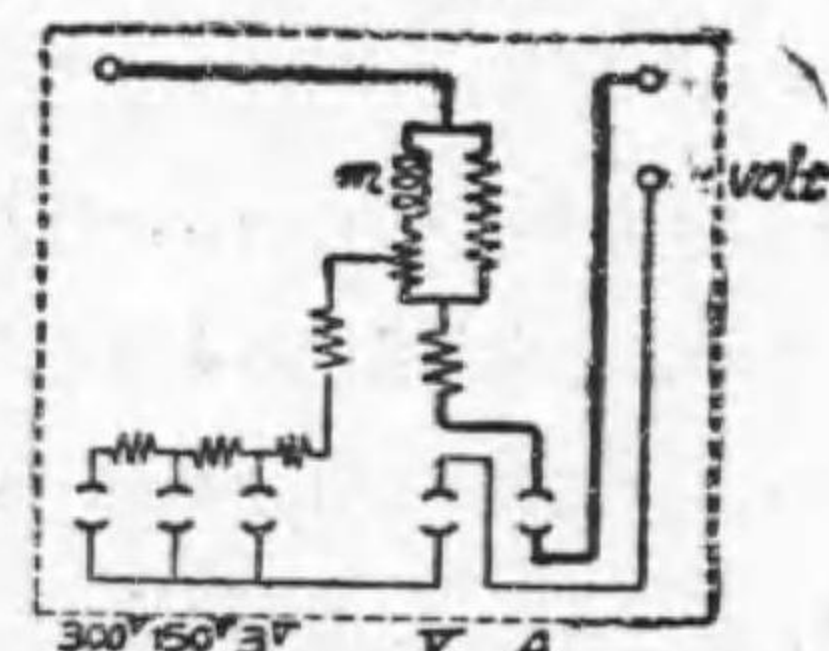
一般に可動線輪型計器は驅動トルクが大で平等目盛を有するため確度が高いから實用上の標準計器として使用される。

第 5-12 圖 甲



電 壓 電 流 計

第 5-12 圖 乙



電 壓 電 流 計

ミリヴォルト計に數種の電流測定範囲を與へる分流器及び數種の電壓測定範囲を與へる倍率器を組合せて電壓及び電流を同一計器で測り得るものを電壓電流計 (voltammeter) と稱する。第 5-12 圖甲はシーメンス製の精密測定用の電壓電流計を示す。乙圖は其の接続を示す。電流計としては上の左右兩端子を使用し、右の栓を栓孔 A に挿せばよい。又電壓計としては左の端子と右下の端子とを使用し、右の栓を V に挿し替へ置き他の栓を測定範囲に應じ 3 V, 150 V 又は 300 V の栓孔に挿して使用する。

(II) 直流及び交流兩用計器

5. 電流計型計器

相隣れる二導體に電流を通ずれば、

各の電流の相乗積に比例する電流力を生ずる。而して此の電流力は各電流が同方向ならば電流力は吸引力で、又互に反方向ならば反撥力である。従つて固定線輪及び可動線輪を用ひ、各に電流を通ずれば各電流の相乗積に比例する電流力が作用する。若し兩線輪を直列に接続すれば可動線輪は電流の自乗に比例する電流力によつて駆動トルクを生じ、之れに對し制御彈條で制御トルクを生ぜしむれば電流計型計器が得られる譯である。

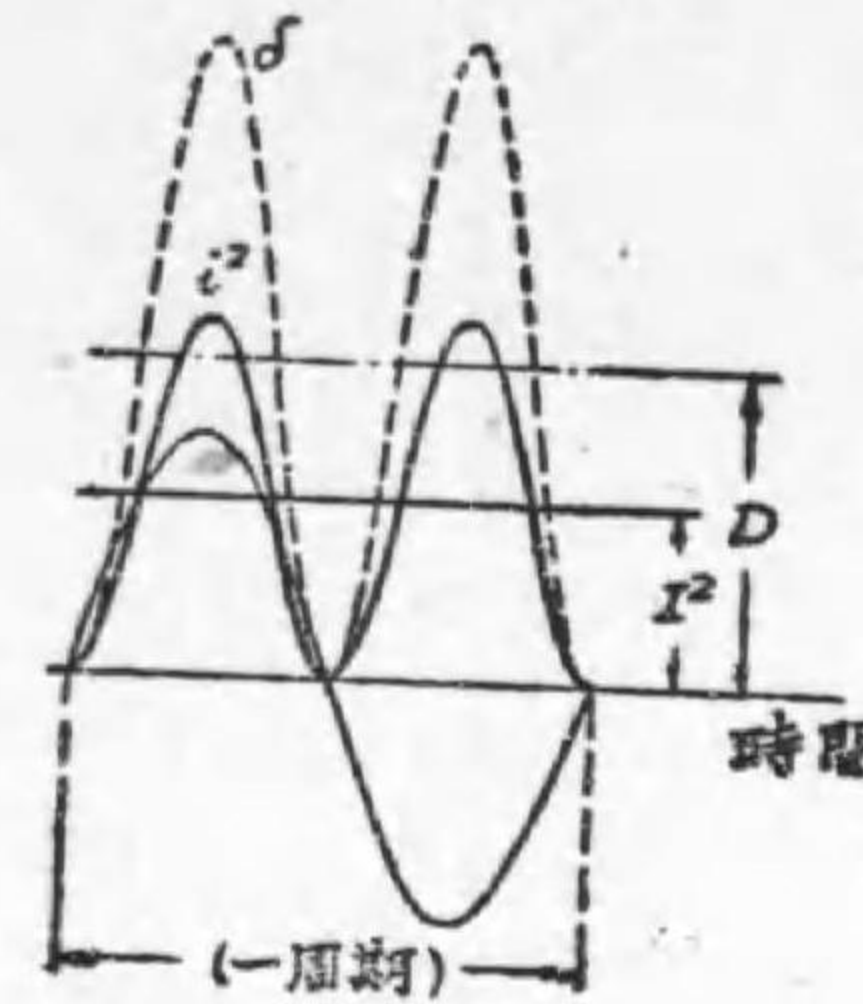
電流計型計器は交流にも使用される。何故なれば、交流の場合には固定及び可動兩線輪の電流の方向は同時に變はるから駆動トルクは常に一定方向である。今少しく之れを説明すると、交流の場合には、可動線輪に作用するトルクは刻々變化するが、可動線輪は重くて相當の慣性能率を有するから、交流の周波の變化と共に非常に速に變化する駆動トルクに追隨して動作する事が出來ずに、交流の一周期の平均トルクによつて動作するものである。然るに瞬時のトルクは電流の瞬時値の自乗に比例するから、平均トルクは瞬時電流の自乗の一周期間の平均、即ち交流の實効値の自乗に比例する譯である。此の事を數式で示すと次の通りである。

i = 交流の瞬時値, I = 交流の實効値, とせば,

瞬時トルク $\delta = k \times i^2$ [但し k = 比例常數で兩線輪の卷數, 形, 及び相互位置に關係する]

平均トルク $D = (\delta \text{ の一周期間の平均}) = k \times (i^2 \text{ の一周期間の平均})$

第 5-13 圖



$= k \times I^2$

第5-13圖は、 i, i^2, I^2, δ, D を時間に對して圖示したものである。

茲に述べた理論は電流計型計器のみに限らず、一般に電流(又は電壓)の自乗に比例する力を利用する計器は交流用計器となし得る譯である。

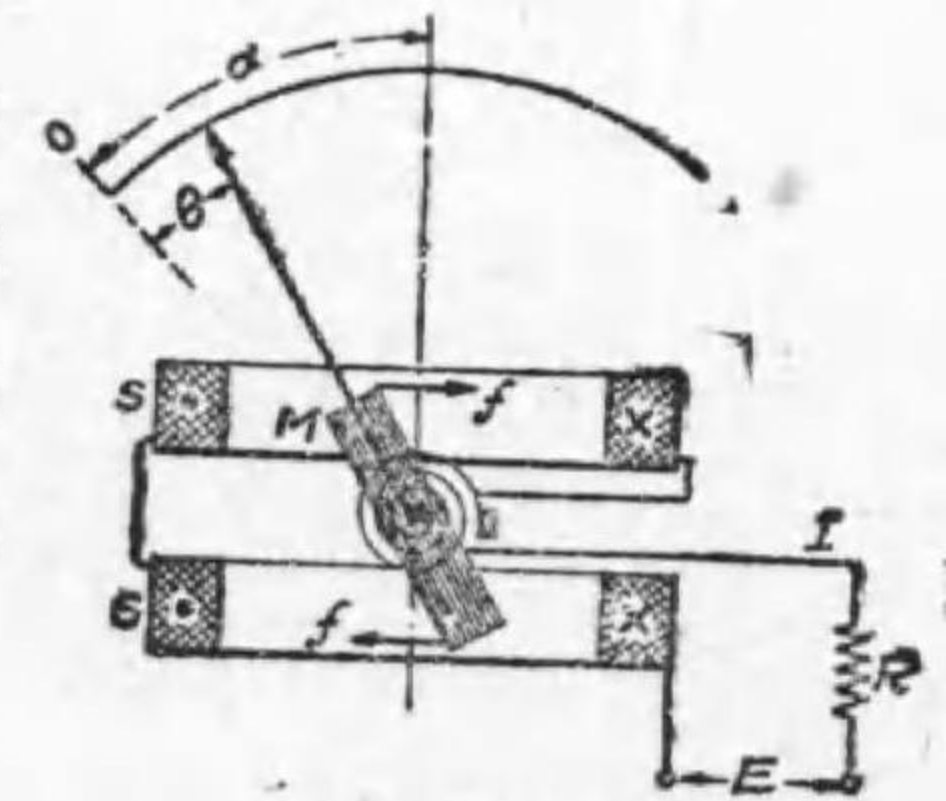
電流計型計器には、實驗所に用ひられるアムペア衡 (ampere balance), 電流力計 (electrodynamometer) 等もあるが本書では之れ等の説明を略して、

普通に用ひられる電流計型電壓計及び電流計を説明しよう。

(イ)電壓計 第5-14圖は此の型の電壓計の接続を示す。 S は固定線輪, M は可動線輪, R はマンガニン直列抵抗で、之れ等を直列に接続したものである。

第 5-14 圖

制御彈條を可動線輪の上下に備へ電流を導く役をもせしめることは直流可動線輪型計器と同様である。制動装置は空氣制動法を用ひて居る。



電流計型電壓計

今被測電壓 E を兩端子間に與へると、之れに比例する電流が S 及び M に通じ、従つて I^2 に比例する電流力のために M に駆動トルクを生ずる。此の駆動トルクは勿論兩線輪の相互位置にも關係する。今 S の作る磁界の方向即ち S の軸と指針の零位の時との間の角を α (之れは約 $\frac{\pi}{4}$ ラジアンである) とし、指針の傾斜角

を θ とせば、 M に働く電流力 f の方向は S の磁界及び M の電流に直角であるから、 M に作用する偶力のモーメント、即ち駆動トルク D は $I^2 \cos(\alpha - \theta)$ に比例する。又制御トルク T は傾斜角 θ に比例するから、

$$\text{駆動トルク } D = k_1 I^2 \cos(\alpha - \theta), \quad \text{制御トルク } T = k_2 \theta$$

此の両者が平衡して居るから $D = T$, $\therefore k_1 I^2 \cos(\alpha - \theta) = k_2 \theta$

$$\therefore I^2 = K \frac{\theta}{\cos(\alpha - \theta)}, \quad \text{or } I \propto \sqrt{\frac{\theta}{\cos(\alpha - \theta)}} \quad (イ)$$

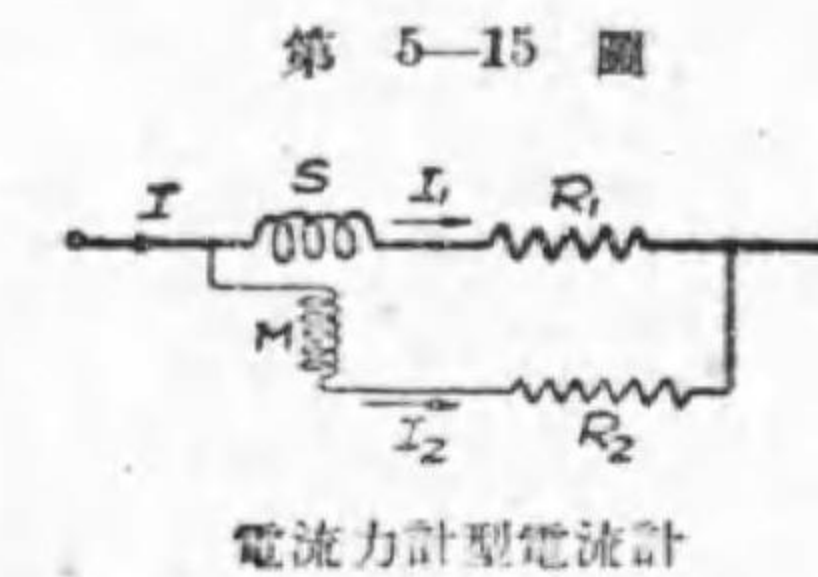
$$\text{然るに, } I \propto E, \quad \therefore E \propto \sqrt{\frac{\theta}{\cos(\alpha - \theta)}} \quad (ロ)$$

故に目盛盤には直接被测電圧 E を目盛る事が出来る。(ロ)式から判る様に此の計器の目盛は平等目盛とはならないで不平等の目盛となる。目盛は零位より中央に至るに従ひ目盛の間隔が廣がり中央部で間隔が最大になりそれよりは目盛の間隔は廣がらない。目盛は最大目盛の $\frac{1}{5}$ 以下は施すことは困難である。かゝる計器では有効測定範囲としては最大目盛の約 $\frac{1}{4}$ 以上とされて居る。計器としては平等目盛が理想的であるから、製造者によつては線輪の形や配置法に工夫をこらして、全目盛の $\frac{1}{10}$ 以上は殆んど平等の目盛にしたものもある。

此の電圧計にマンガニン直列抵抗を用ひる理由は、合成温度係数を小にする事と測定範囲に應ずる事との外に、更に之れを直流及び交流に用ひて同一の確度を得る爲である。即ち固定可動兩線輪には自己インダクタンスが幾分かあるから(全自己インダクタンスは指針が最大目盛を指した場合最大である)、之れに直列高抵抗 R を接続することにより普通の商用周波数の交流の場合では全インピーダンスを殆んど全抵抗に近づけ得る。[例へば S, M, R の全抵抗を $R_p = 2500 \Omega$, 全インダクタンス $L = 0.08$ ヘンリ

一、周波数 $f = 50$ サイクル/秒の場合は全インピーダンスは $Z = \sqrt{R_p^2 + (2\pi f L)^2} = \sqrt{2500^2 + (2 \times 3.14 \times 50 \times 0.08)^2} = 2500.13$ オーム之れは殆んど $R_p = 2500$ オームに等しい] 従つて同一電圧値に対しては直流でも交流でも殆んど同一電流値となり、實用上殆んど同一確度を得る譯である。

(ロ)電流計 第5-15圖の計器で直列抵抗 R を取去つて固定及び可動



第5-15圖 兩線輪を直列にしたものでは0.5Aまで測れる電流計とする事が出来るが、之れより大なる電流を測る電流計とするには、螺旋弾條に大なる電流を通ずる事が出来ないから、可動線輪には被测電流に比例する小電流を通ずる

工夫が必要である。第5-15圖はシーメンス5A用電流計の接続を示す。固定線輪 S 及び可動線輪 M を並列に接続する。但し S にも、 M にも適當なマンガニン直列抵抗 R_1, R_2 を夫々接続してある。

今被测電流 I を此の電流計に通ずると、 S 及び M には電流 I に比例する電流 I_1 及び I_2 が通じ、可動線輪 M に作用する電流力は $I_1 \times I_2$ 即ち I^2 に比例する。従つて電圧計の場合と同様に、(イ)式の關係が得られるから、目盛盤上には直接被测電流 I を目盛る事が出来る。

此の電流計で固定線輪 S 及び可動線輪 M の兩並列回路に夫々マンガニン抵抗 R_1, R_2 を接続する理由は、(1) S 回路の合成温度係数と M 回路の合成温度係数とを等しくして、温度變化に対する補償をするためと、(2) S 回路の時定数 (time constant) と M 回路の時定数とを等しくして、同一計器を直流及び交流に使用しても確度を同一にする目的のためとの二條

件を満足せしむる必要からである。然し此の二條件を完全に同時に満足せしむる事は困難であるから、實用上大體満足せしめる程度にする。此の電流計では 100 サイクル/秒の周波数の交流でも 0.1%以下の誤差で、従つて商用周波数の交流では直流に於けると殆んど同一の確度と見て宜しい。

例 第 5—15 圖に示す電流計に於て、固定線輪回路の時定數と可動線輪回路の時定數と相等しければ、此の計器を直流に使用する場合と交流に使用する場合は同一電流値に於て同一目盛を指示する事を證明せよ。但し S と M との間の相互インダクタンスは無視するものとす。

解 R_s, L_s を S 回路の抵抗及びインダクタンスとし、 R_m, L_m を M 回路の抵抗及びインダクタンスとせば、題意により兩回路の時定數は相等しいから、

$$\frac{L_s}{R_s} = \frac{L_m}{R_m} \quad (イ)$$

被测直流 I を通じた時の S, M の電流を夫々 I_1, I_2 とせば、

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_m}{R_s} \quad (ロ)$$

周波数 f なる被测交流 I を通じた時の S, M の電流を夫々 I_1', I_2' とせば、

$$\frac{I_1'}{I_2'} = \frac{\sqrt{R_s^2 + (2\pi f L_m)^2}}{\sqrt{R_s^2 + (2\pi f L_s)^2}} \quad (ハ)$$

(イ)から、 $\frac{R_m}{R_s} = \frac{L_m}{L_s}$ 之れを k とおけば、 $R_m = kR_s, L_m = kL_s$ 、之れ等

を (ロ)、(ハ) に代入して、 $\frac{I_1}{I_2} = k, \frac{I_1'}{I_2'} = \frac{\sqrt{k^2[R_s^2 + (2\pi f L_s)^2]}}{\sqrt{R_s^2 + (2\pi f L_s)^2}} = k$ 、

$$\therefore \frac{I_1'}{I_2'} = \frac{I_1}{I_2} \quad (ニ)$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{I_1'}{I_1 + I_2'} &= \frac{I_1}{I_1 + I_2} & \therefore \frac{I_1'}{I'} &= \frac{I_1}{I} \\ \therefore I_1' &= \frac{I'}{I} I_1 \end{aligned} \quad (ホ)$$

$$\begin{aligned} \text{同様に(ニ)より、} \frac{I_1' + I_2'}{I_2'} &= \frac{I_1 + I_2}{I_2} & \therefore \frac{I'}{I_2'} &= \frac{I}{I_2} \\ \therefore I_2' &= \frac{I'}{I} I_2 \end{aligned} \quad (ヘ)$$

$$\text{(ホ)、(ヘ)より、} I_1' I_2' = \left(\frac{I'}{I}\right)^2 I_1 I_2 \quad (ト)$$

故に交流 I' と直流 I とが同一値なる場合は、 $\left(\frac{I'}{I}\right)^2 = 1$ 、故に(ト)より、

$$I_1' I_2' = I_1 I_2 \quad (チ)$$

即ち交流に使用した場合と、之れと同値の直流に使用した場合とは電流力等しく同一目盛を指示する。

電流力計型計器に於ては、固定線輪の作る磁界は直流可動線輪型計器の永久磁石の作る磁界より遙かに弱いから、之れを直流計器として用ひる場合には地球磁界の影響が相當大きく現はれて来る。地球磁界の如き一定方向の磁界の影響を除くためには、計器に通ずる電流の方向を變へて二回の測定を行ひ、其の二回の讀みの平均を取ればよい。何故なれば、初めの場合の地球磁界により可動線輪に働くトルクが電流力によるトルクに加はるものとすれば、後の電流方向を反對にした場合には此の兩トルクの差が働く譯であるから、其の二回の平均を取れば結局地球磁界による影響が除外される事になるからである。

又此の計器を交流用とする場合には、地球磁界の様な一定方向の外部磁界の影響は無いが、附近に若し同一周波数の交番磁界があつて、之れが可

動線輪に漏洩する様な場合は、その影響を受け誤差を生ずるから使用の際注意すべきである。

外部磁界の影響を除く爲に、固定線輪及び可動線輪の外側に環状の薄鐵板を重ね合せた遮磁壁を用いた電流計型計器も作られて居る。

電流計型計器は直流計器としては可動線輪型計器に較べて劣つて居る。前者は相當のトルクを得る爲には後者より大なる電流を要し、又電流計としては電壓降下、損失電力が大で、又目盛の有効測定範圍も小である。然しその目盛を直流を以つて電位差計に依り校正して置けば、之れを交流の實用標準器として用ひる事が出来る。斯様に直流で校正して之れを交流用となし得る計器を一般に轉位計器 (transfer instrument) と稱して居る。

6. 可動鐵片型計器 可動鐵片型計器は、固定線輪に通ずる電流に依つて生ずる磁界内に置かれた可動軟鐵片 (soft-iron vane) に作用する電磁力を利用したものである。此の電磁力は磁界の強さと鐵片の磁束密度とに比例する。然るに鐵の磁束密度は磁界の強さの大小に伴つて増減し (勿論正比例はしない)、磁界の強さは電流に比例するから、鐵片に作用する力は電流の自乗に伴つて増減する。故に此の型の計器も直流及び交流用となし得るのである。

制御法は螺旋彈條又は重力制御法が用ひられる。又制動法は空氣制動法が多く用ひられる。

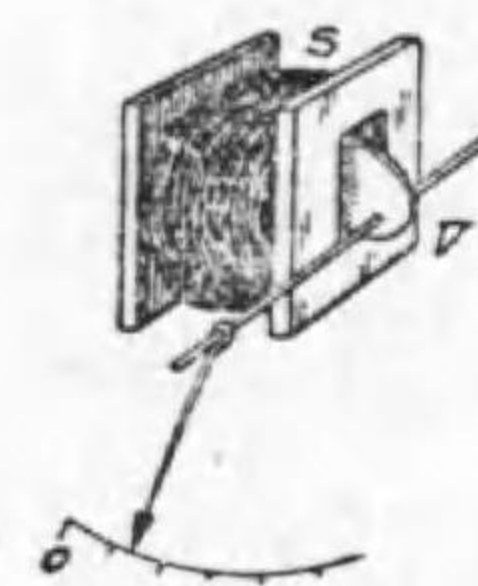
此の型の電壓計及び電流計も他の型の計器と同様に作られる。即ち電壓計では固定線輪に細い電線を巻いた巻數大なる線輪を用ひマンガニン直列抵抗を接続してあり、又電流計では固定線輪に太い電線を巻數小にしたも

のを以て居る。電流大なるもの程太い導體の巻數少い線輪を用ひる。即ち最大目盛に於ける線輪のアムペア回數は大體一定にして作られるのである。

可動鐵片型計器は更に之れを吸込型 (attraction type) と反撥型 (repulsion type) との二種に大別する事が出来る。茲に之れ等のもの、二三の構造の大略を説明しよう。

(イ) 吸込型計器 第5-16圖は吸込型計器の略圖で、 S が固定線輪で、 V は可動軟鐵片である。鐵片 V は楕圓形をなし軸に偏心的に取付けられて居る。線輪 S に電流を通ずると、 V が線輪の内部に吸込まれる力と彈條の制御力とが平衡した位置に指針は靜止する。制動装置は空氣制動法である。

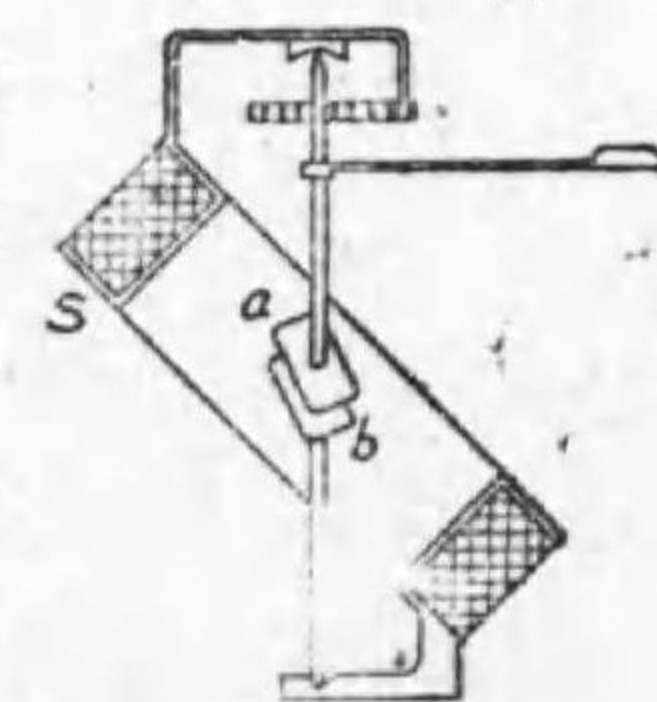
第5-16圖



吸込型計器

第5-17圖は吸込型の一つで米國 G. E. 會社 (General Electric Co.) の傾斜線輪型 (inclined-coil type) と稱せられるものである。固定線輪 S は約 45° の傾斜を有し a, b なる可動鐵片も軸に約 45° の傾斜をして取付けられて居る。電流が通じない時は鐵片の面は線輪の面と一致して居るが、線輪に電流を通ずると、線輪の面と直角に磁界を生ずるから、鐵片 a, b はその磁路の磁氣抵抗を最小ならしめようとする、即ち磁界と一致しようとする驅動力を生じ、之れと彈條の制御トルクと平衡した位置に靜止する。

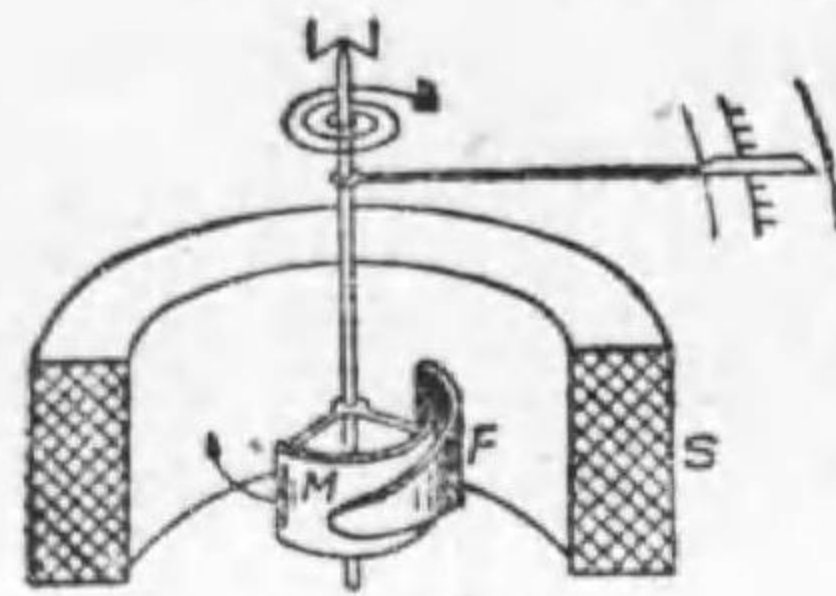
第5-17圖



傾斜線輪型計器

(ロ) 反撥型計器 第5-18圖は反撥型計器を示すものである。固定線輪

第 5-18 圖



反撥型計器

S の内部に固定鉄片 F と可動鉄片 M とがある。 S に電流を通すると F 及び M は同様に磁化される (即ち磁界の方向が上方に向つた場合は M, F の上部が N 極, 下部が S 極となる) から M は F から反撥せられる。然るに M と F との構造は圖に示す如くであるから, M が F より遠ざかる爲には M は上より見て時計式の方向に廻る。此の駆動トルクと弾條の制御トルクと平衡した位置に指針は静止する。

可動鉄片型計器は直流回路及び交流回路に於て動作するものであるが, 其の内部に鐵を含む故, 之れを直流回路に用ひると鐵のヒステリシス現象のため其の使用状態に依り同一値の電流に対しても其の指示は一定しない。即ち電流を小なる値より増して来て或る値に達した場合の磁束密度は, 電流を大なる値より減少して来て同一値に達した場合の磁束密度より小であるから計器の指示は前者の場合が後者の場合より小となるのである。此のヒステリシスの影響は相當に大であるから, 精密測定には直流計器としては不適當である。斯様な計器では電流の方向を數回轉換したる後に電流の方向を變へた時の二回の讀の平均を取ればよい。尤も良質の鐵片を用ひ成るべく磁路の方向の長さを短かくした計器ではヒステリシスの影響は小である。可動鉄片型計器を交流回路に用ひる場合は, 鐵片中のヒステリシス及び渦流損並に線輪のインダクタンスのために, 周波數が變はると指示が影響される。電流計の場合は周波數による影響を考へる必要はないが, 電壓計の場合は周波數が増すとインピーダンスが増すから同一電壓に対して

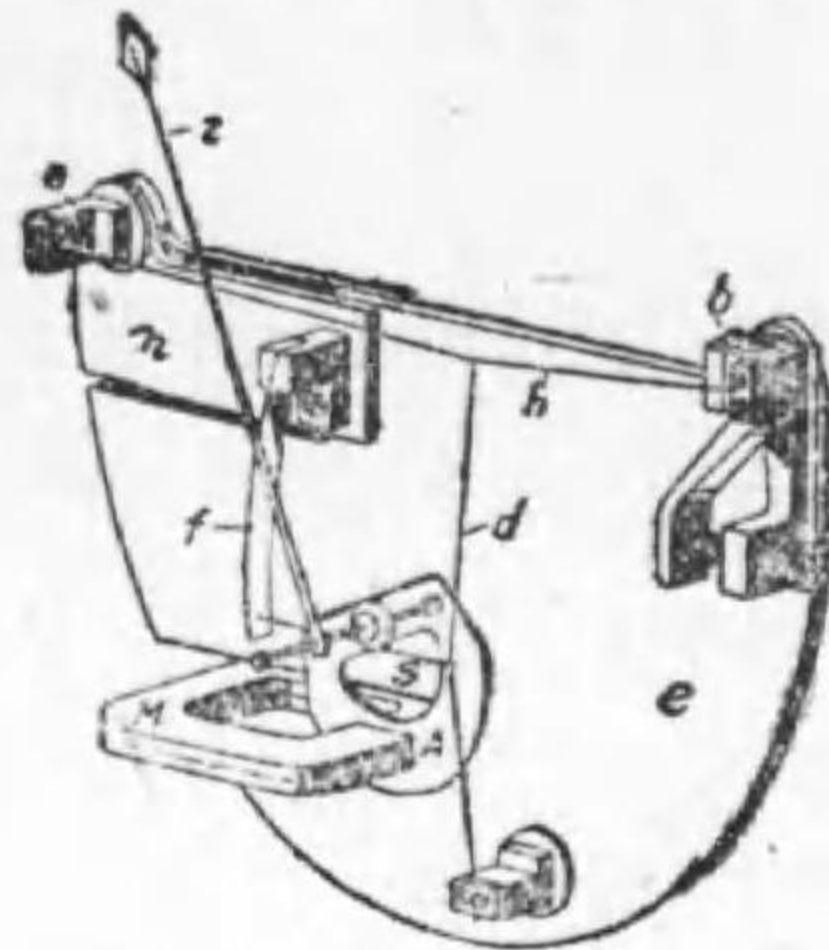
電流が減少するから, 此の誤差を小にするには出来るだけインダクタンスを小にして, 直列高抵抗を接続し全回路の時定數を小にする。又良質の鐵片小量を用ひ, その磁路の方向の長さを短かくし且つ成るべく他の金屬類を用ひない様にすれば, ヒステリシス及び渦流による誤差を小にする事が出来, 又波形の影響も小で, 交流計器として適當である。溫度や外部磁界の影響等は電流力計型計器と大差がない。可動鉄片型計器は構造が簡單で價格が低廉であるから交流の實用計器として廣く用ひられる。殊に優良の設計のものでは交流携帯用精密計器として用ひられる。

7. 熱型計器 導體に電流が通ると電流の自乗に比例する

熱を生ずる。此の電熱を利用したものが熱型計器 (thermal-type instrument) である。斯様に電流の自乗に比例する熱を利用したものであるから, 直流及び交流に用ひられる。此の型の計器には熱線型 (hot-wire type) と熱電型 (thermoelectric type) とがある。

(イ)熱線型計器 此の型の計器は電熱によつて膨脹する電線〔之れを熱線 (hot wire) と稱して居る〕の伸長を指針に傳へるものである。即ち熱線には電流の自乗に比例する熱が発生し熱線の溫度を上昇させる。此の時熱線からは熱線自身の溫度と周圍溫度との差に比例する熱が放散され, 發生熱量と放散熱量とが等しくなる迄溫度が上昇して平衡状態になる。熱線は溫度上昇に比例して伸びるから, 熱線の伸長は電流の自乗と一定の關係を有する事になるから, 此の熱線の伸長を適當な方法で擴大して指針に回轉運動を與へしめる。第5-19圖甲は獨逸ハートマン・エンド・ブラウン會社の熱線型計器の構造を示すもので, 乙圖はその動作を示す略圖である。

第 5-19 圖 甲



ハートマン會社熱線型計器

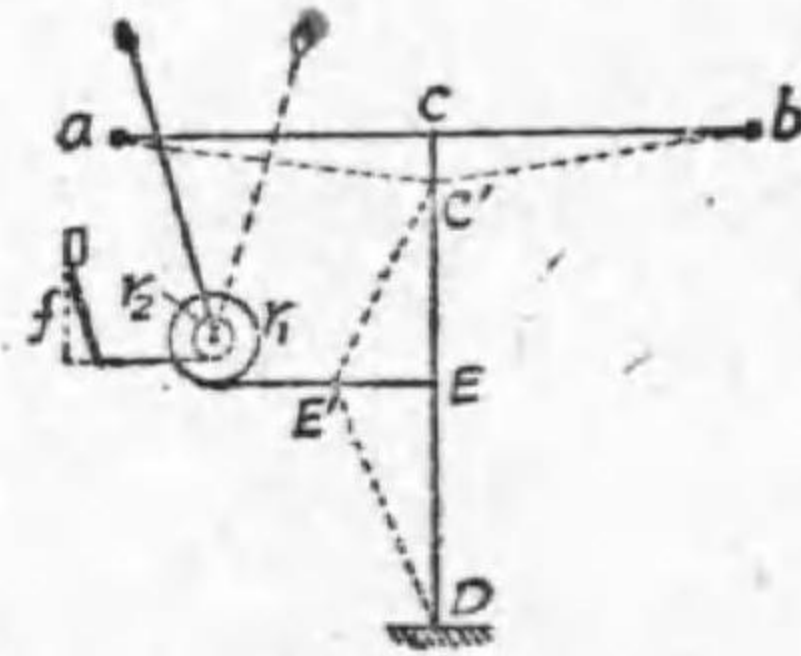
h が a, b 二固定點間に張られた白金イリチ、ムの細い熱線で、其の中央 c 點に磷青銅線 d の一端を附し、他端 D は固定されて居る。更に磷青銅線 d の中央 E 點に絹絲 s を附し之れを象牙の小滑車 r_1 に巻き付けてある。此の小滑車には乙圖に示す様に他の小滑車 r_2 が固定され、 r_2 に巻付けた絹絲 s は彈條 f に取付けてある。 f は恒に絹絲を左方に引張つて居る譯である。

従つて今熱線に電流を通すると、電流の値に応じて熱線が伸びる爲め、彈條の引力によつて各部は點線で示す位置を取る。即ち c 點は c' の位置に、 E 點は E' の位置に、従つて軸は回轉して指針は點線で示す位置に来る。此の様に垂直の cc' の弛み (sag) と水平の EE' の弛みの二重弛み

(double sag) によつて、熱線の小なる伸長を擴大して指針に傳へるのである。制動法としては、回轉軸に取付けたアルミニウム片 A が永久磁石の極間で運動の際、 A に誘導さるゝ渦流と永久磁石の磁界との作用を利用した所謂渦流制動法を用ひて居る。尙ほ熱線の支持臺はニッケル鋼 n と鐵板 e との組合せで出来て居て、外氣溫度の變化による支持臺の伸びと熱線の伸びとが等しい様に作られて居る。

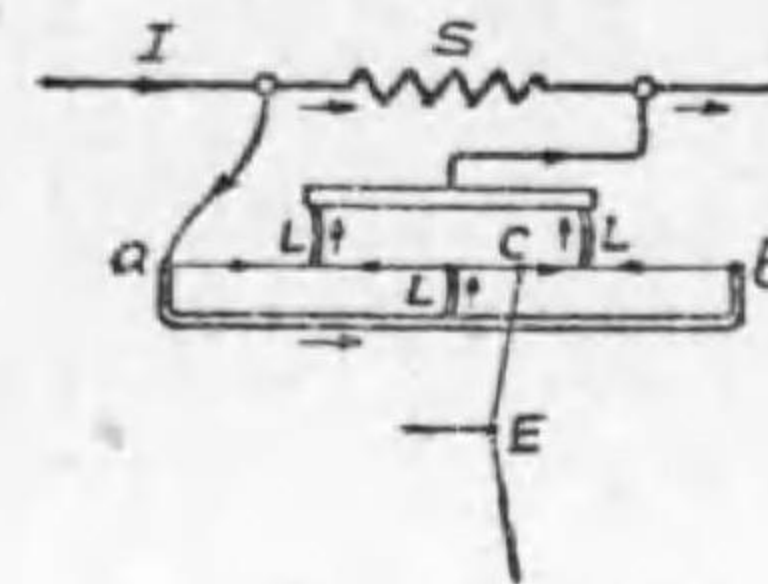
此の型の電壓計は、測定範圍に応じた値の直列抵抗を熱線に接続し、目

第 5-19 圖 乙



熱線型計器の原理

第 5-21 圖



熱線型電流計

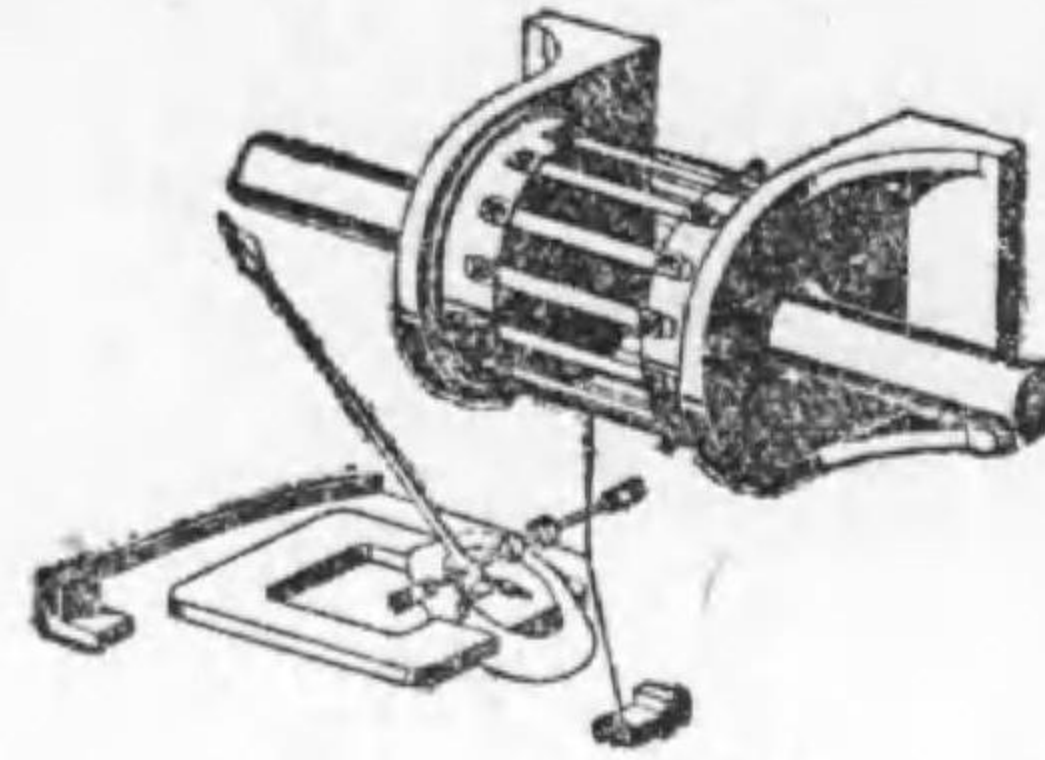
盛盤上には電壓の目盛が施されて居る。普通數十ヴォルトから約三百ヴォルト用まで作られて居る。此の型の電流計は、極く小なる電流用ならば第 5-19 圖の構造そのままでもよいが、大電流用には第 5-20 圖に示す様に、分流器 S を用ひ、更に熱線 ab に小電流を通する爲め、之れを可撓性の銀箔 L で數區劃に區分して銀箔で電流を導く様にしてある。目盛盤上には勿論被测電流 I が目盛られてある。

熱線型計器の缺點は、他の型の計器に比して相當大なる電流を要する事、熱線が高溫度で動作して居るため過大な電流が通る様な時は熱線を損傷し易い事、外氣溫度の影響を多少受ける事、零點が狂ひ易い事、又負荷が常に變動する回路に用ひると指針は負荷の變化に同時に應じ得ないで若干時の遅れがある事等である。

熱線型計器の利點は、電流による發熱作用を利用して居るから、交流の周波數並に波形に無關係である事、又外部磁界の影響がない事である。従つて直流を以つて目盛したものを交流に用ひて差支がなく、轉位計器として用ひられる。

熱線は交流の周波數の影響がないから、高周波用電流計を作る事が出来る。然し屢々述べた様に分流器を有する電流計は、並列回路の時定數が等しくなければ交流用として周波數の高い程其の影響があるから高周波用としては用ひられないのである。第 5-21 圖は高周波用電流計の構造を示すものである。之れは極く薄い熱線の條片 (strip) を多數太鼓形に對稱的に

第 5-21 圖



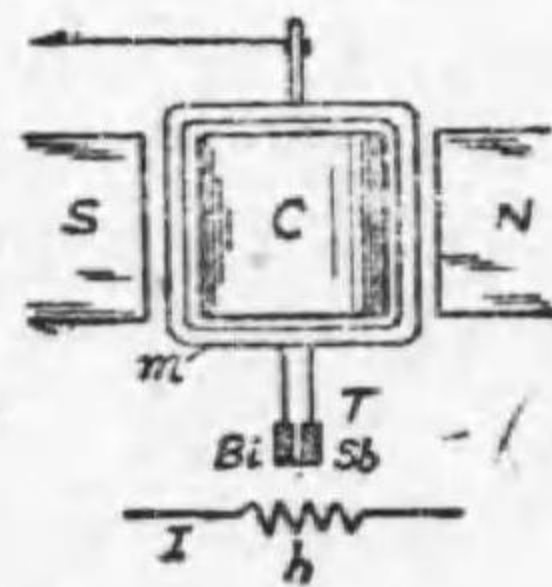
高周波用熱線型電流計

配列し各の相互誘導を相等しくし、高周波の電流でも各條片に等しい電流配分をなす様にしたものである。指針に運動を傳へるのは其の中の一の條片を利用してある。條片の数の多い程測定範囲が大で、これには數百アマペア用まで作られて居る。

(口)熱電型計器 之れは被測電流を抵抗體に通じ、その熱に依り適當な熱電對 (thermocouple) の接合點を熱し、熱電對に生ずる熱起電力を直流可動線輪型計器の線輪に與へ、之れを動作せしむるもので熱電對型計器とも稱する。一般に直流可動線輪型計器は交流計器に比して感度もよく確度も高いから、此の型の計器は高周波用として熱線型計器よりも最近多く用ひられる。此の熱電型計器にも種々の構造のものがあるが、之れを大別すると、抵抗體に生ずる熱を對流及び輻射で熱電對に傳へるものと、抵抗體を熱電對の接合點へ直結して熱を傳へるものと二種になる。

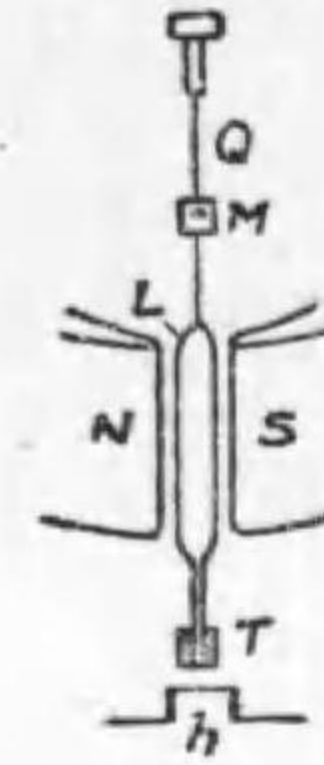
第5-22圖はダッデル熱電々流計の略圖である。之れは直流可動線輪型計器の線輪 m を彈條に接続する代りに T なる熱電對 (碋鉛 Bi とアンチモン Sb より成る) に接続し、熱電對は圓形を受熱板に鑲付けされてある。受熱板の下に h なる抵抗發熱體を備へて居る。被測電流を h に通ずるとその熱が T の接合點に傳はり熱起電力を生じ可動線輪には、熱量從つて被測電流と一定關係の直流が通じこの電流と NS の磁界との作用で指針を運動せしめる。

第 5-22 圖

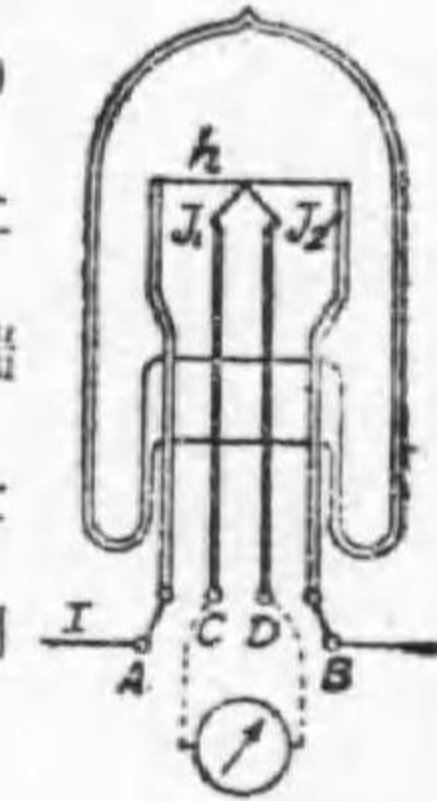


ダッデル熱電々流計

第5-23圖 目盛盤には被測電流が目盛られてある。第5-23圖はダッデルの熱電型檢流計を示すもので、原理は熱電々流計と同様である。只小なる交流測定用とする爲め可動線輪は一回巻の銀線 L を用ひ、之れを石英線 Q で懸垂し、讀取用の小鏡 M を取付けてある。



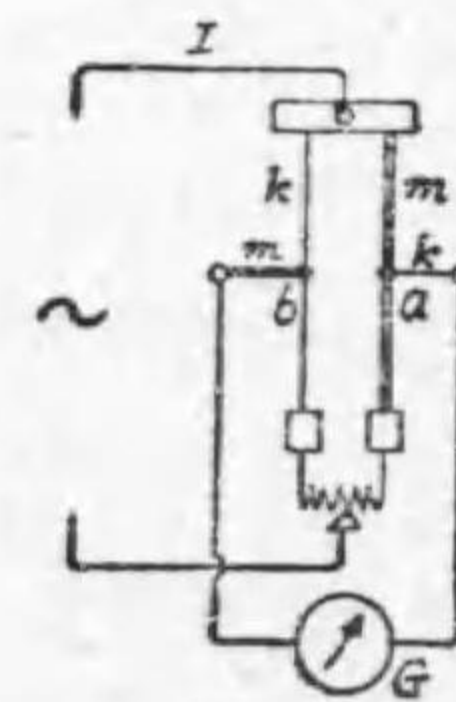
發熱體の熱は輻射及び空氣の對流及び端子への傳導により熱電型檢流計 持ち去られるが、之れを第5-24圖に示す様に硝子真空球中に封入したものは空氣の對流による冷却がないから高温に 第5-24圖なる事になる。之れを真空熱電對 (vacuo-thermocouple) 型と稱する。 h が熱線で、之れに被測交流を通ずると、 h に鑲付けされた熱電對 J_1, J_2 の接點が熱せられ、その CD 端子に接続された直流可動線輪型計器に直流が通じて指針を振れしめるのである。真空型は1アマペア以下の小交流用である。



真空熱電對型電流計

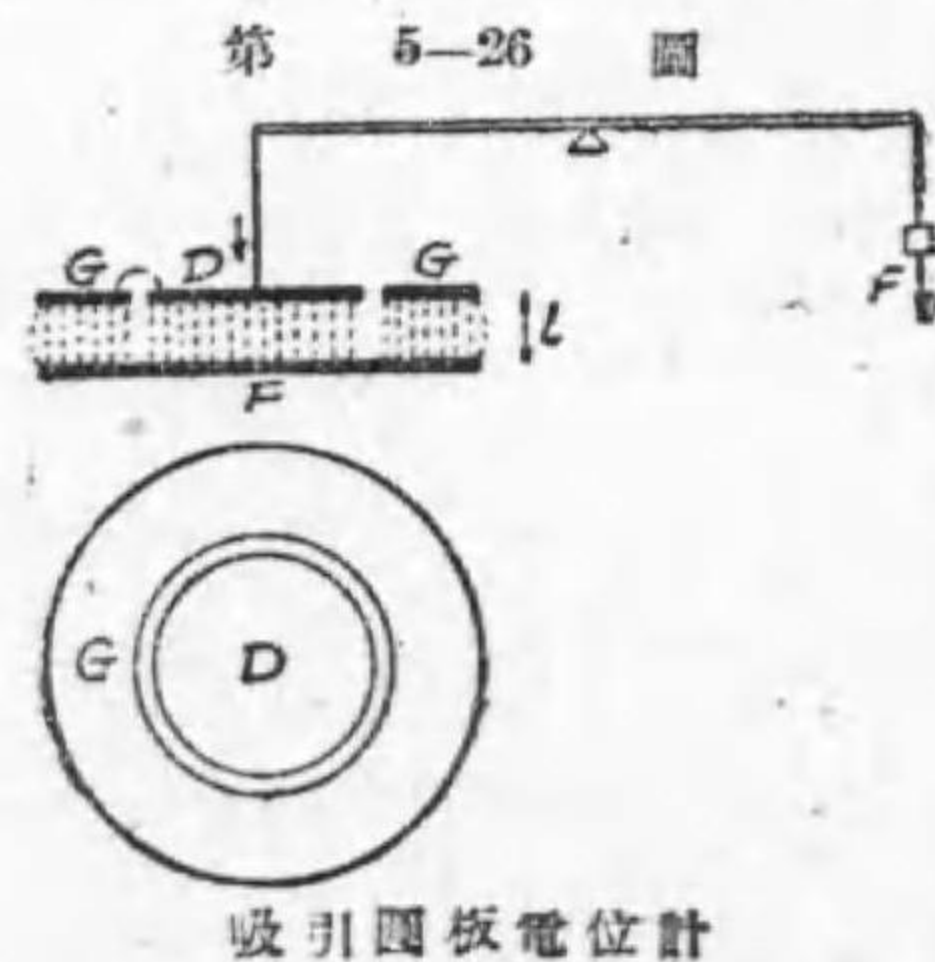
熱電對自身が被測電流に依つて加熱される自己加熱型の

第5-25圖 熱電々流計がある。第5-25圖は獨逸理工實驗所の自己加熱型計器を示すもので、マンガニン m とコンスタンタン k との細線を平行に端子間に取りつけ、下方の二端子を抵抗を以つて接続し、其の上の摺動子と上部の共通端子との間に被測交流 I を通ずる。摺動子を調整し m, k 兩熱線の電流を等しからしめ ($\frac{I}{2}$ にす) る。 m, k の中央部 a, b には夫々 k, m なるコンスタンタン及びマンガニンが鑲付けされて居る。その端子に直流可動線輪型計器 G が接続され



る。交流のホイートストーンブリッジになつて居るから G には交流は通らない。然るに、右側は a 點で接合された mk の熱電對、又左側は b 點で接合された mk の熱電對になつて居て a, b が交流 $\frac{I}{2}$ により熱せられて居る爲め、此の二個處に於ける熱起電力が G に直列に加はり、 G には直流が流れて指針を振れしめる。此の直流は被测交流の値に應ずる故、目盛盤は被测交流 I を讀む様に目盛る事が出来る。

8. 静電型計器 互に絶縁された二導體間に電壓を與へると、電壓の自乗に比例する静電力を生ずるから、一方の導體を固定し他方の導體を可動體とすれば、可動體は兩導體間の電壓の自乗に比例する静電力のために動くから、之れに制御装置を施し置けば電壓計を作る事が出来る。静電力は電壓の自乗に比例するから、此の型の計器は直流及び交流回路に用ひられる。静電型計器は絶縁された二導體から成るから蓄電器を形成して居る譯で、而も一方は可動體なる故二導體の相互位置に應じた値の容量の可變蓄電器と見る事が出来る。即ち静電力は電壓の自乗に比例する以外に兩導體間の相互位置にも關係するものである。静電々壓計 (electrostatic voltmeter) を説明する前に茲に静電吸引力又はトルク概念を得る爲に電位計 (electrometer) の原理を概説しよう。



第 5-26 圖 吸引圓板電位計

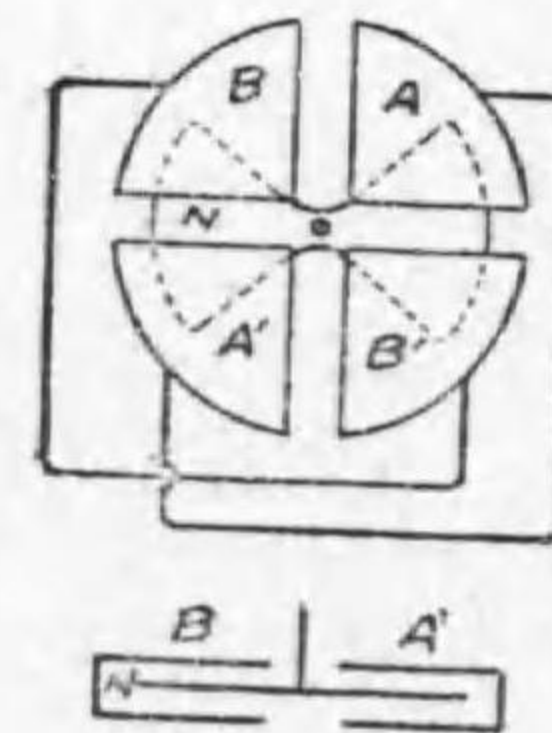
(イ)電位計の駆動力及びトルク 第 5-26 圖は絶對電位計 (absolute electrometer) と稱する吸引圓板電位計 (attrac-

ted-disc electrometer) の原理を示すものである。 F, D は夫々固定及び可動の平行金屬圓板で、此の間に電位差 E を與へると D は F に吸引される。其の吸引力を計算しよう。 D と F と丈けでは D の線の力線が擴散して平等電界にならないから、圖に示す様に D の周圍に同心圓の環 G を備へ、之れを D と電氣的に接続して GD を同電位にし、 DF 間の力線を垂直にして平等電界にする。此の場合の D に働く吸引力 F は次式で表はされる。

$$F = \frac{1}{2} \times \frac{A}{4\pi l} \times E^2 \times \frac{1}{l} = \frac{AE^2}{8\pi l^2} \text{ ダイン}$$

但し、 A は D の面積 (cm^2)、 l は DF 間の間隔 (cm)、 E は DF 間の電位差 (静電ヴォルト) である。例へば、 $A=100 \text{ cm}^2$, $l=1 \text{ cm}$, $E=300 \text{ V} = 1 \text{ 静電ヴォルト}$ の場合としても、 $F = \frac{100}{8\pi} \approx 4 \text{ ダイン}$ になる。故に此の種の電位計は高電壓の測定に適する。之れを應用した 250 000 V 迄も測れる絶對電壓計なるものもあるが、その説明は之れを省略する。

第 5-27 圖はケルヴィンの象限電位計 (quadrant electrometer) の原



象限電位計

理を示すものである。 $AA' BB'$ は四つの固定象限で、 A と A' 、又 B と B' は夫々電氣的に接続される。象限の中間に N なる可動アルミニウム板が懸垂線で吊されて居る。 N を普通ニードル (needle) と稱する。此の可動部分には小鏡が取付けられて、檢流計と同様にその振れを讀む事が出来る様になつて居る。

今 N の電位を V_n に充電し、 A の電位を V_a 、 B の電位を V_b とせば、 N は、 NA 間の電位差の自乗 $(V_n - V_a)^2$ に比例する

引力によつて A に吸引され、又 NB 間の電位差の自乗 $(V_n - V_b)^2$ に比例する引力によつて B に吸引されるから、結局 N は此の兩者の差に比例するトルクを受ける。此の駆動トルク D は

$$D = k_1 [(V_n - V_b)^2 - (V_n - V_a)^2]$$

$$= 2k_1 (V_a - V_b) \left\{ V_n - \frac{V_a + V_b}{2} \right\}$$

之れに對し懸垂線の制御トルク T が平衡してニードルは振れ θ をなして静止する。 $T = k_2 \theta$ であるから、 $D = T$ なる平衡式から、

$$\theta = \frac{2k_1}{k_2} (V_a - V_b) \left\{ V_n - \frac{V_a + V_b}{2} \right\}$$

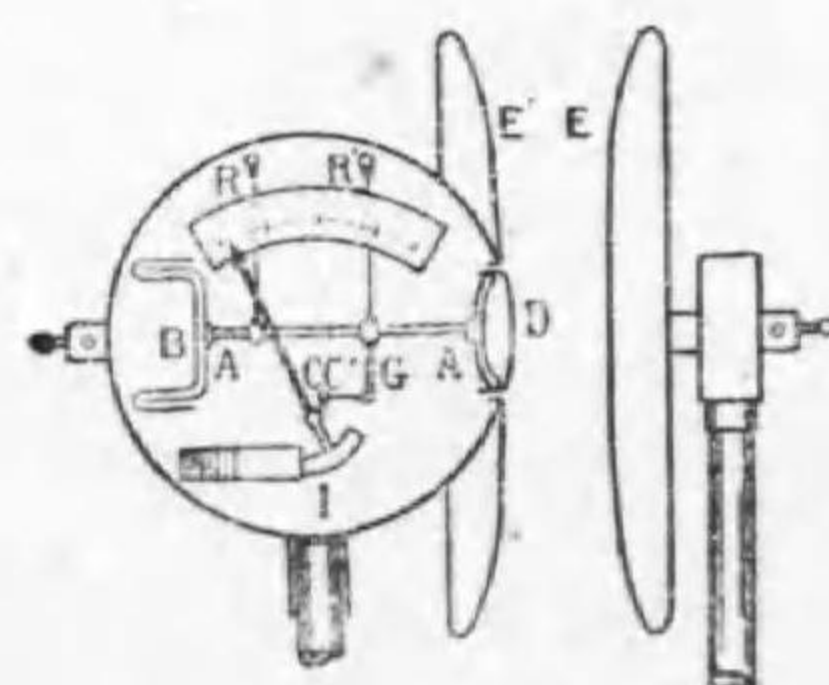
此の電位計の種々の使用法は茲に之れを省略する。又此の原理の應用は廣い。今特別の場合として、 $V_a = V_n$ なる場合は、上式より、

$$\theta = \frac{k_1}{k_2} (V_n - V_b)^2$$

従つて、 A と N とを接続して、 BN 間に被測電圧 E を與へると、 $E = V_n - V_b$ となるから、 $\theta = \frac{k_1}{k_2} E^2$ となり電壓計が出来る譯である。

(□) 靜電々壓計 電壓計は種々の構造のものがあるが、茲に可動極が直線的移動をするものと、可動極が回轉するものとの二三の實例を説明しよう。

第 5-28 圖 甲



アブラハム靜電々壓計

第 5-28 圖 甲及び乙はアブラハム (Abraham & Villard) 式電壓計である。 E が固定板、 D が可動板である。 D は固定板と同形の靜電遮蔽板 E' の中央部にあけられた孔の中に置かれ、その軸 AA は R, R' なる帶狀制御彈條に懸垂され水平に運動し得る。被測電壓を D, E 兩極間に與へると、 D は E に

第 5-28 圖 乙

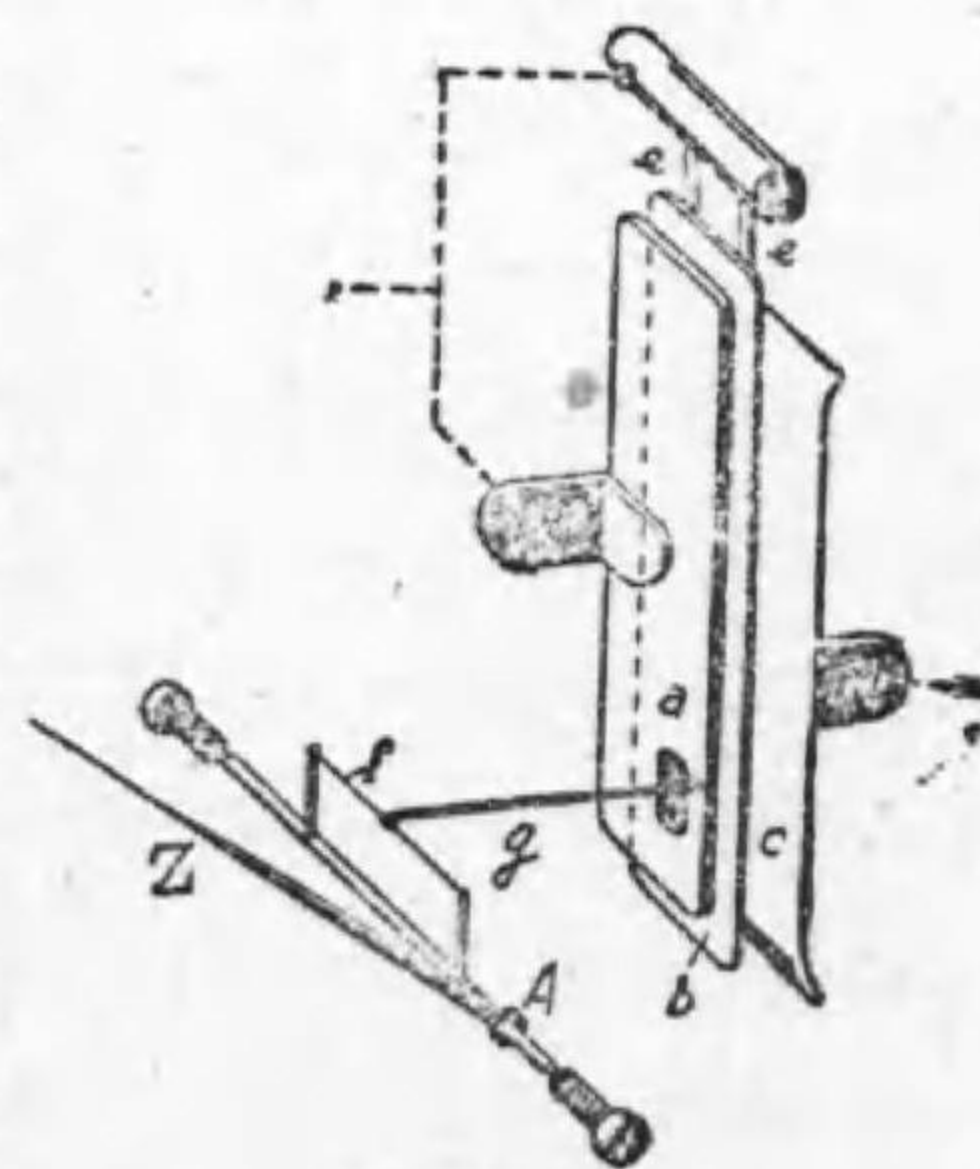


吸引され R, R' の制御力と平衡した位置に静止する。圖に示す如く指針軸はクランク C 、連結棒 C' 及び腕 G を経て AA に連結してあるから、 D の軸 AA の水平移動を指針に回轉運動として傳へられる。制動法は軸 AA の左端に取付けられた羽根による空氣制動と、指針に取付けた金屬板が永久磁石の極間を動いて生ずる渦流制動との二つを用ひて居る。乙圖はその全形を示す。 EE' の距離を調節することにより、種々の測定範圍が得られる。此の電壓計はアブラハム靜電々壓計 200 000 V まで測れる。

第 5-29 圖はハートマン・エンド・ブラウン會社の電壓計を示す。二つ

第 5-29 圖

の矩形固定板 a 及び c の中間に、可動アルミニウム矩形板 b を青銅帶 ee に依り垂下してある。 ab は電氣的に接続されて居る。 ac 間に被測電壓を與へると、 b は a に反撥され、 c に吸引されて右方に移動する驅動力を生ずる。之れに對して b の重力錘の制御力と驅動力と平衡した位置に b は静止する。 b の移動は腕 g 及び指針の軸 A に取付けられた張線 f を経て指針



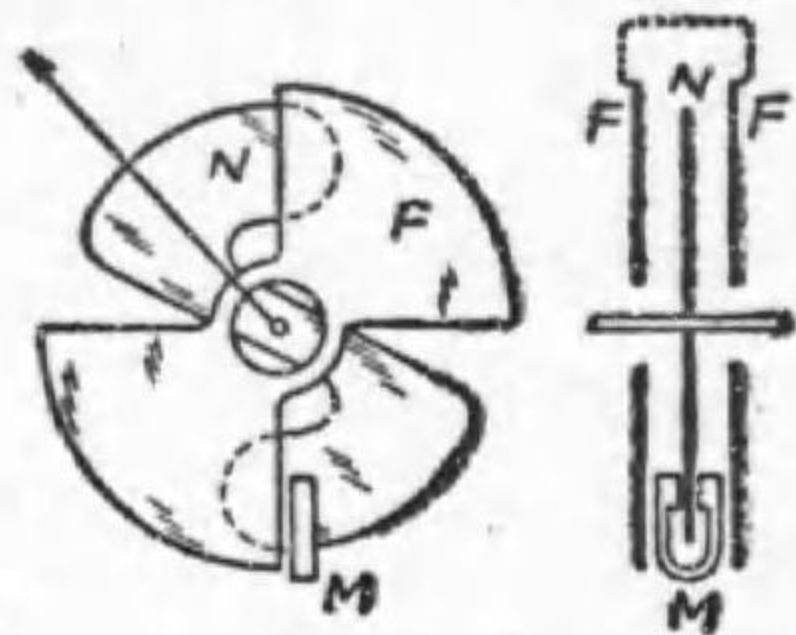
ハートマン會社靜電々壓計

を回轉せしめる。制動法は軸 A にアルミニウム板を取付け之れが永久磁石の極間を動くことによる渦流制動法を用ひて居る。測定範圍は最小は

1000 V 位, 又最大のものには 15 000 V のものまで作られる。目盛は最大目盛の $\frac{1}{3}$ 以上は略平等である。

第 5—30 圖はケルヴィン静電々壓計を示す。F, F が固定象限で、二枚

第 5—30 圖



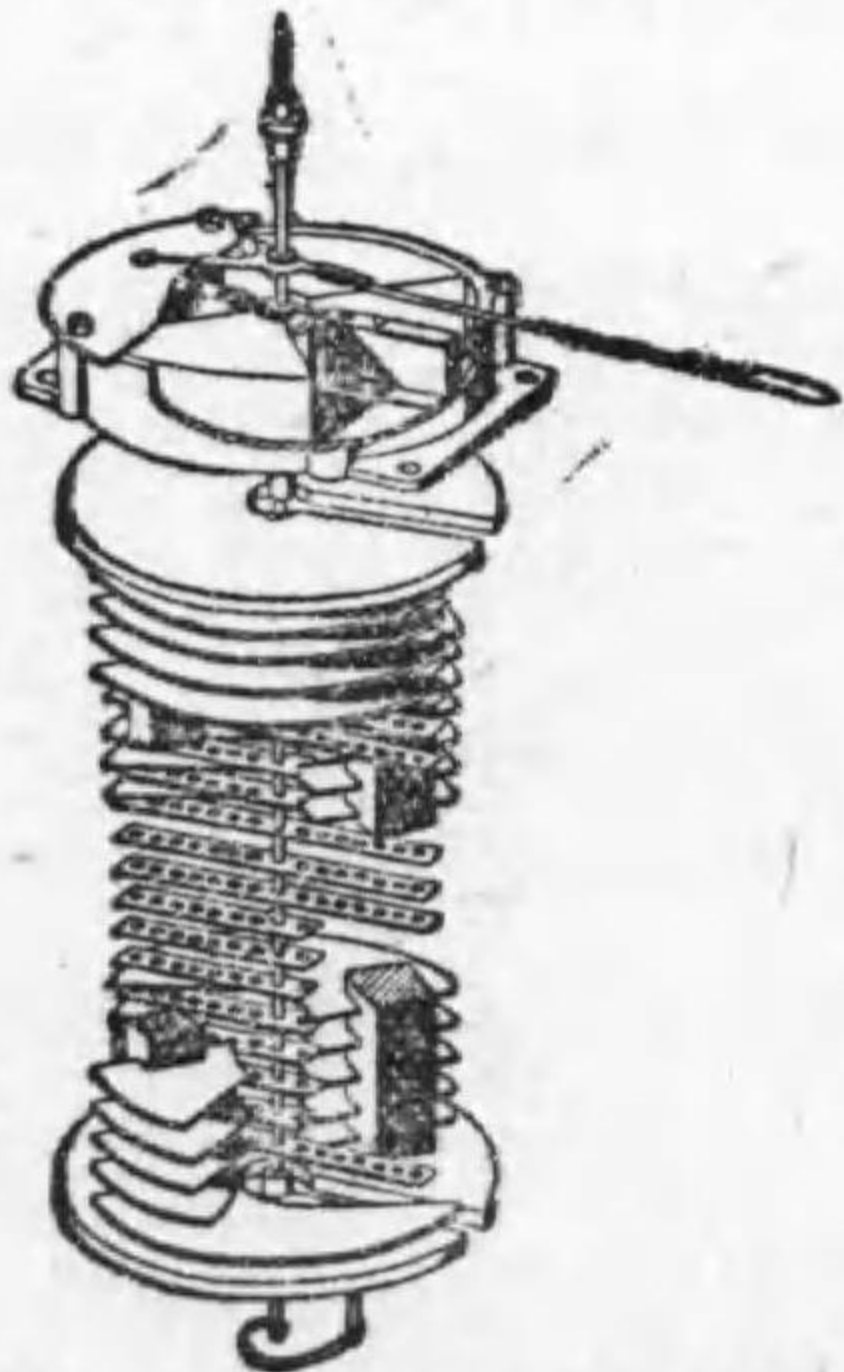
ケルヴィン静電々壓計

相対し電氣的に接続され、其の間に可動アルミニウム板 N を装置せるものである。FN 間に被测電圧を與へると、その自乗に比例する駆動トルクにより N は F の内部に回転する。之れに對し N の下端には重錘が掛けられて (圖には示してないが) あるためその制御力により N は或る位置に靜止する。制動

法は N と永久磁石 M とによる渦流制動を用ひて居る。重錘を取替へる事により測定範囲が變へられる。測定範囲は 500 V より 20 000 V 位迄ある。

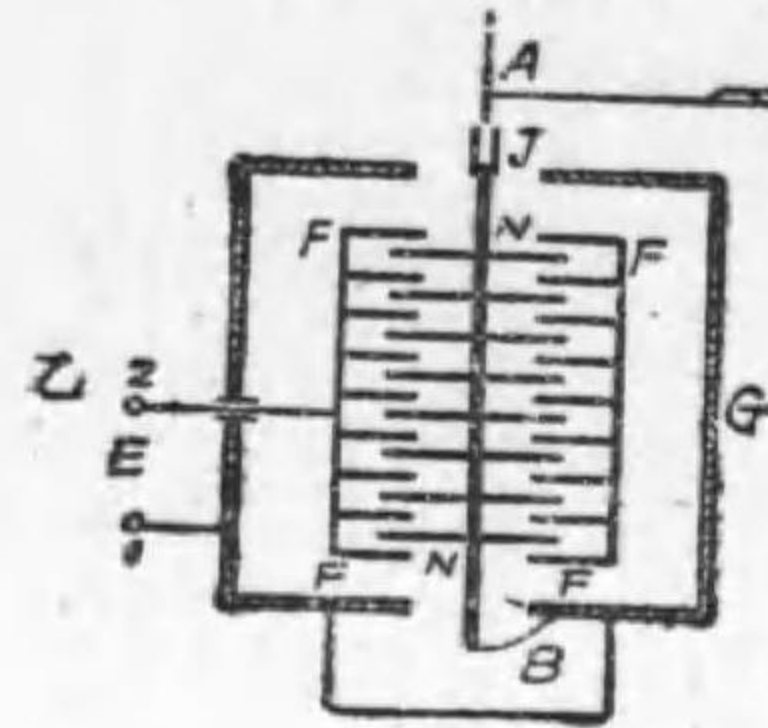
第 5—31 圖はハートマン・エンド・ブラウン會社の多房静電々壓計 (multicellular electrostatic voltmeter) を示す。固定板と可動板とを多数組合せて全體の容量を増し、低電壓で動作し得る様にしたもので、乙圖はその接続の略圖である。可動極 N の軸は絶縁物 J を經て細帯 A で懸垂されて居る。外函 G と N の軸とは薄い金屬片 B で電氣的に接続し、端子 1 に接続される。固定板 F は端子 2 に接続される。

第 5—31 圖 甲



ハートマン會社多房静電々壓計

第 5—31 圖



丙



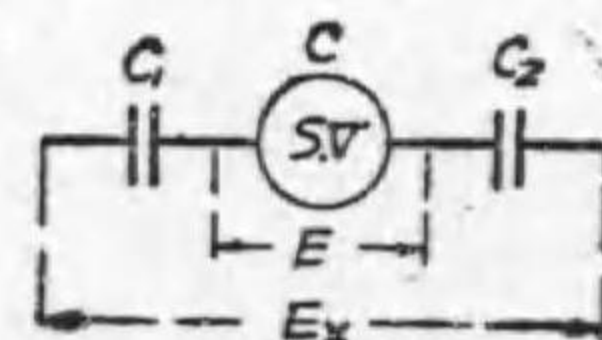
ハートマン會社
多房静電々壓計の略圖

丙圖は固定極 F と可動極 N との平面圖で、可動極 N は直線状をなし、又固定極 F はその外縁は圓弧を成して居るが、その内縁は雙曲渦線 (hyperbolic spiral) を成して居る。此の様な極の構造にすると平等目盛の電壓計となるのである。低電壓用のものでは 5 V から 110 V の全目盛に至る間平等の目盛となつて居る。尙ほ此の型でも種々の測定範囲のものも作られる。制動装置は甲圖に示す様に空氣制動を用ひて居る。

静電々壓計は一種の蓄電器であるから、その測定範囲を擴張するには之れに適當な蓄電器を直列に接続して行ふ事が出来る。即ち第 5—32 圖に示す様に、静電々壓計 S.V. と蓄電器 C₁, C₂ とを直列に接続した場合に、被测電圧を E_x, 電壓計の

受けた電圧を E, 又此の場合に於ける静電々壓計 S.V. の容量を C とせば、C₁, C₂, C が全部直列なる故、その電量は皆相等しく、

第 5—32 圖



静電々壓計の測定範囲の擴張法

$$E_x \times \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C}} = EC$$

$$\therefore E_x = E \times \left\{ 1 + \frac{C(C_1 + C_2)}{C_1 C_2} \right\}$$

茲に注意すべきは、C は S.V. の指針の位置に應じて變はる値である。

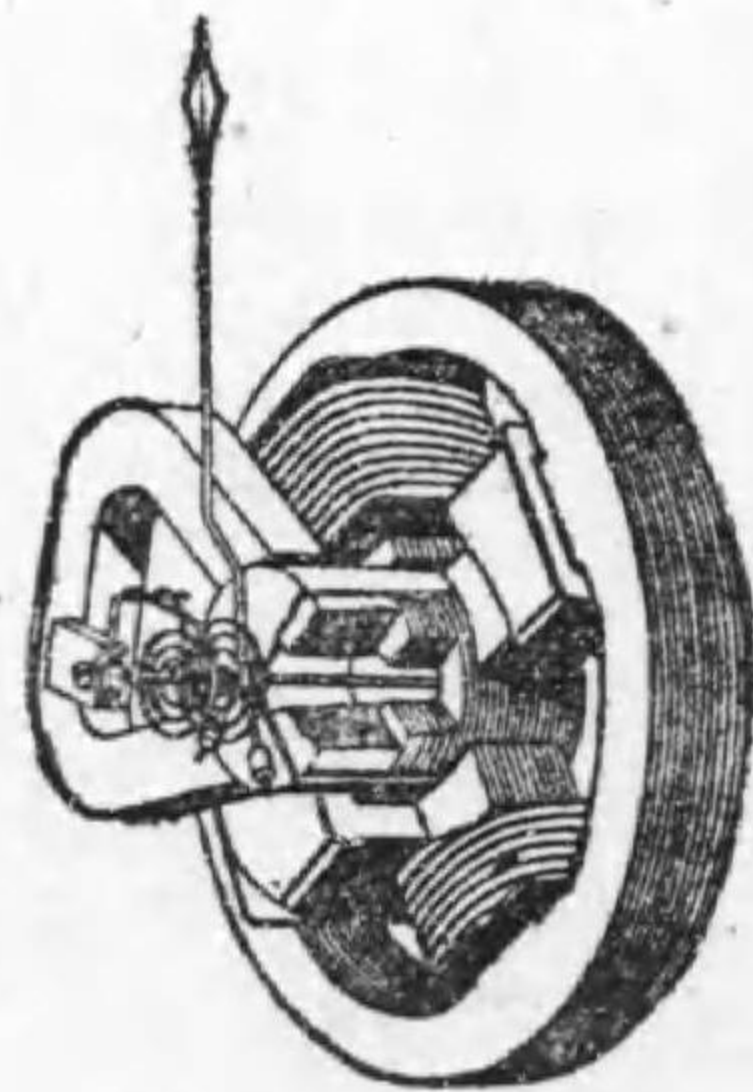
静電々壓計は外部静電界の影響を受け易いから、計器全體を金屬外函に

入れて之れを防いで居る。又此の電圧計は外部磁界の影響を受ける事がなく、温度の影響も殆んど無視し得る。従つて轉位計器として適當である。只靜電型計器の缺點としては電流計が作られない事である。

(III) 交流用計器

9. 誘導型計器 同一周波数の二つの交番磁界が互に直角をなす位置に生じ且つ兩磁界の位相が異なる場合には、此の二つの交番磁界の合成磁界は一つの回轉磁界 (rotating field) を成すものである。斯様な回轉磁界内に可動金屬圓筒を裝置すると、圓筒には電磁誘導により渦流を誘起し、此の渦流と磁界との相互作用によつて圓筒を磁界の回轉する方向に回轉せしめるトルクを生ずる。此の原理を應用せる計器を一般に誘導型計器 (induction type instrument) と稱する。誘導型計器は、回轉磁界を

第 5-33 圖 甲

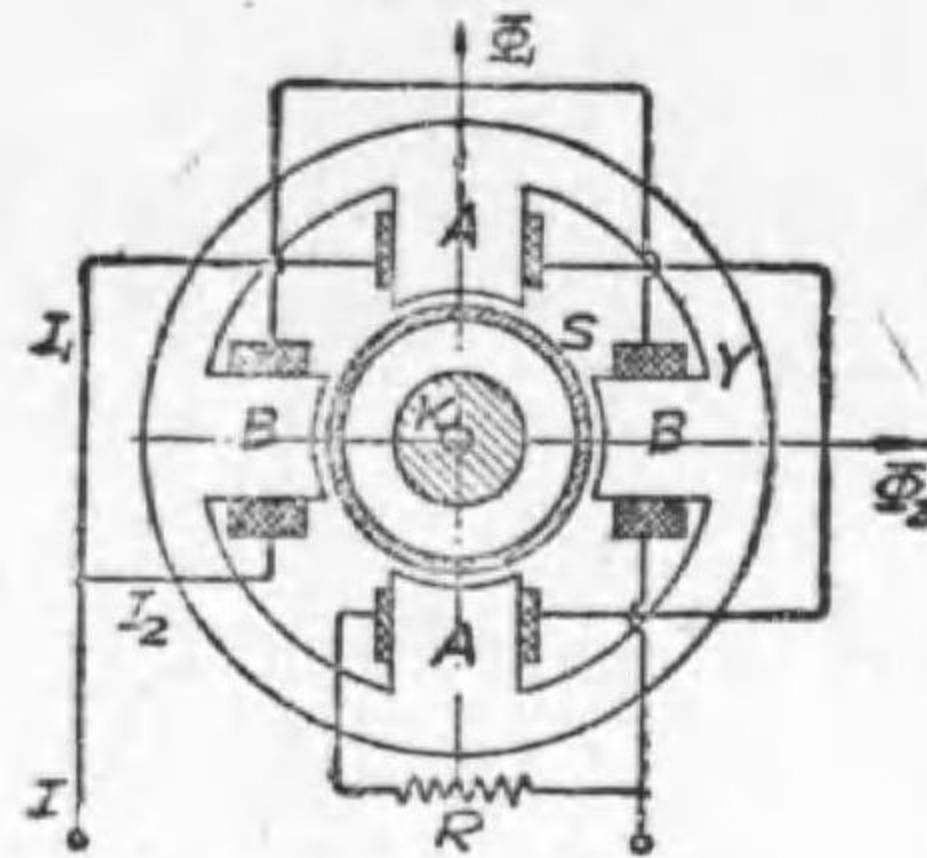


フェラリス型計器

應用せる回轉磁界型と移動磁界 (shifting field) を應用せる移動磁界型との二つに大別する事が出来る。移動磁界は後に説明するが、磁界が一局部に於て移動する一種の回轉磁界と見做される磁界である。

(イ) 回轉磁界型計器 第 5-33 圖甲は此の型に屬するフェラリス (Ferraris) 型計器を示す。乙圖は電流計を示す。Y は成層鐵心で四極を有し、相對する極に AA なる線輪が巻かれ、AA は直列に接続される。他の相對する極には BB

第 5-33 圖 乙

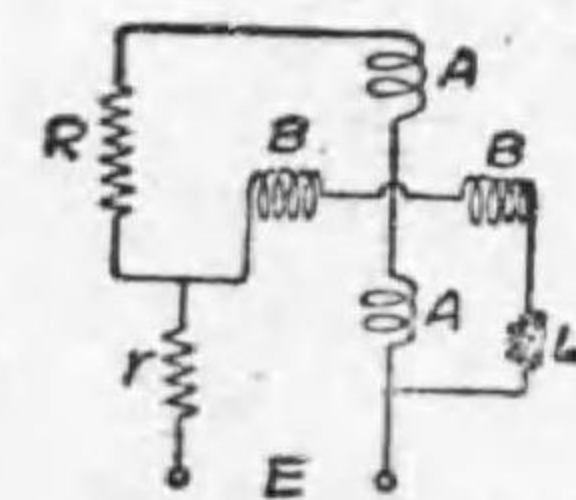


フェラリス型電流計

なる線輪が巻かれ、BB は直列に接続される。AA は巻數少くして無誘導抵抗 R が接続され、又 BB は巻數多くしてインダクタンス極めて大である。之れ等が圖の如く並列に接続されて居る。K は成層鐵心で、之れと極との空隙中にアルミニウム圓筒 S が裝置され、圓筒軸には指針及び制御裝置が取り付けられて居る。

今端子に被測交流 I を通ずると、A, B の並列回路に分流する電流 I_1 , I_2 は I に比例するが、A 回路は抵抗大、B 回路はインダクタンス大であるから、B の電流 I_2 は A の電流 I_1 より位相が遅れる。従つて I_1 によつて生ずる交番磁束 Φ_1 と I_2 によつて生ずる交番磁束 Φ_2 とは乙圖に示す如く互に直角の位置に生じ、又 Φ_2 は Φ_1 より位相が遅れるから、 Φ_1 , Φ_2 の合成は一つの回轉磁界を成し、圓筒 S を回轉せしむる驅動力を生ずる (註参照)。之れが制御彈條 (目盛を平等にするために特殊の制御裝置を用ひてある) の制御力と平衡した位置に指針を靜止せしめる。制動裝置としては二つの永久磁石を圓筒 S に對向せしめ以つて渦流制動をせしめて居る。

第 5-34 圖

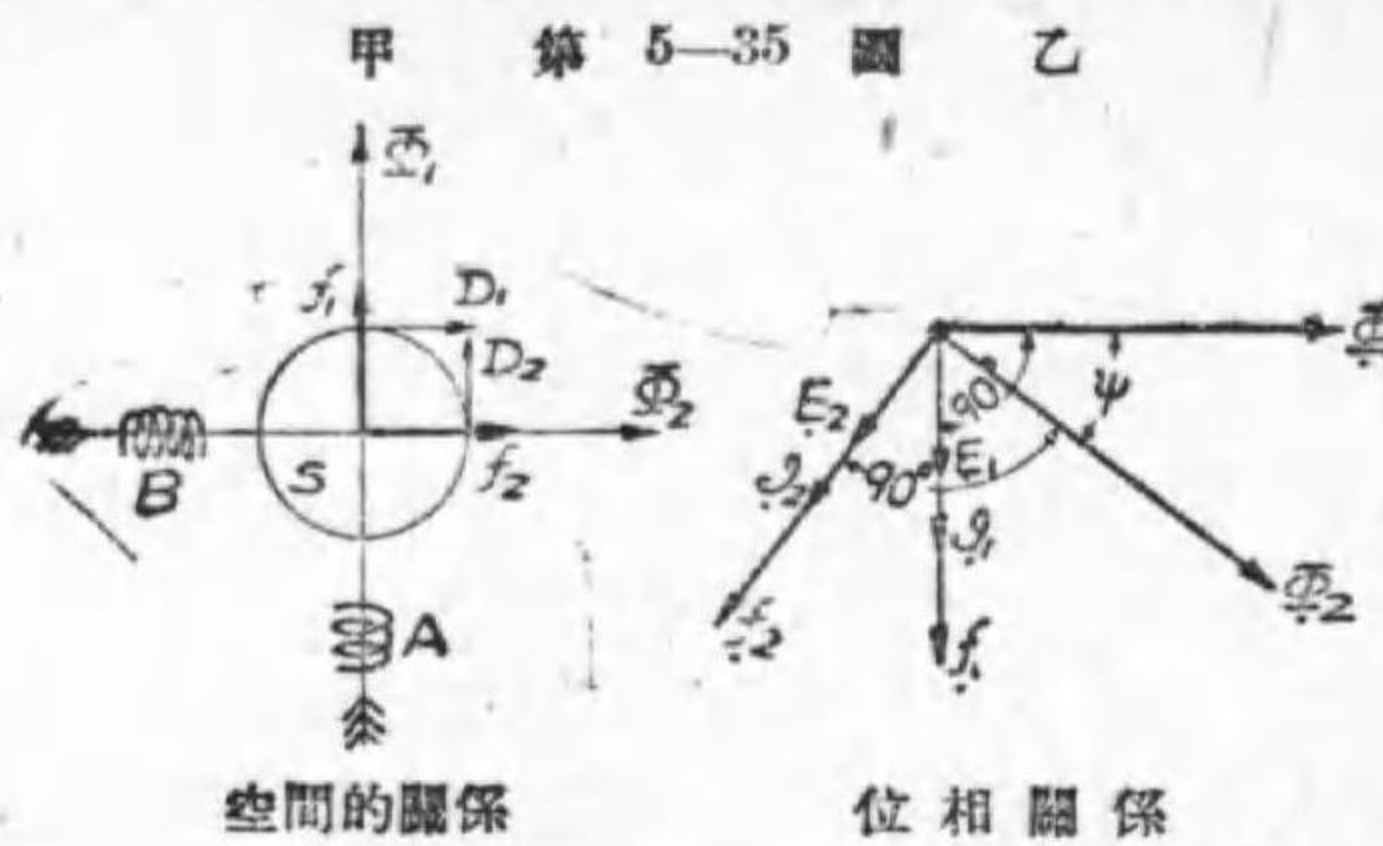


フェラリス型電壓計

電壓計の場合は第 5-34 圖の様に、線輪 A, B は共に細い線で巻き A に抵抗 R, B にインダクタンス L を接続して之れ等を並列にしたものに、更に高抵抗 r を直列に接続したものである。

(註) 互に直角の位置に生じ且つ位相の異なる二つの交番磁界 ϕ_1, ϕ_2 による圓筒 S に生ずるトルクを、回轉磁界によらずに、交番磁界と渦流との電磁力作用により考へて見よう。

第 5-35 圖甲に示す様に、二つの交番磁界 ϕ_1, ϕ_2 は圓筒 S の位置で互



に直角の位置に生じ、且つ時間的には乙圖に示す様に ϕ_2 は ϕ_1 より ψ だけ位相が遅れて居るものとする。各磁界 ϕ_1, ϕ_2 によつて S に電磁誘導により生じる起電力 E_1, E_2 は、互に直角の位置に且つ夫々各磁界より 90 度遅れて生じ、値は夫々各磁界と交番周波常數 (pulsance) ω とに比例する。従つて圓筒の渦流回路のインピーダンスを抵抗のみと假定すれば各渦流は各起電力と同相で、値は夫々起電力に比例する。故に ϕ_1, ϕ_2 によつて生じる渦流を夫々 J_1, J_2 とせば、之れ等の位相關係は乙圖で表はされる。 J_1, J_2 によつて生ずる交番磁界を夫々 f_1, f_2 とせば、之れ等は夫々 J_1, J_2 と同相で且つ夫々 J_1, J_2 に比例する。 f_1 と ϕ_1 又 f_2 と ϕ_2 は圓筒に何等のトルクを生ぜしめないが、 f_1 (従つて J_1) と ϕ_2 とは電磁力によつて圓筒を時計式の方法に回轉せしめるトルク D_1 を生じ、又 f_2 (従つて J_2) と ϕ_1 とは圓筒を反時計式の方法に回轉せしめるトルク D_2 を生ずる。従つて圓筒には此の二者のトルクの合成即ち $(D_1 - D_2)$ が時計式に作用する譯である。乙圖より明かなる如く、 J_1 と ϕ_2 との相違は $(90^\circ - \psi)$ 、又 J_2 と ϕ_1 とは相違が $(90^\circ + \psi)$ であるから、

$$D_1 = k J_1 \phi_2 \cos(90^\circ - \psi), \quad D_2 = k J_2 \phi_1 \cos(90^\circ + \psi),$$

$$\text{又 } J_1 = k' \omega \phi_1, \quad J_2 = k' \omega \phi_2$$

故に圓筒に作用する驅動トルク D は、

$$D = D_1 - D_2 = k' [J_1 \phi_2 \cos(90^\circ - \psi) - J_2 \phi_1 \cos(90^\circ + \psi)]$$

$$\begin{aligned} &= k k' \omega \phi_1 \phi_2 [\cos(90^\circ - \psi) - \cos(90^\circ + \psi)] = 2 k k' \omega \phi_1 \phi_2 \sin \psi \\ &= K \phi_1 \phi_2 \sin \psi \end{aligned} \tag{イ}$$

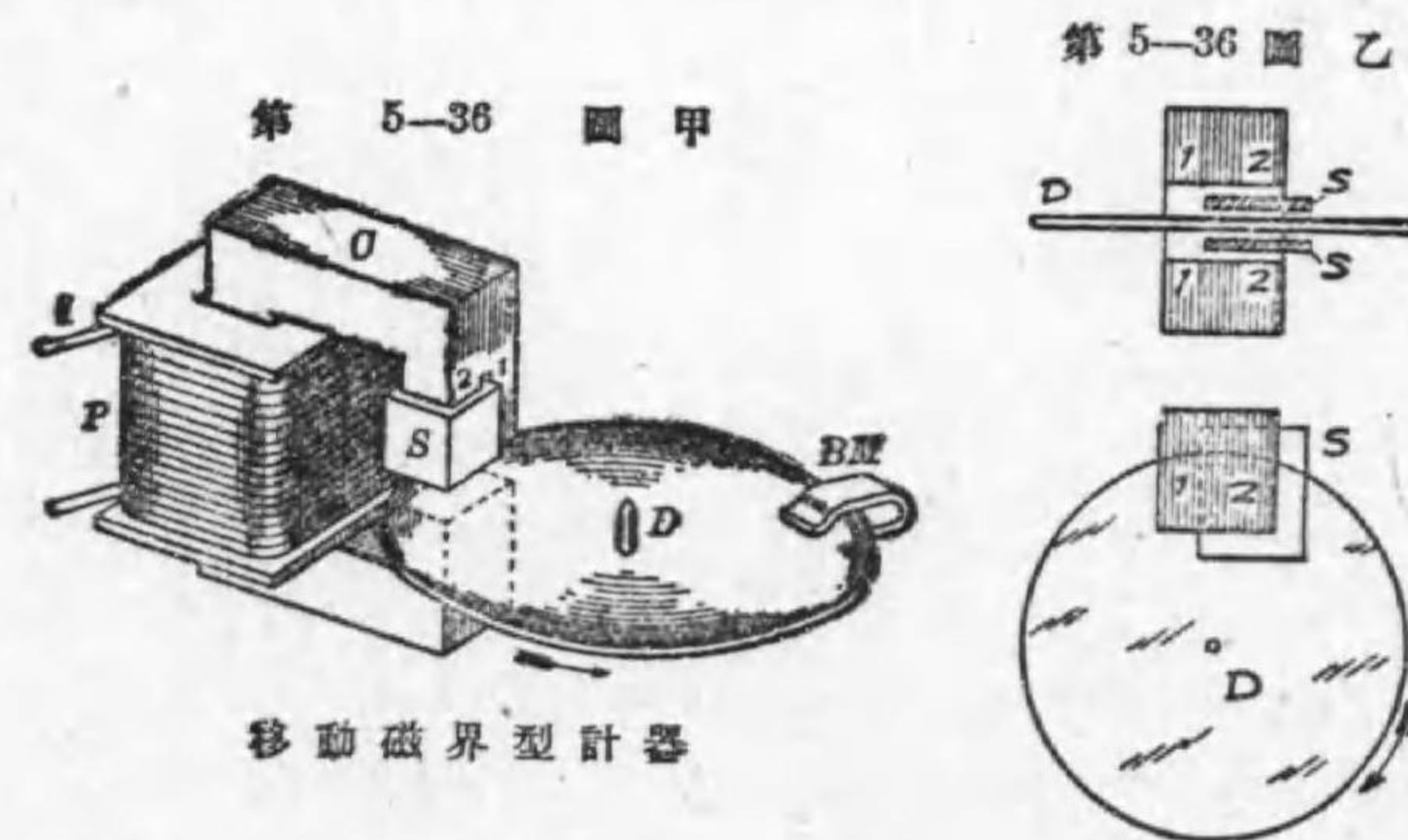
之れが回轉磁界型計器のトルクの式である。 ϕ_1, ϕ_2 は夫々 A, B 各線輪の電流 I_1, I_2 によつて生ずるものであるから、夫々 A, B の電流 I_1, I_2 に比例し、且つ相違 ψ も I_1, I_2 の相違に等しい (極は成層せる故鐵損電流を無視する)。従つて周波數が一定の場合は K, ψ は一定の値である。

電流計の場合は I_1, I_2 は被測電流 I に比例し、又電壓計の場合は之れ等は被測電壓 E に比例するから、 $\phi_1 \phi_2 \propto I^2 \propto E^2$,

$$\therefore D \propto I^2 \propto E^2 \tag{ロ}$$

即ち一定周波數では、トルクは被測電流又は被測電壓の自乗に比例する。尙ほ (イ) 式で明かなる通り、 ψ が 90 度に近い程 D は大になるから、 I_1, I_2 の相違は出来るだけ 90 度に近づける程良い譯である。即ち A 線輪は抵抗を大にし、 B 線輪はインダクタンスを大にする譯である。

(ロ) 移動磁界型計器 第 5-36 圖甲は移動磁界型計器を示す。成層鐵心 C に勵磁線輪 P が巻かれ、之れに被測電流 (又は被測電壓に比例する電

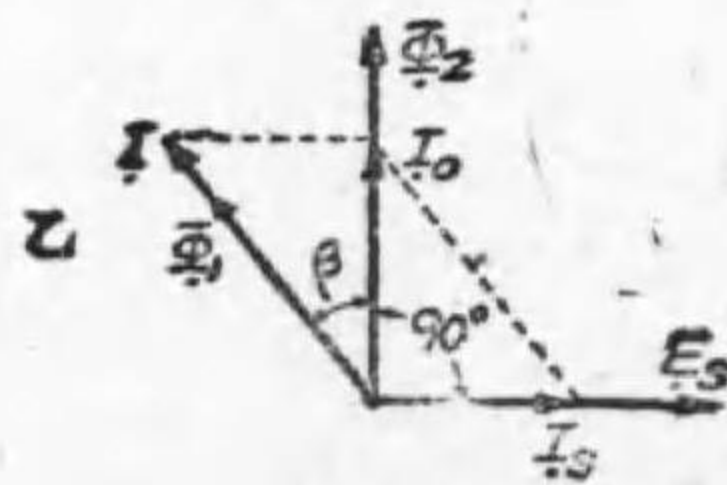
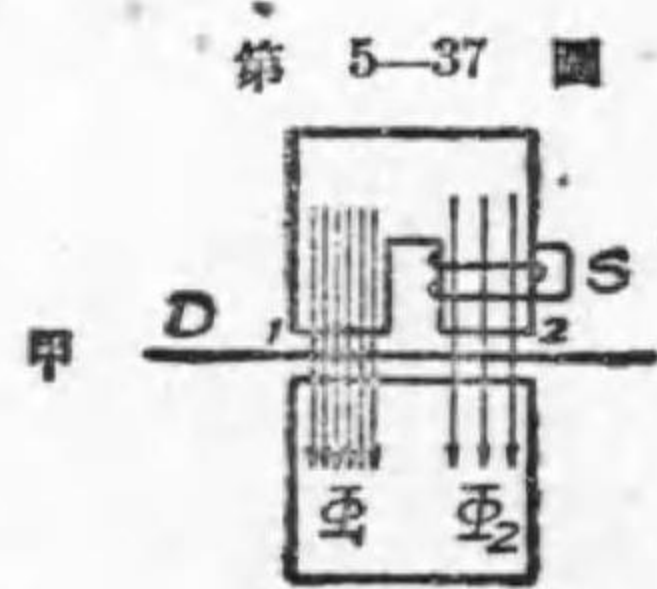


流) I を通ずる。鐵心 C は二極 1 2 に分かたれ、2 には短絡線輪又は短絡金屬環 S が巻かれて居る。(又は乙圖に示す様に 2 部分に二

枚の金属板 S を装置する)。此の S を隈取線輪 (shading coil) と稱する。 D はアルミニウム可動圓板で、其の軸には指針及び制御彈條が取り付けられて居る。永久磁石 BM は制動用磁石である。

隈取線輪 S は丁度變壓器の二次を短絡したのと同様であつて、一次線輪に當る P に交流を通ずると、 S 従つて極 2 を通つて圓板を貫く磁束 (之れを ϕ_2 と名付ければ) ϕ_2 は極 1 を通り圓板を貫く磁束 ϕ_1 より位相が遅れるものである。(註参照)。従つて此の結果は圓板の在る空隙部では磁界が極 1 の處から極 2 の處へと移動する事になる。従つて此の移動磁界が圓板を切る爲に圓板に渦流を誘導し、此の渦流と磁界との電磁力作用により圓板を磁界の移動する方向に回轉せしめる駆動トルクを生ずる。

【註】 第 5—37 圖は隈取線輪の爲め ϕ_1 が ϕ_2 より位相が進む事を簡単に説明する爲の圖である。 S を通り圓板を貫く磁束 ϕ_2 によつて、 S には之れより 90 度遅れる起電力 E_s を誘導し、此の起電力のために S にはそのインピーダンスにより定まる相差 α だけ遅れて電流 I_s が流れる。 S は抵抗のみと假定すれば I_s は E_s と同相である。 ϕ_2 を生ずるに要する電流は ϕ_2 と同相で、鐵損電流を無視すれば、一次 P に流るべき勵磁電流 I_0 は、圖の如く ϕ_2 と同相である。従つて P に通ずる電流 I は I_0 と I_s とのベクトル差でなければならない。従つて又鐵損を無視すれば極 1 を通る磁束 ϕ_1 は I と同相である。故に乙圖から明かな通り ϕ_1 は ϕ_2 より β 丈位相が進む事になる。



第 5—37 圖

隈取線輪の作用は ϕ_2 より β 丈位相が進む事になる。次に此の場合のトルク D を考ふるに、これは回轉磁界型計器の場合と同様に考へられる。即ち ϕ_1 によつて圓板に生ずる渦流と ϕ_2 との電磁力によるトルクと、 ϕ_2 によつて圓板に生ずる渦流と ϕ_1 との電磁力によるト

ルクとの合成(代數的)トルクが求むる駆動トルクであるから、 $D = K\phi_1 \times \phi_2 \sin\beta$ となる。然るに此場合、 $\phi_1 \propto I$ 、又 $\phi_2 \propto I_0 (= I \cos\beta)$ であるから、 $D \propto I^2 \sin\beta \cos\beta$ となる。周波數一定の場合、 β は一定なる故、 $D \propto I^2$ となる。

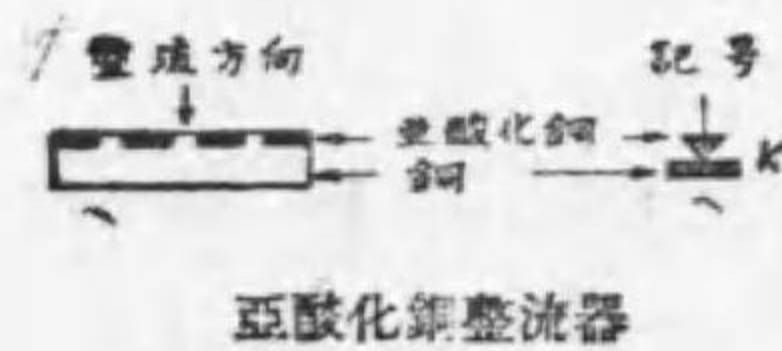
電壓計の場合は線輪 P には細い電線を巻數多くして測定範圍に應じた直列抵抗を接続し、又電流計の場合には P には測定範圍に應じた太さの電線を巻數小にして用ひる。

誘導型計器の特徴は殆んど完全に近い鐵の磁路を有するから、圓筒又は圓板を貫く磁束が大で、従つて駆動トルクが大である。又構造が堅牢で而も可動部分に電流を導くべき何等の装置も要しない。又圓筒や圓板の位置如何に拘らずトルクの生ずる關係は一定であるから、之れに普通の制御彈條を用ひると目盛の範圍を擴大する事も出来る。然し電壓計及び電流計では、目盛を平等に近づける爲に特殊の制御法を用ひて居るが、その説明は省略する。此の計器の缺點としては周波數變化の影響が大である事である。又交流波形の影響もある。従つて使用すべき規定周波數の交流を用ひて電流計型標準計器と比較して(即ち電壓計ならば互に並列にし、又電流計ならば直列にして)目盛を較正すべきである。尙ほ溫度變化によつても圓筒や圓板に生ずる渦流も變はるから誤差を生ずる。従つて此の計器は配電盤用としてはよいが、精密用計器としては不適當である。

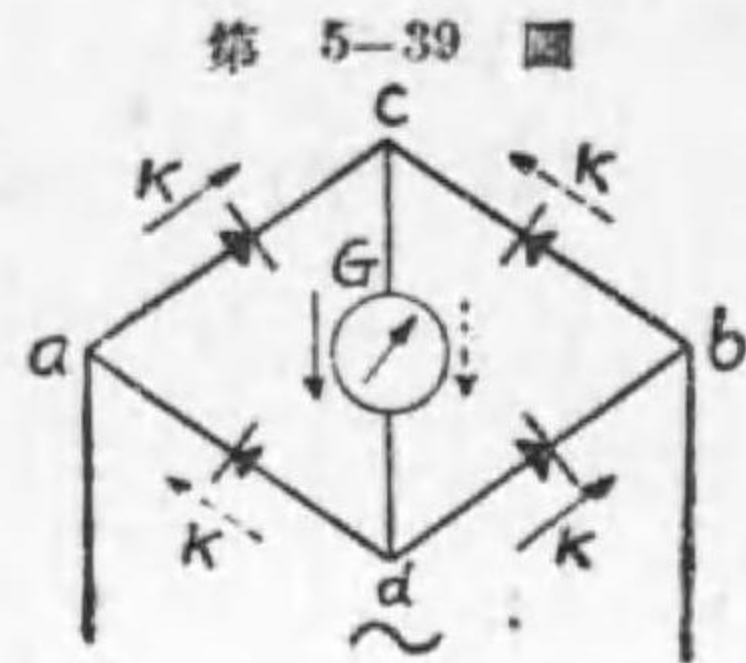
10. 整流型計器

銅を高溫度に加熱しその表面に亞酸化

第 5—38 圖



銅皮膜を生ぜしめたものは、之れに電流を通ずる場合、亞酸化銅より銅の方向へは電流を通ずるが、その反方向には殆んど電流を通さない整流作用を有するものである。(第 5—38



整流器型計器

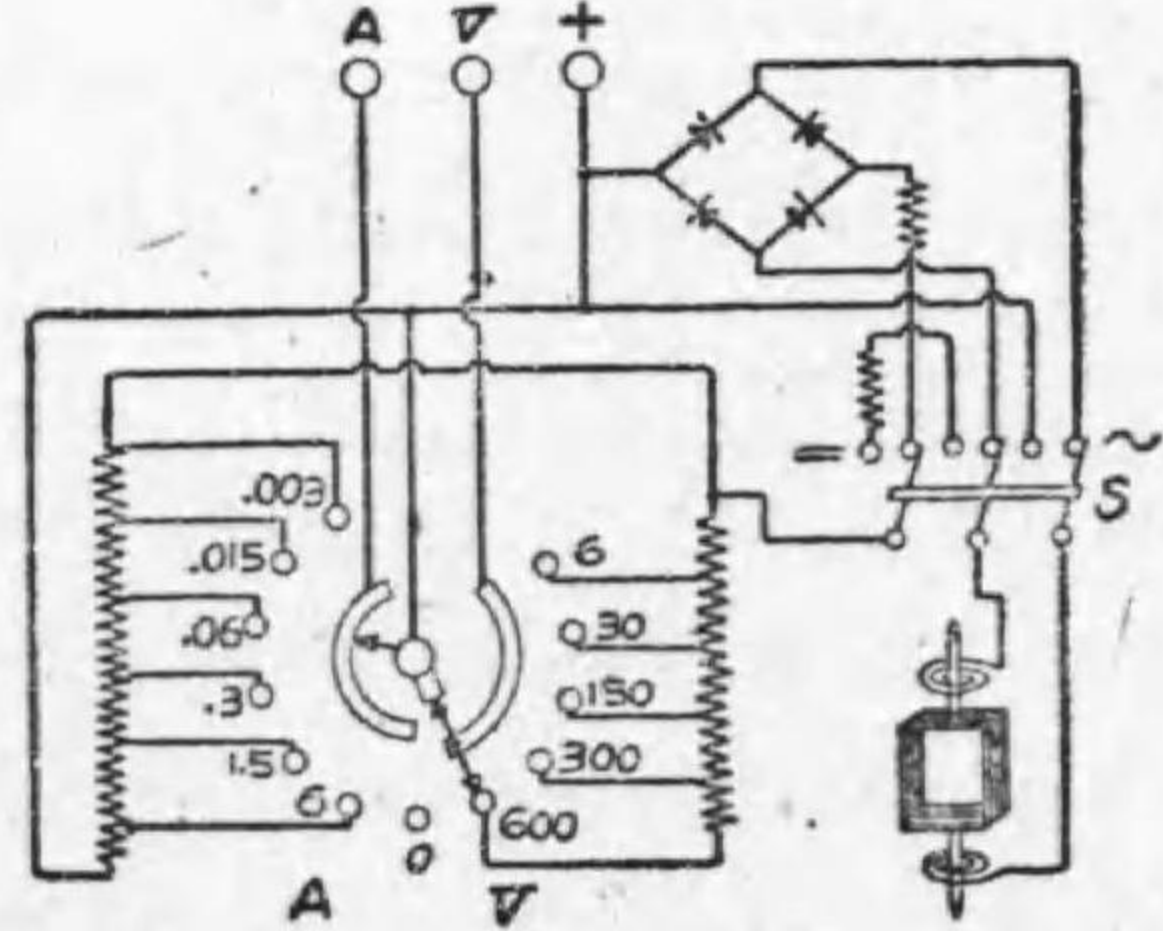
第 5-39 圖 (圖参照)。此の亜酸化銅整流器 K を 4 個第 5-39 圖に示す様にブリッジに接続し c, d 間に直流可動線輪型計器 G を接続し a, b 間に交流を通ずれば、交流の一サイクル中で、半サイクルの間は實線の矢印で示す様に、又次の半サイクルの間は點線の矢印で示す様に電流が通るから G には全波整流された電流が通じ、従つて G の可動線輪は其の平均値で動作するから、指針は交流の平均値に應じた振れをする。従つて目盛盤には正弦波交流の實効値を目盛つて置けば、正弦波交流の計器とする事が出来る譯である。但し此の計器で以つて正弦波から餘り異なつた波形の交流を測る場合は誤差を伴ふものである。亜酸化銅整流器の抵抗は之れに通ずる電流値によつて變はるから、之れに適當な直列抵抗を接続してある。又此の計器は溫度變化の影響もある。尙ほ又交流の周波數が數千サイクル

第 5-40 圖 甲



ハートマン會社小型萬能電壓電流計

第 5-40 圖 乙



小型萬能電壓電流計

ともなると整流器が蓄電器として働くから誤差を生ずる。然し此の型の計

器は構造が簡單で、上記の諸注意をすれば感度がよく確度も高いから廣く使用される。第 5-40 圖甲はハートマン・エンド・ブラウン會社製の小型萬能電壓電流計を示す。乙圖は其の接続である。(之れを直流計器として使用するには、開閉器 S を左方 = 側に閉ぢて整流器を除けばよい。) 交流計器として使用するには圖に示す様に S を右方 ~ 側に閉ぢればよい。左方の抵抗器は電壓電流の測定範圍に應じ、計器に並列又は直列に種々組合はす様に出來た抵抗器である。電壓計としては 6V 乃至 600V の 5 種の測定範圍を有し、電流計としては 0.003A 乃至 6A の 6 種の測定範圍を有する。

11. 計器用變成器

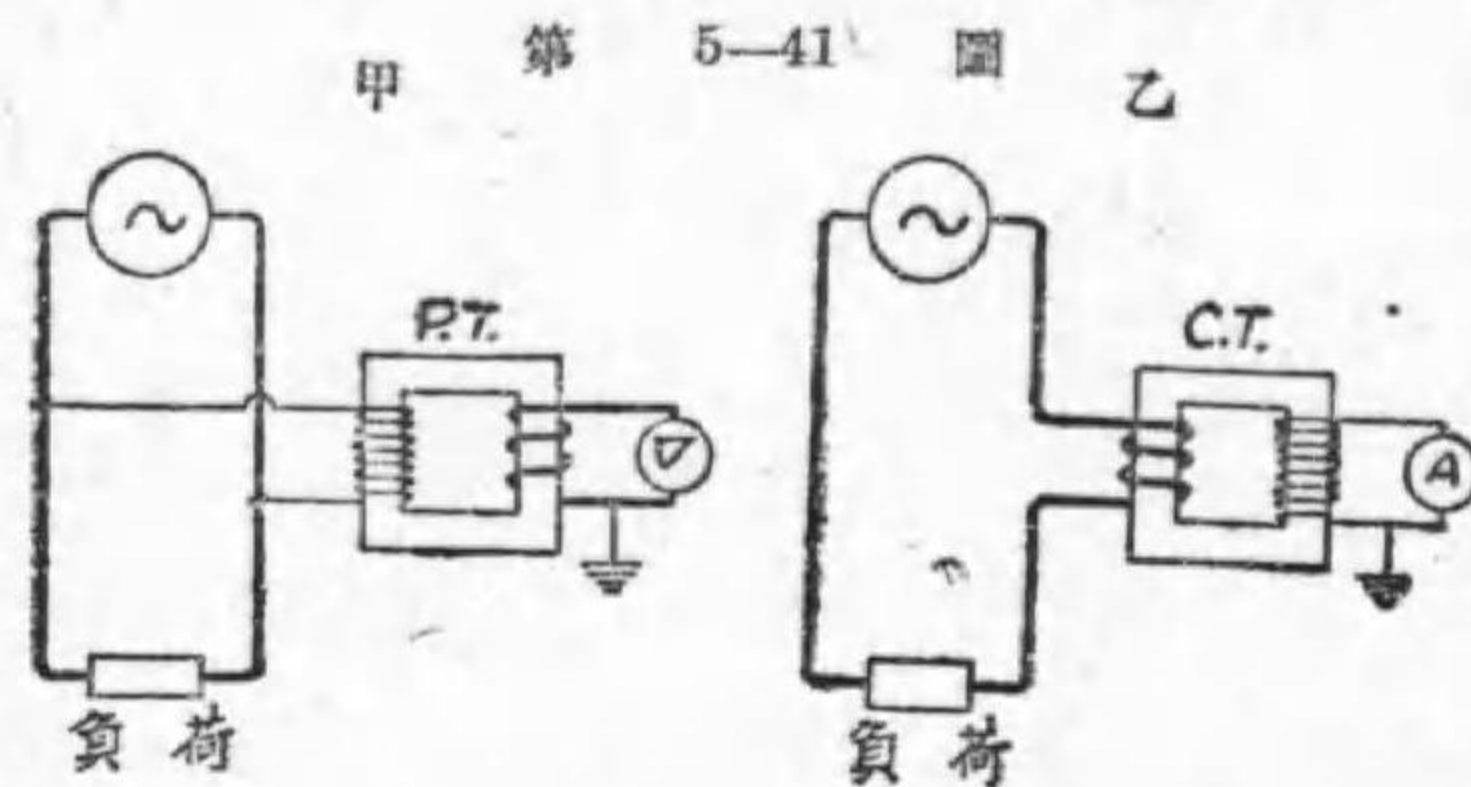
電壓計の測定範圍を擴大するには直列抵抗器 (靜電圧計では蓄電器) を使用し、又電流計の測定範圍を擴大するには分流器を用ふる事は既に述べた通りである。尙ほ交流の計器では測定範圍を擴大するには、電壓計では電壓變成器 (potential transformer) を用ひ、又電流計では變流器 (current transformer) を用ひるのが普通である。此の電壓變成器及び變流器を總稱して計器用變成器 (instrument transformer) と稱する。

計器用變成器は電力用變壓器と同様に鐵心に巻かれた一次及び二次線輪より成り、計器用變壓器の一次電壓と二次電壓との比は略ぼ一次線輪の巻數と二次線輪の巻數との比に等しく、又變流器の一次電流と二次電流との比は、略ぼ一次線輪の巻數と二次線輪の巻數との比の逆數に等しいものである。

計器用變成器を用ひる一つの目的は、上述の様に計器の測定範圍を擴大

する事であるが、今一つの目的は、計器を變成器によつて高電圧回路から離し、計器に絶縁を害する様な高電圧がかゝらない様にし又計器取扱者に危険がない様にする目的である。此の爲に計器に接続される二次側の一線を接地する。

第5-41 圖甲は電壓變成器 P.T. と電壓計との接続圖で、電壓變成器の



定格二次電壓は、100 又は 110 V で電壓計には此の二次定格電壓に適するものを用ひる。乙圖は變流器 C.T. と電流計との接続圖である。

變流器の定格二次電流は 5 A とするのが普通で、電流計は 5 A に適するものを用ひる。變流器の二次回路は開いてはいけない、即ち電流計を取去る場合には變流器の二次線輪を短絡してから電流計を取去るべきである。

計器用變成器に於ては、其の二次に接続されたインピーダンスを負荷 (load) と云はずに特に二次負擔 (secondary burden) と稱する。即ち電壓變成器の場合は、その定格二次電壓 (100 又は 110 V) に於て二次に接続されたインピーダンスに消費されるヴォルトアムペア (VA) を以つて電壓變成器の負擔と稱し、又變流器の場合ならば、その定格二次電流 (5A) に於て二次に接続されたインピーダンスに消費されるヴォルトアムペア (VA) を以つてその變流器の負擔と稱する。

電壓變成器の變壓比や變流器の變流比は出来るだけ變化を小にする様に作られて居るが、此の變成比は二次電流の値によつて變化するため、之れ

等變成器を電壓計、電流計と共に用ひて測定した結果には、計器自身の誤差以外に此の變成器の變成比の誤差も含まれて來る譯である。勿論豫め變



鐵心分割型變流器付電流計

成器を計器と接続して、計器の目盛には一次の電壓値 (又は電流値) を目盛つておけば斯様な事は無い。

電壓變成器及び變流器の構造に就いては、電氣機械變壓器の課目で説明されてあるから茲にはその説明を省く。第 5-42 圖はフェランチ (Ferranti) 會社の變流器附電流計を示すもので、測らんとする電流の通する電線を隨時鐵心内に挟込み、それを一次導體とするもので、電流計の頭部に二次線輪が鐵心に巻かれて居り、之れが電流計に接続され居る故簡単に電流を読み取る事が出来る。

問 題 (選試)

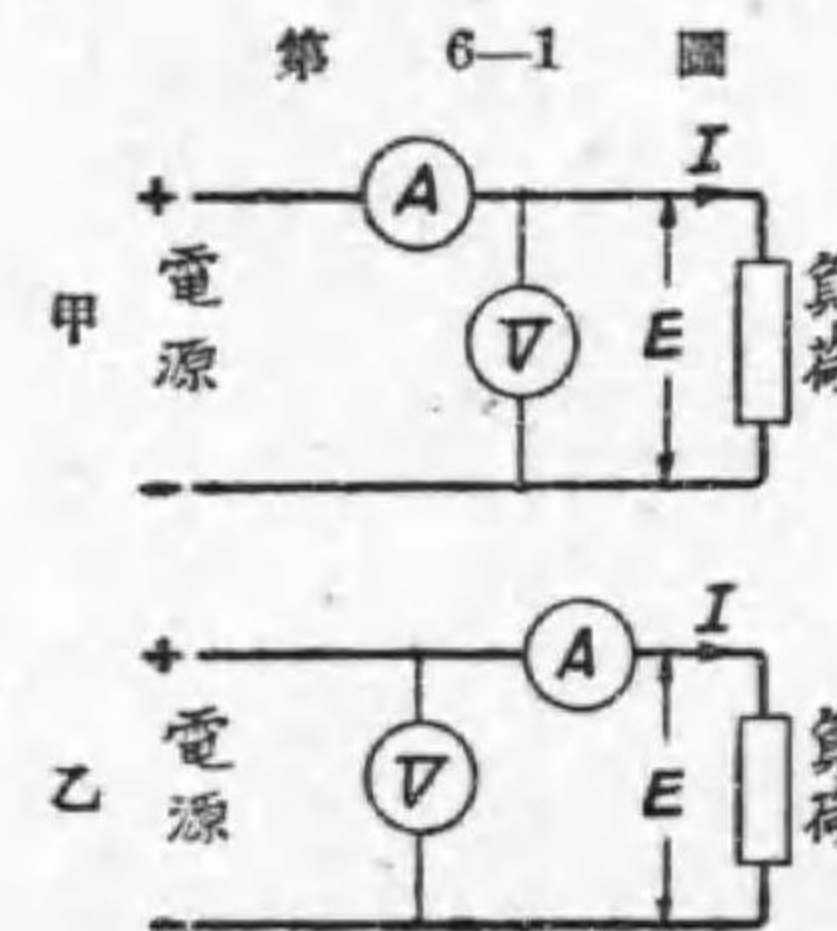
1. 指示電氣計器に於て使用せらるゝ制御法及び制動法各三を挙げよ。
2. 直流電壓計の一種に就いて其の原理を説明せよ。
3. 可動線輪型電流計は平等目盛となすことを得る理由如何。
4. ウェストン型直流電流計の誤差を生ずる原因如何。
5. 150 ヴォルト用直流電壓計あり、其の抵抗は 18 000 オームなりと云ふ。今此の電壓計を直流 600 ヴォルト用のものとなす爲には、更に幾オームの直列抵抗を要するや。 答 54 000 オーム

6. 50 ミリヴォルトの測定範囲を有する直流ミリヴォルト計を以つて、直流 50 アムペア迄の電流を測定するためには、幾オームの分流器を要するや。但しミリヴォルト計の最大目盛に對する電流は 10 ミリアムペアとす。 答 0.001 オーム (約)
7. 電流力計型計器は如何なる原理を應用するものなりや。
8. 可動鐵片型電流計に於て、電流を増加する場合と之を減少する場合とに依り、同一の電流に對し指示を異にする理由を説明せよ。
9. 交流電壓計の直流を以つて檢定し得るものと、直流を以つて檢定し得ざるものと各一種につき其の理由を説明せよ。
10. 標準電壓計を用ひて電壓計を檢定する方法如何。又結果を如何に記録するを便とするや。

第六章 電力の測定

1. 電壓計及び電流計による直流電力の測定

定 直流回路に於て、負荷の給與電壓が E ヴォルトで負荷電流が I アムペアなる時は、負荷電力 P は、 $P=EI$ ワットであるから、電壓計及び電流計を以つて E, I を測り其の相乗積を取れば負荷電力を間接に測定し得る譯である。然し乍ら實際に電壓計及び電流計を接続するに際しては、第 6-1 圖甲及び乙に示す様に二様の接続法がある。甲の接続では、電壓計の読みは負荷電圧 E を示すが、電流計は負荷電流と電壓計に通ずる電流との和を示すことになるから、嚴密に云へば此の場合の兩計器の讀みの相乗積は負荷電力 P より大である。又乙の接続では、電流計の読みは負荷電流 I を示すが、電壓計は負荷の電圧と電流計の電壓降下との和を示す事になるから、嚴密に云へば兩計器の讀みの相乗積は負荷電力 P よりは大である。



電壓計及び電流計による直流電力測定

今 R_v =電壓計の抵抗, R_a =電流計の抵抗, とせば

甲圖の場合は,

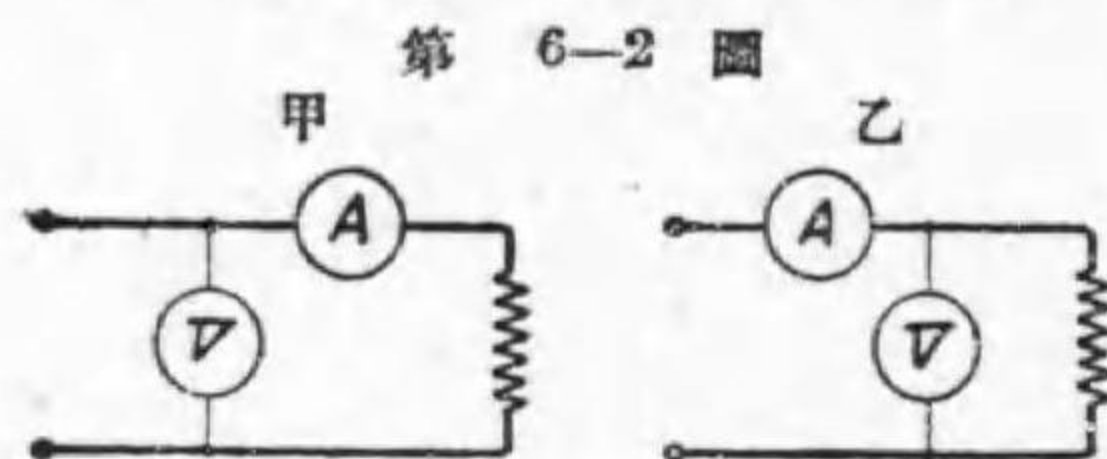
$$\begin{aligned} (\text{電壓計の讀}) \times (\text{電流計の讀}) &= E \times \left(I + \frac{E}{R_v} \right) = EI + \frac{E^2}{R_v} \\ &= P + (\text{電壓計内の損失電力}) \quad (1) \end{aligned}$$

乙圖の場合は,

$$\begin{aligned} \text{(電圧計の讀)} \times \text{(電流計の讀)} &= (E + IR_a) \times I = EI + I^2 R_a \\ &= P + \text{(電流計内の損失電力)} \quad \text{(ロ)} \end{aligned}$$

(イ), (ロ) 二式を一言にして云へば, 兩計器の讀みの相乗積は, 負荷電力と負荷に近く接続された計器内の損失電力との和に等しい。従つて計器内の損失電力が負荷電力に比して非常に小なる場合は, 兩計器の讀みの相乗積を以つて負荷電力として実用上差支へない。尚ほ此の場合, 甲乙の接続法中, 計器の損失の大小を比較して其の小なる計器を負荷に近く接続する方が精度が高い事は勿論である。

例 電圧計及び電流計を用ひて直流電力を測定する場合に於て, 回路の電圧約100ヴォルト, 電流約1アムペアなる時, 計器の損失に対する更正を行はずして



測定の際誤差を小ならしむるには, 第6-2圖甲乙孰れの接続法を選定すべきや。但し電圧計の抵抗は10000オーム, 電流計の抵抗は2オームとす。(遊試)

解 甲接続では, 電流計の損失電力は約 $1^2 \times 2 = 2$ ワット
乙接続では, 電圧計の損失電力は約 $\frac{100^2}{10000} = 1$ ワット
計器の損失電力は乙の場合が甲の場合より小なる故, 乙圖の場合を可とす。

2. 単相交流電力 (附三電圧計法及び三電流計法) 一般

に単相交流回路に於ける電圧, 電流の瞬時値が夫々

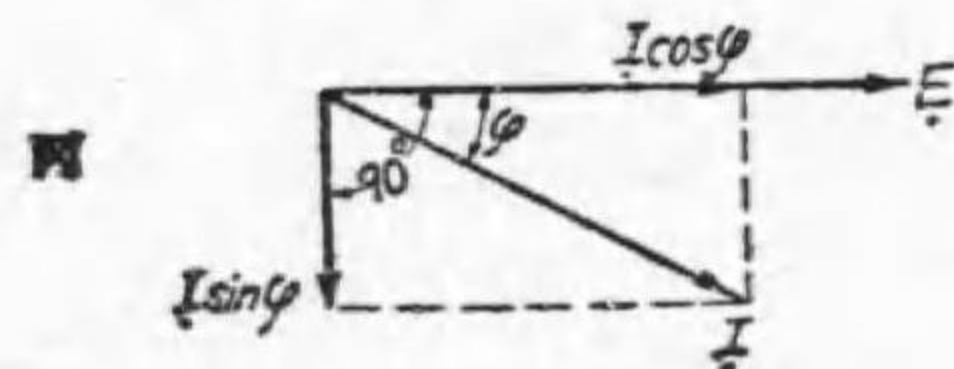
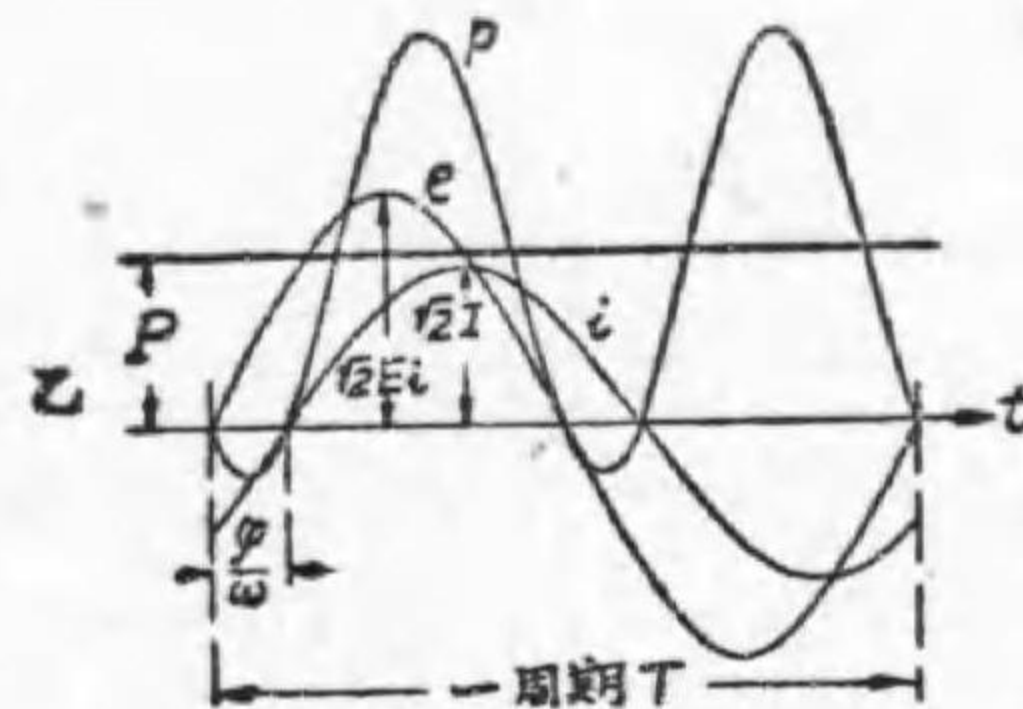
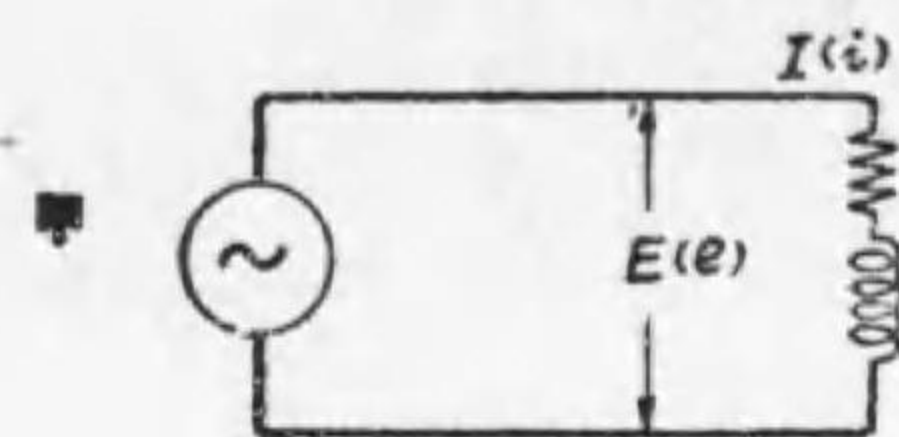
$$e = \sum \sqrt{2} E_k \sin(k\omega t + \alpha_k), \quad i = \sum \sqrt{2} I_k \sin(k\omega t + \alpha_k - \phi_k)$$

なる場合は瞬時電力は $p = ei$ で, 其の一周期間の平均即ち交流電力 P は,

$$P = (p \text{ の一周期間の平均}) = \sum E_k I_k \cos \phi_k$$

特に簡單なる正弦波交流の場合を考へると (本書では主として正弦波交

第 6-3 圖



流の場合を考へる事にする), 第6-3圖甲に示す回路に於て, $e = \sqrt{2} E \sin \omega t$, $i = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \phi)$ なる場合の瞬時電力 p は,

$$p = ei = EI [\cos \phi - \cos(2\omega t - \phi)]$$

で, 交流電力 P は,

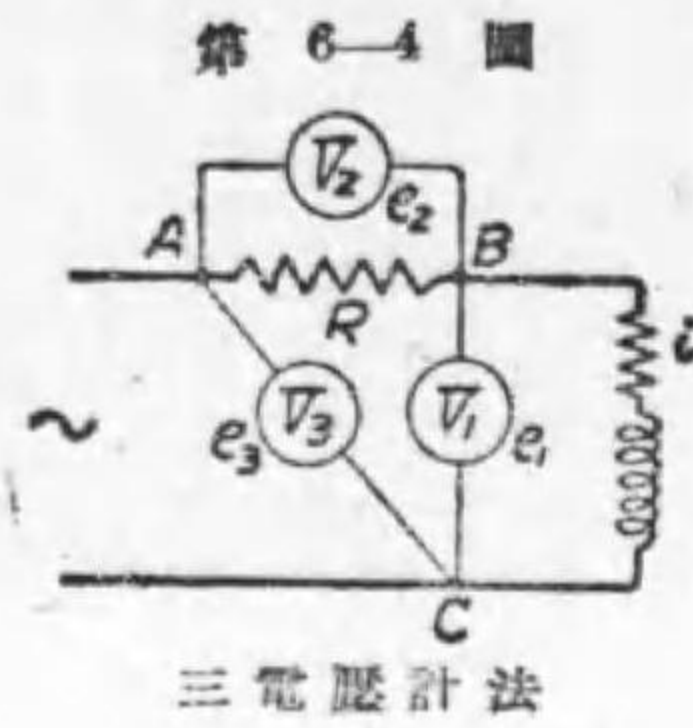
$$\begin{aligned} P &= (p \text{ の一周期間の平均}) = EI \cos \phi \\ &= \text{(實効電圧)} \times \text{(實効電流)} \times \text{(力率)} \end{aligned}$$

となる。乙圖は此の場合の e, i, p, P の時間 t に対する關係を示す。尚ほ此の正弦波交流の場合は丙圖に示す如く電圧電流をベクトルで表はす事が出来る。電圧 E と之れと同相なる電流の有効分 $I \cos \phi$ との積 $E I \cos \phi$ が交流電力である。(E と無効電流 $I \sin \phi$ との積 $E I \sin \phi$ は無効電力である)。

従つて力率 $\cos \phi$ が不明の場合は單に電圧計と電流計とのみを使用しては, 皮相電力 EI は測れるが電力 $EI \cos \phi$ は測れないのである。電力を測るには第3節以下に述べる電力計を用ひる。

電力は直流でも交流でも之れを直接, 電力計で測るのであるが, 茲に単相交流電力を間接に測る方法として三電圧計法 (three-voltmeter method) 及び三電流計法 (three-ammeter method) を説明しよう。

(イ) 三電圧計法 無誘導抵抗 R を負荷に直列に接続し, 三個の交流電圧計 V_1, V_2, V_3 を第6-4圖の如く接続する。今 BC, AB, AC の電圧の瞬時値を夫々 $e_1,$



三電圧計法

第 6-4 圖 e_1, e_2 實効値を夫々 E_1, E_2, E_3 とし、負荷電流の瞬時値を i 、實効値を I とせば、 $e_3 = e_1 + e_2$

$$\therefore e_3^2 = e_1^2 + e_2^2 + 2e_1e_2$$

$$\therefore e_1e_2 = \frac{1}{2}(e_3^2 - e_1^2 - e_2^2), \quad \text{又 } i = \frac{e_2}{R}$$

$$\therefore \text{瞬時電力 } p = e_1i = e_1 \frac{e_2}{R} = \frac{1}{2R}(e_3^2 - e_1^2 - e_2^2)$$

此の電力の瞬時値の一周期間の平均を求めれば、交流電力 P を得る。然るに上式の右邊の平均を取る場合、瞬時電壓の自乗の平均は實効値の自乗になる故、

$$\text{交流電力 } P = (p \text{ の平均}) = \frac{1}{2R}(E_3^2 - E_1^2 - E_2^2)$$

即ち各電圧計 V_1, V_2, V_3 の読み E_1, E_2, E_3 を得れば、上式より交流電力 P は算出される。

【註】 正弦波交流の場合には、各部の電圧及び電流はベクトルを以つて示される。

さうして、電力 P と電圧 E_1, E_2, E_3 との関係は次の様にベクトル圖からも導き出される。今負荷電流 I がその電圧 E_1

より ϕ だけ遅れ居るものとせば、 $E_2 = IR$ で、 E_2 と I とは同相である。而して E_3 は E_1, E_2 の和 (ベクトル和) であるから、之れ等の電圧電流間の関係は第 6-5 圖乙に示す如くなる。

乙圖から明かに、

$$E_3^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \phi$$

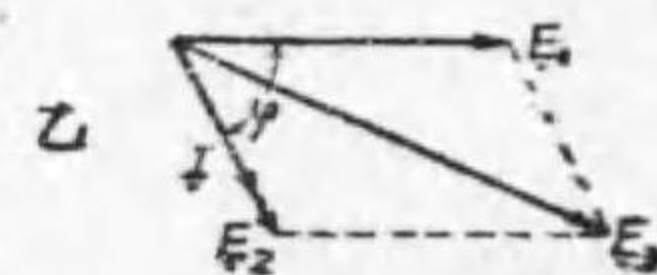
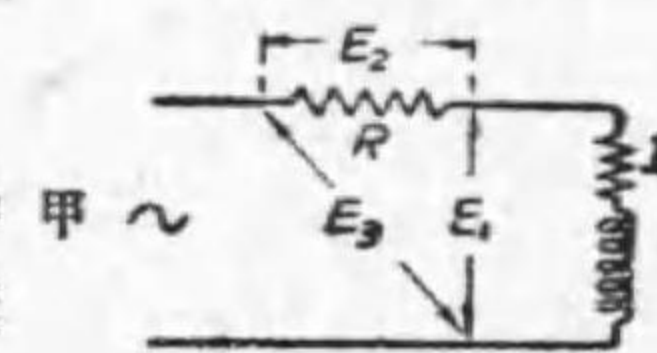
$$\therefore E_1E_2 \cos \phi = \frac{1}{2}(E_3^2 - E_1^2 - E_2^2)$$

$$\therefore \text{交流電力 } P = E_1I \cos \phi = E_1 \frac{E_2}{R} \cos \phi = \frac{1}{2R}(E_3^2 - E_1^2 - E_2^2)$$

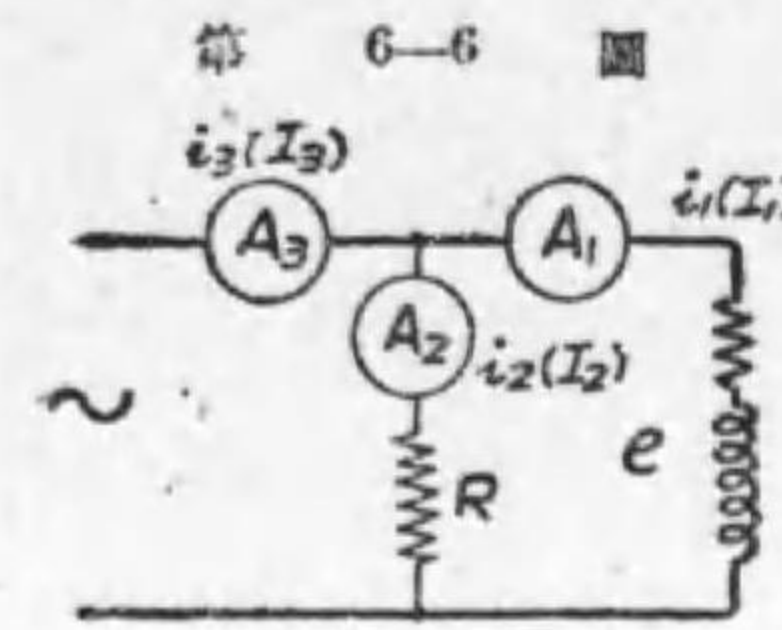
(□) 三電流計法 無誘導抵抗 R を負荷と並列に接続し、三個の交流電流計 A_1, A_2, A_3 を第 6-6 圖の如く接続する。

各電流計 A_1, A_2, A_3 に通ずる電流の實効値即ち読みを夫々 I_1, I_2, I_3 とし、之れ等の瞬時値を夫々 i_1, i_2, i_3 とし、又負荷電流の瞬時値を e (その實効値を

第 6-5 圖



正弦波交流の場合の説明圖



三電流計法

第 6-6 圖 E) とせば、

$$i_3 = i_1 + i_2, \quad \therefore i_3^2 = i_1^2 + i_2^2 + 2i_1i_2$$

$$\therefore i_1i_2 = \frac{1}{2}(i_3^2 - i_1^2 - i_2^2)$$

$$\text{又 } e = i_2R$$

$$\therefore \text{瞬時電力 } p = e i_1 = R i_1 i_2 = \frac{R}{2}(i_3^2 - i_1^2 - i_2^2)$$

$$\therefore \text{負荷電力 } P = (p \text{ の一周期間の平均})$$

$$= \frac{R}{2}(I_3^2 - I_1^2 - I_2^2)$$

即ち各電流計の読み I_1, I_2, I_3 を上式に代入して負荷電力 P は算出される。

【註】 正弦波交流の場合には、上の関係式は又之れを電圧及び電流のベクトル圖

からも導き出される。(第 6-7 圖参照)。負荷電流 I_1 がその電圧 E より ϕ だけ遅れ居るものとする。 E は I_2R に等しく、 I_2 と同相である。而して I_3 は I_1 と I_2 との和 (ベクトル和) であるから、乙圖から

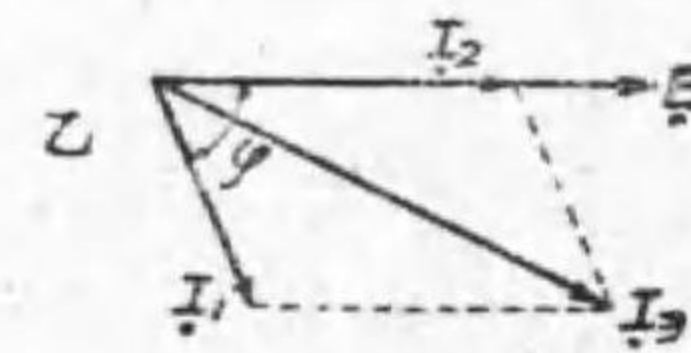
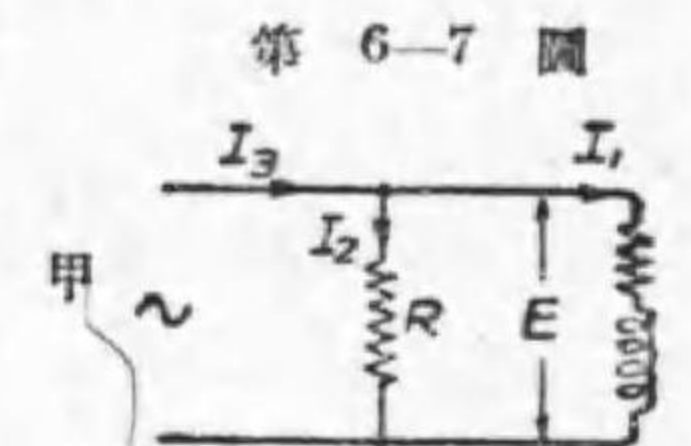
$$I_3^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2 \cos \phi$$

$$\therefore I_1I_2 \cos \phi = \frac{1}{2}(I_3^2 - I_1^2 - I_2^2)$$

$$\text{又 } E = I_2R$$

$$\therefore \text{電力 } P = E I_1 \cos \phi = I_2 R I_1 \cos \phi$$

$$= \frac{R}{2}(I_3^2 - I_1^2 - I_2^2)$$

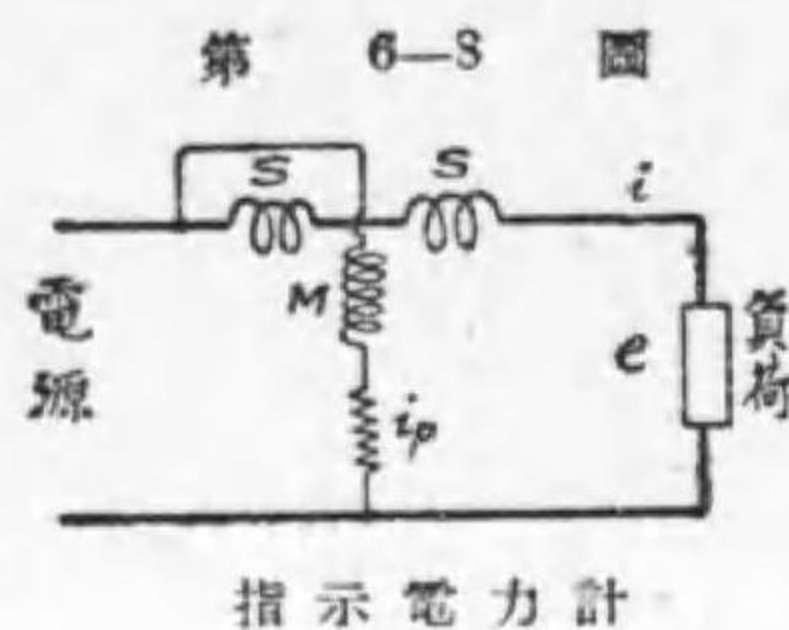


正弦波交流の場合の説明圖

三電圧計法及び三電流計法は負荷の力率が悪い程誤差が大になる。而して(イ)三電圧計法では V_1, V_2 の読みが相等しい場合に、又(ロ)三電流計法では A_1, A_2 の読みが相等しい場合に誤差は最も小である。(此の理論は茲には省略する。)

3. 指示電力計構成の原理

電力を直接測るには、直流電力でも交流電力でも電力計を用ひる。茲に直流交流兩用の電流力計型計器を指示電力計と成し得る原理を概説しよう。第 6-8 圖の様に、電流



力計型計器の固定線輪 S に負荷電流を通じ、又可動線輪 M には負荷電圧を與へる様に接続すれば、 M には電圧に比例する電流通じ、電流力作用によつて可動線輪に駆動トルクを生ずる。

今、 e =負荷電圧の瞬時値、 i =負荷電流の瞬時値、
 i_p =可動線輪に通ずる電流の瞬時値、 R_p =可動線輪回路の全抵抗、
 とせば、 S の抵抗及び M のインダクタンスを無視すれば、

$$i_p = \frac{e}{R_p} \quad \text{負荷の瞬時電力 } p = ei$$

$$\text{又可動線輪 } M \text{ に働く瞬時駆動トルク } \delta = k i_p i = \frac{k}{R_p} e i = \frac{k}{R_p} p \\ = K p \quad (1)$$

即ち、瞬時駆動トルク δ は瞬時電力 p に比例する。

若し回路が直流回路ならば、電圧電流等は一定値であるから (1) 式は一定値になり、可動線輪に働くトルクは電力に比例する事が簡単に判る。

次に回路が交流回路なる場合は如何と云ふに、瞬時駆動トルク δ は瞬時電力 p に比例して變化するが、可動線輪は慣性を有するから此の變化に追隨して運動し得ずして、實際には交流の一周期間の平均によつてトルクを生ずるものである。此の可動線輪に働く平均駆動トルクを D とせば、

$$D = (\delta \text{ の一周期間の平均}) = K \times (p \text{ の一周期間の平均}) \\ = K \times (\text{交流電力})$$

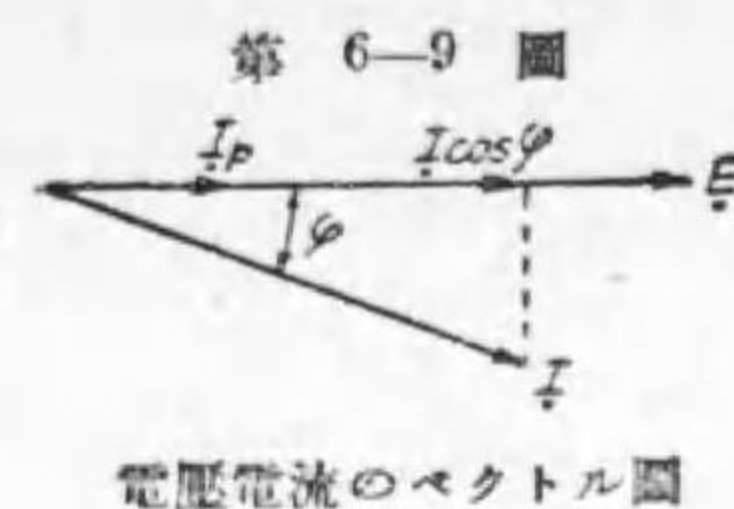
即ち交流の場合でも、可動線輪に働く駆動トルクは交流電力に比例する。

【註】 尚ほ正弦波交流の場合として、ベクトル圖で説明すれば次の様になる。

$$E = \text{電圧の実効値}, I = \text{負荷電流の実効値}, \phi = \text{電圧電流間の相差}$$

I_p =電圧線輪の電流の実効値 $= \frac{E}{R_p}$ 、〔但し電圧線輪回路は抵抗 R_p のみとす〕

とせば、第 6-9 圖に示すベクトル圖を得る。従つて電圧線輪電流 I_p と電流線輪電流 I とは ϕ 丈の相差があるから、可動線輪には、 I_p と、 I の I_p に同相なる有効分 $I \cos \phi$ との積に比例する電流力の爲に駆動トルクを生ずる。



$$\text{駆動トルク } D = k I_p I \cos \phi = k \frac{E}{R_p} I \cos \phi \\ = K E I \cos \phi$$

即ち D は交流電力 $P = E I \cos \phi$ に比例する。

斯様に、直流の場合でも交流の場合でも、トルク D は電力 P に比例する。

$$D = K P \quad (2)$$

従つて制御彈條の制御トルクを T とせば、之れは其の時の指針の傾斜角 θ に比例するから、 $T = K' \theta$ (3)

此の兩トルクが平衡して指針は θ 角を爲して靜止するから、 $K P = K' \theta$

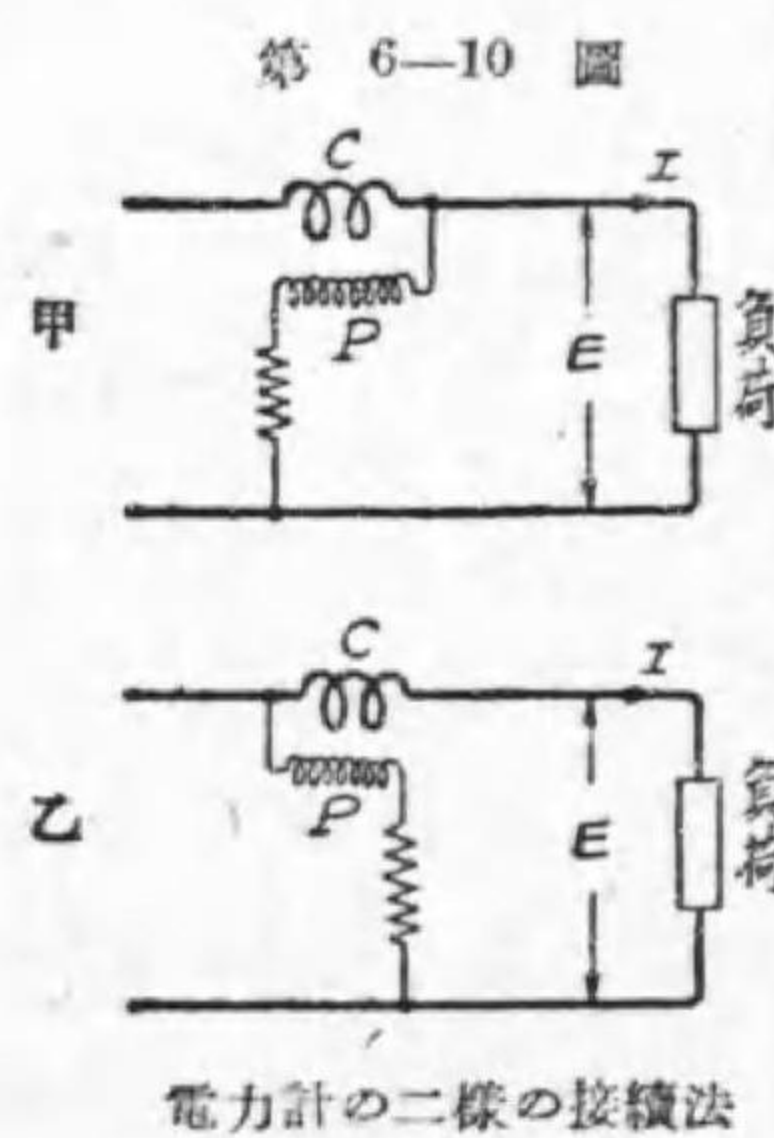
$$\therefore P = \frac{K'}{K} \theta \quad \text{又は、} \theta = \frac{K}{K'} P \quad (4)$$

従つて目盛盤上に電力値 (ワット) を目盛つておけば指示電力計が出来る譯である。以上は概略の理論であつて、而もトルクが S, M 兩線輪の相互位置にも關係する事を考へに入れてない爲め (4) の如く平等目盛の式が得られたが、實際には目盛は全く平等とはならず中央部に於て目盛の間隔が幾分か廣くなる。

電力計に於て、線輪 M の如く電圧に比例する電流を通ずる線輪を電壓

線輪 (pressure coil) と稱し、又線輪 S の如く負荷電流 (又は之れに比例する電流) を通ずる線輪を電流線輪 (current coil) と稱する。時には又前者を分巻線輪 (shunt coil), 後者を直巻線輪 (series coil) とも稱する。電圧線輪と電流線輪の一组を電力計の素子 (element) と稱する事がある。電力計には電流計型, 誘導型の外に熱型, 静電型電力計等もあるが茲には前二者を説明する。

4. 指示電力計の接続法 前節には電力計の概略の



理論を述べたが、電力計には電圧線輪と電流線輪とがあるから、電力計で負荷電力を測定する場合には丁度第 6-1 圖に示したと同様に、二様の接続法がある。第 6-10 圖甲は電圧線輪 P を負荷に近く接続した場合で、乙圖は電流線輪 C を負荷に近く接続した場合である。今 E, I を夫々負荷の電圧, 電流とし、電圧線輪回路の抵抗を R_p とし、又電流線輪の抵抗を R_c とせば、

甲圖の場合は、

$$\begin{aligned} \text{電力計の讀} &= E \left(I + \frac{E}{R_p} \right) \\ &= EI + \frac{E^2}{R_p} = (\text{負荷電力}) + (\text{電圧線輪の損失電力}), \end{aligned}$$

乙圖の場合は、

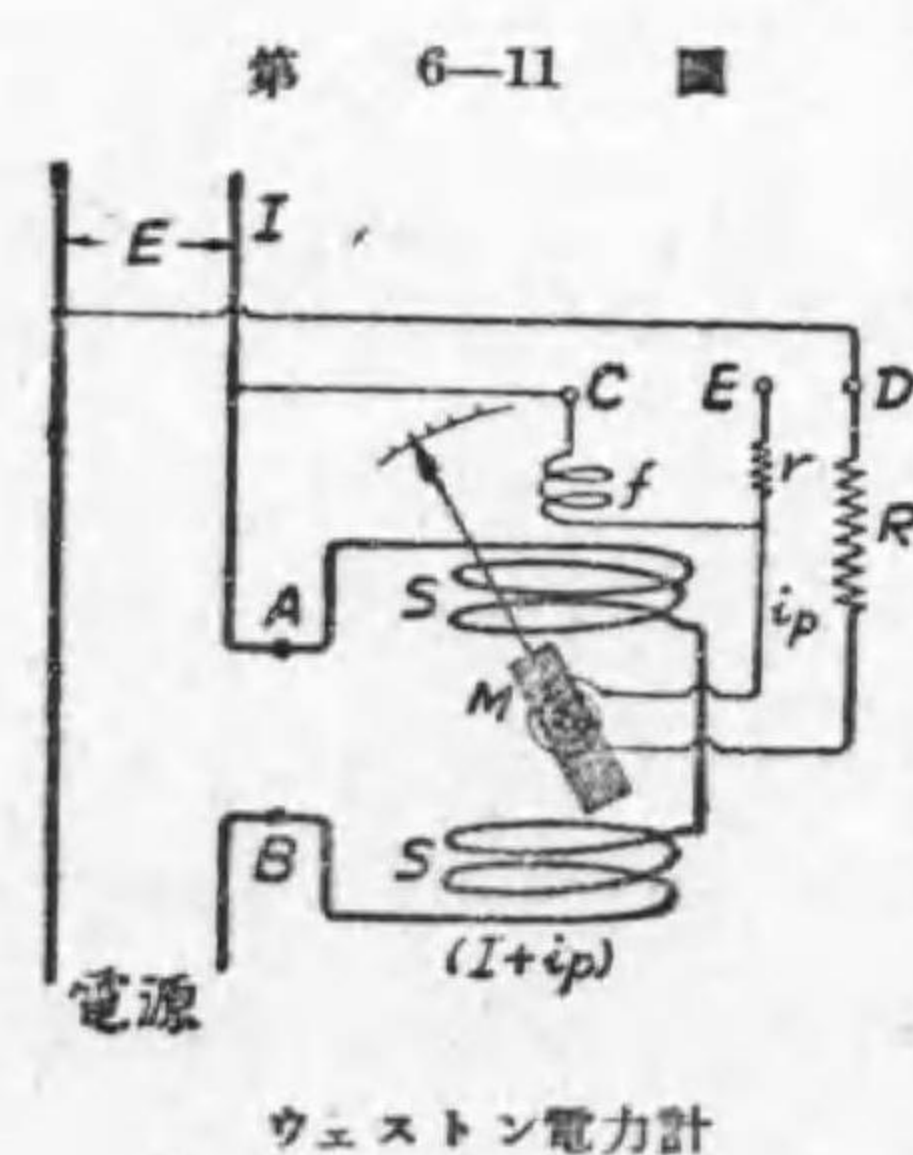
$$\begin{aligned} \text{電力計の讀} &= (E + IR_c) I \\ &= EI + I^2 R_c \end{aligned}$$

$$= (\text{負荷電力}) + (\text{電流線輪の損失電力}),$$

即ち、一般に電力計の讀みは負荷電力と負荷に近く接続された線輪内の損失電力との和を示すと云ふ結論になる。以上は直流の場合の説明であるが、交流の場合にも同じ結論になるのである。

従つて電力計の讀みが直接負荷電力を指示する様に特殊の補償装置を施す必要がある。若し補償装置を施してない電力計ならば、電圧線輪の損失を極小に設計した電力計ならば甲圖の接続にして使用すれば、その指示を負荷電力として實用上差支へない。又電流線輪損失を極小に設計した電力計ならば乙圖の接続にして使用すれば、その指示を負荷電力として實用上差支へないのである。此の事は負荷電力が線輪損失電力に比し大なる程誤差は小である。最近の設計では前者の電力計が多い。

電力計の指示が直接負荷電力を示す様にする爲の補償装置を有する電力計を説明しよう。第 6-11 圖はウェストン電流計型電力計であつて、 S



が固定せる電流線輪で A, B がその端子、 M が可動電圧線輪で、之れに直列に接続された f なる補償線輪があつて C, D がその電圧端子で、負荷に近く接続され、電圧に適應した直列抵抗 R が接続されて居る。固定、可動兩線輪の配置、制御彈條及び制動装置等は同型の電圧計、電流計等と同様である。補償線輪 f は電流線輪 S と同軸上に固定されて居る。

今無負荷の場合を考えると、若し f 線輪が無いならば、 S と M とに

は同一値の電流が通ずるから、 M にはトルクを生じ指針を傾斜せしめるから、補償線輪を設けて此の場合に f により M の位置に生ずる磁界が、 S によつて M の位置に生ずる磁界と大き等しく方向が互に反対になる様に f 線輪を設計して置く。そうすると無負荷の場合には M に働く f 及び S の電流力は相等しく互に反対であるから相殺されて M にはトルクを生じないで指針は零を指す譯である。又負荷が有る場合は指針は直接負荷の電力を指示する事になる。何故なれば、負荷の電圧、電流を夫々 E , I とし、電圧線輪回路の電流を i_p とせば、 S 線輪の電流は $I+i_p$ となる。 M に働く電流力は、 M と S との電流力 $i_p(I+i_p)$ と M と f との電流力 $i_p I$ との差即ち $i_p I$ に比例する。 i_p は電圧 E に比例するから、結局 M に働くトルクは EI 即ち電力に比例するから、指針は負荷電力を指示する譯である。

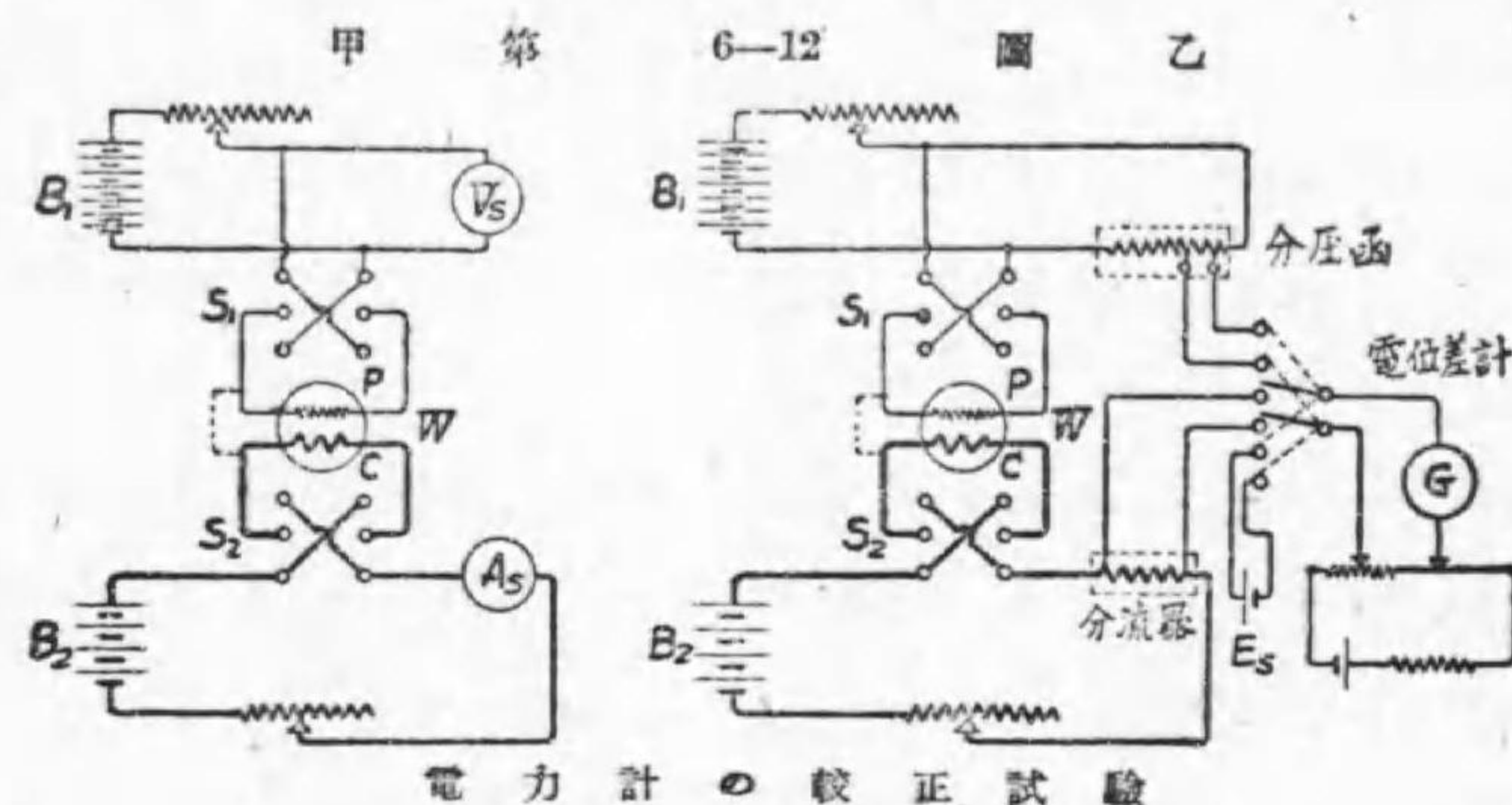
以上は直流の場合の説明であるが、交流の場合でも上と同様に説明する事が出来る。只交流の場合は以上の説明が瞬時に就いて成立するから従つて交流の一周期間の平均を取れば、矢張り電力計は負荷電力を指示する譯である。此の電力計は交流負荷の力率が非常に小なる場合に使用するに適する。

尚ほ此の電力計では電圧線輪の端子として別に E なる端子があるが、後節に述べる様に之れを較正する場合に用ふるものである。(即ち較正の時は C, D 端子の代りに E, D 端子を用ひる)。此の E 端子を獨立端子 (independent terminal) と稱して居る。此の E には、 f 線輪の抵抗と等しい値を有する抵抗 r を接続してある。

5. 電力計の較正試験

電力計の較正には之れに負荷を掛けて電位差計を用ひて試験する事が出来るが、電力の經濟及び電圧電流調整の容易なる點から、實際の負荷を用ひずに電圧線輪及び電流線輪に別々の電源を用ひる方がよいのである。

第6—12圖甲は電力計 W の較正試験の接続圖である。 P なる電圧線輪



電力計の較正試験

回路 (例へば第6—11圖の電力計ならば D, E 端子) に蓄電池 B_1 から電圧を與へ、又 C なる電流線輪 (例へば第6—11圖の電力計の A, B 端子) に他の蓄電池 B_2 から電流を供給する。電圧線輪 P に與へられる電圧を測る爲め標準電圧計 V_s を用ひ、又電流線輪 C に通る電流を測る爲め標準電流計 A_s を用ひる。若し電位差計を使用すれば乙圖の様に夫々分圧函、分流器を用ひて電圧、電流を測ればよいのである。電圧線輪に與へる電圧は高いがその電流は小であるから、電源 B_1 の容量は小なるものでよく又電流線輪の抵抗は小で電流が大であるから、その電源 B_2 の容量は大なるものを用ひればよい。例へば、100 V, 100 A の電力計を試験する

には、 B_1 は 110 V の電圧、又電圧計 V_s 及び電力計の電圧線輪に流れる電流は約 0.05 アムペア位とする。又 B_2 は電圧は 10 V で、電流 100 A を供給するから、此の装置で試験に要する電力は B_1, B_2 全部で、

$$110V \times 0.05A + 10V \times 100A = 1005.5 \text{ ワット} = 1.0055 \text{ キロワット}$$

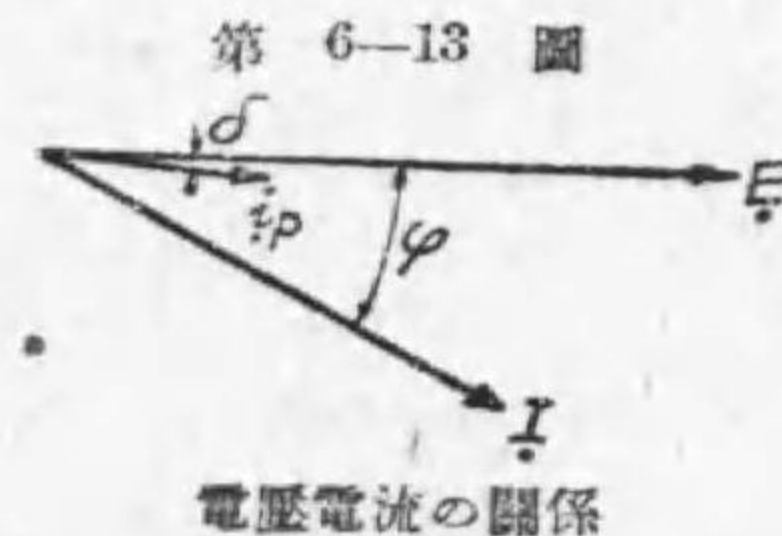
である。然るに若し此の電力計を上の方法によらずに実際の負荷を接続して校正すると、 $100V \times 100A = 10000 \text{ ワット} = 10 \text{ キロワット}$ の電力を要する事になる。従つて此の方法が電力の経済である事が判る。尚ほ此の方法に依れば、上の電圧回路と下の電流回路とが別々に獨立に夫々電圧、電流を調整し得る利點がある。

電流計型計器は電流線輪の作る磁界は強くない。故に遮磁壁を用ひてないものでは地球磁界其の他の外部磁界の影響を受けるから、電圧電流の方向を同時に反對にして二回の測定を行ひ其の平均を取る必要がある。圖中の S_1 及び S_2 なる切替開閉器は此の爲に装置されたものである。即ち同型の電圧計や電流計の校正と同様に、電力計 W の指針が丁度試験すべきその目盛に一致する様に電圧電流を調整し V_s, A_s の読みを取り、次に切替開閉器に依つて電圧電流を反對に W に與へて、前と同一の目盛に一致する様にした時の V_s, A_s の読みを取り、初めの電力値と後の電力値との平均を取り眞の電力とすべきである。尚ほ電力計の電圧線輪と電流線輪とを點線で示す様に一端に於て接続し同電位に保ち靜電的影響を防ぐのがよい。電力計の各目盛に就いて試験し、計器の読みに對する更正值又は更正率の表か又は校正曲線を作つて置けば使用に際し便利である。

6. 電流計型電力計の特性 電流計型電力計

は前節に述べた様に直流を以つて校正試験を行ひ、之れを交流回路に使用しても負荷力率が大きなる場合は實用上大なる誤差を生じない。然し力率が低い回路程誤差は大になつて來るものである。次に之れを正弦波交流の場合に就いて説明しよう。

電圧線輪回路は抵抗 (之れを R_p とする) が大であるが幾分か自己インダクタンス (之れを L とする) を有する。尚ほ電圧線輪と電流線輪との相互インダクタンスもあるが、その影響は極僅かであるから之れは閑却する事が出来る。仍つて電圧線輪の自己インダクタンスによる誤差を考へる。負荷の電圧電流を夫々 E, I とし電流が φ だけ遅れ居るものとせば、負荷電力は勿論 $EI \cos \varphi$ ワットである。電圧線輪回路は E なる電圧を受け、之れに通ずる電流 i_p は電圧回路のインピーダンスで電圧 E を割つた値で、位相は電圧より幾分か遅れる。インダクタンス L が抵抗 R_p に比し非常に小であれば、電圧線輪回路のインピーダンスは殆んど抵抗 R_p に等しいとする事が出来るから、 i_p の値は直流回路に使用した時の電圧線輪に流れる電流と殆んど等しいと見做しても差支へがないのである。然るに i_p の位相は E より幾分か遅れるから、その爲に誤差を生ずる。今交流の周波数を f とし、 E と i_p との相差を δ とせば、 $\tan \delta = \frac{\omega L}{R_p}$ なる關係がある。但し $\omega = 2\pi f$ である。第 6-13 圖は之れ等のベクトル關係を示すものである。従つて i_p と I とは $(\varphi - \delta)$ だけの相差がある。故に電圧電流兩線輪の電流力は $i_p \times I \times \cos(\varphi - \delta)$ に比例する。 i_p は E に比例するから、電力計の讀は $E \times I \times \cos(\varphi - \delta)$ ワットである。従つて此の電力計の誤差 (ϵ) 及び更正率 (α)



は次式で表はされる。

$$\begin{aligned} \text{誤差 } \varepsilon &= \frac{(\text{電力計の讀}) - (\text{眞値})}{(\text{眞値})} \\ &= \frac{EI \cos(\varphi - \delta) - EI \cos \varphi}{EI \cos \varphi} = \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\cos \varphi} - 1 \quad (イ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{更正率 } \alpha &= \frac{(\text{眞値}) - (\text{電力計の讀})}{(\text{電力計の讀})} \\ &= \frac{EI \cos \varphi - EI \cos(\varphi - \delta)}{EI \cos(\varphi - \delta)} = \frac{\cos \varphi}{\cos(\varphi - \delta)} - 1 \quad (ロ) \end{aligned}$$

茲に誤差 ε の略式を導き出して見よう。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\cos(\varphi - \delta)}{\cos \varphi} - 1 = \frac{\cos \varphi \cos \delta + \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi} - 1 \\ &= \cos \delta + \tan \varphi \sin \delta - 1 \end{aligned}$$

δ は極小なる角であるから、 $\cos \delta \doteq 1$ 、 $\sin \delta \doteq \tan \delta$ とする事が出来るから、

$$\begin{aligned} \varepsilon &\doteq 1 + \tan \varphi \tan \delta - 1 = \tan \varphi \tan \delta = \frac{\omega L}{R_p} \tan \varphi \\ &= \frac{2\pi f L}{R_p} \tan \varphi \quad (イ') \end{aligned}$$

此の式から判る様に、 φ が大なる程 $\tan \varphi$ 従つて ε が大になる。即ち力率が小なる程誤差は大になる。若し $f=50$ サイクル、 $L=0.005$ ヘンリー、 $R_p=3333$ オームならば、 $\varepsilon = \frac{2\pi \times 50 \times 0.005}{3333} \tan \varphi \doteq 0.0005 \tan \varphi$ となる。

又更正率 α の略式は次の様になる。

$$\alpha \doteq -\frac{2\pi f L}{R_p} \tan \varphi \quad (ロ')$$

以上は負荷が遅れ電流の場合を考へたが、若し負荷電流が電圧より φ

だけ進んで居る場合は、遅れが $(+\varphi)$ だとすれば、進みは $(-\varphi)$ だけの遅れと考へてよいから上に得た式で、 φ の代りに $(-\varphi)$ と置けばよい。さうして、 $\tan(-\varphi) = -\tan \varphi$ であるから、電流が電圧より φ だけ進んだ場合の誤差 ε 及び更正率 α は次の様になる。

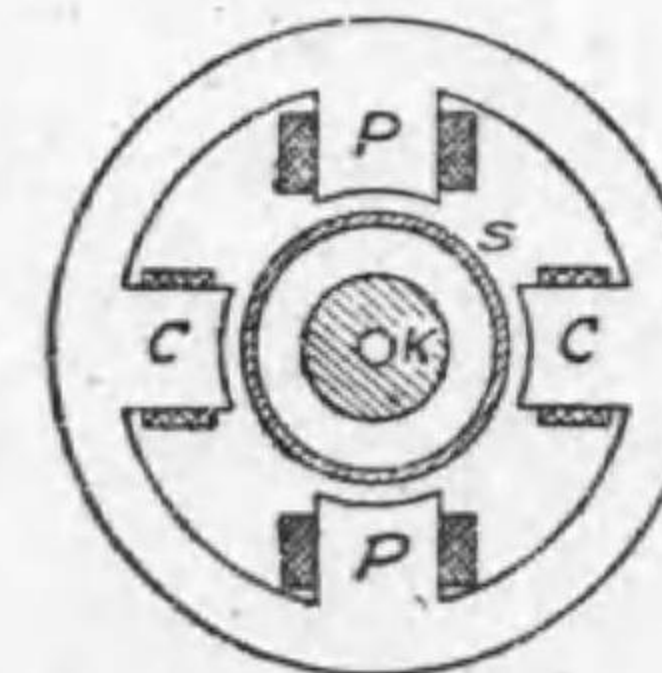
$$\varepsilon = -\frac{2\pi f L}{R_p} \tan \varphi, \quad \alpha = \frac{2\pi f L}{R_p} \tan \varphi$$

以上の外、電流力計型電力計の誤差の生ずる原因となるものは、同型電圧計電流計と同様外部磁界及び温度の影響である。温度の影響は、電圧線輪に直列にマンガニン抵抗が接続されて居るから、極小にすることが出来る。又直流に使用する際は地球磁界の影響があるから、之れを直流に用ひる場合又は直流で較正する場合には前節に述べた様に電圧線輪及び電流線輪の電流の方向を同時に反対にして二回の測定をなしその平均を取るべきである。又交流回路に使用の際は、周囲に同一周波数の外部交番磁界がない様に注意すべきである。電力計の動作部分を遮磁壁で以つて包圍した計器では外部磁界の影響は殆んど無い。

7. 誘導型電力計

誘導型電力計の例としてフェラリス型

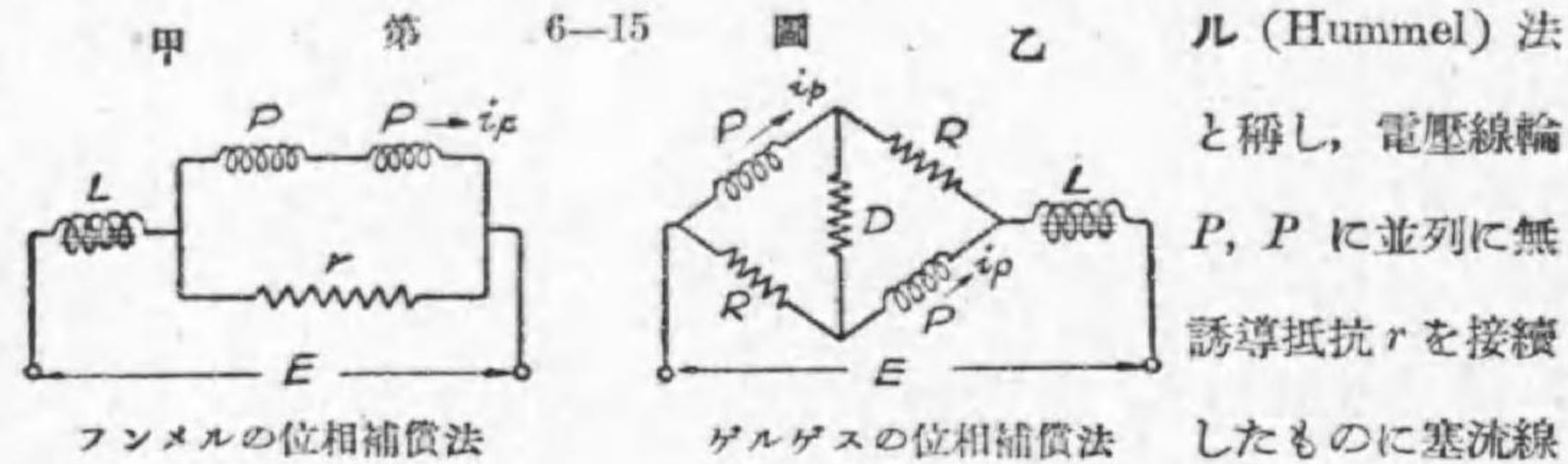
第 6-14 圖



誘導型電力計

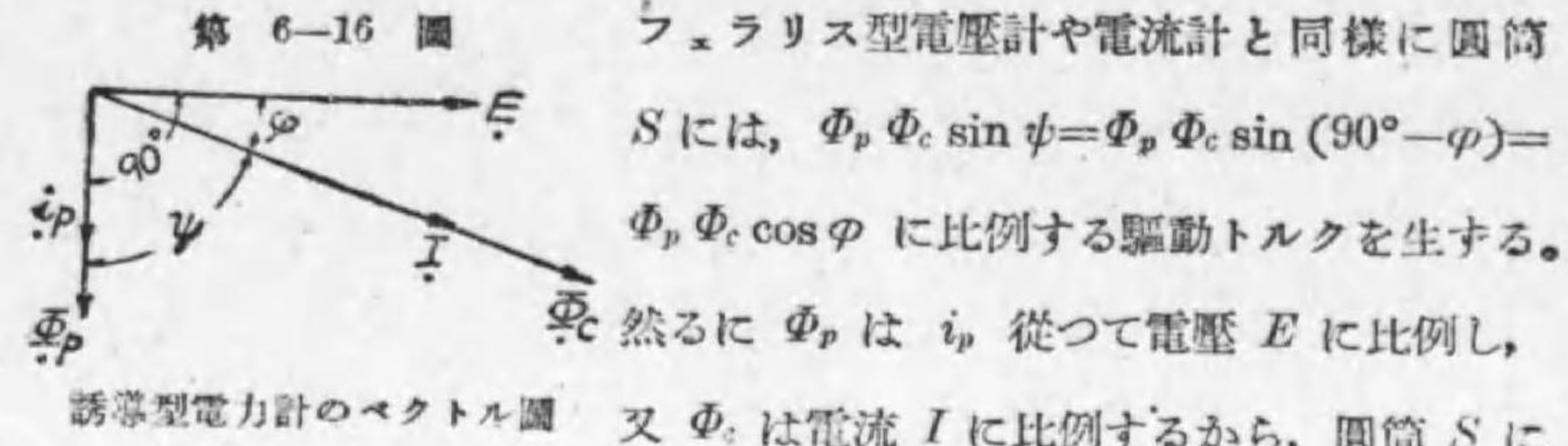
電力計を説明しよう。第 6-14 圖はフェラリス電力計を示す。之れは同型の電圧計、電流計等と同様の構造配置であるが、只線輪の接続法を變更したものである。 C, C は電流線輪で太い電線を巻数少くし、 P, P は電圧線輪で細い電線を巻数多くしてある。 S はアルミニウム圓筒で、 K は成層鐵心である。

電流線輪 C, C は負荷電流を通すが、電圧線輪 P, P の接続は直接に電圧を受けさせないで、電圧線輪に通ずる電流をして負荷電圧より90度位相を遅れしめる工夫をしてある。此の様に電圧線輪の電流をして負荷電圧より90度遅れしむる爲の接続法を90度接続法又は一般に位相補償法 (phase compensation) と稱する。フェラリス電力計の電圧線輪の90度接続法としては第6-15圖甲及び乙の如き二つの方法がある。甲はフンメル (Hummel) 法



と稱し、電圧線輪 P, P に並列に無誘導抵抗 r を接続したものに塞流線輪 L を直列に接続して電圧を受けしめたもので、 r 及び塞流線輪の抵抗及びインダクタンスを適當に選び、電圧線輪の電流 i_p をして電圧 E から90度遅れしめる方法である。乙はゲルゲス (Görges) 法と稱し、電圧線輪 P, P 及び無誘導抵抗 R, R, D をブリッジ接続にして、之れに直列に塞流線輪 L を接続して負荷電圧 E を與へたもので、 R, D 及び塞流線輪の抵抗及びインダクタンスを適當に選び、電圧線輪の電流 i_p をして電圧 E から90度遅れしめる方法である。(90度接続法の理論の説明は省略する)。

フェラリス型電力計では電圧線輪 P, P は上述の甲又は乙の接続になつて居り、電流線輪 C, C は負荷に直列に接続されて居るから、負荷電流 i が電圧 E より φ だけ位相が遅れて居る場合には、電流線輪によつて生ずる磁束 Φ_c は電流 i と同相に生じ、又電圧線輪によつて生ずる磁束 Φ_p は電流 i_p と同相に生じ、第6-16圖に示すベクトル関係となる。従つて



フェラリス型電圧計や電流計と同様に圓筒 S には、 $\Phi_p \Phi_c \sin \psi = \Phi_p \Phi_c \sin (90^\circ - \varphi) = \Phi_p \Phi_c \cos \varphi$ に比例する駆動トルクを生ずる。然るに Φ_p は i_p 従つて電圧 E に比例し、 Φ_c は電流 I に比例するから、圓筒 S に働く駆動トルクは $E I \cos \varphi$ に比例する。即ち負荷の電力に比例するトルクを生ずるから、これが制御弾條の制御トルクと平衡して指針は目盛盤に電力を指示する譯である。制動装置は同型の電流計電圧計と同様に、二個の永久磁石を圓筒に作用せしめて渦流制動法を用ひてある。

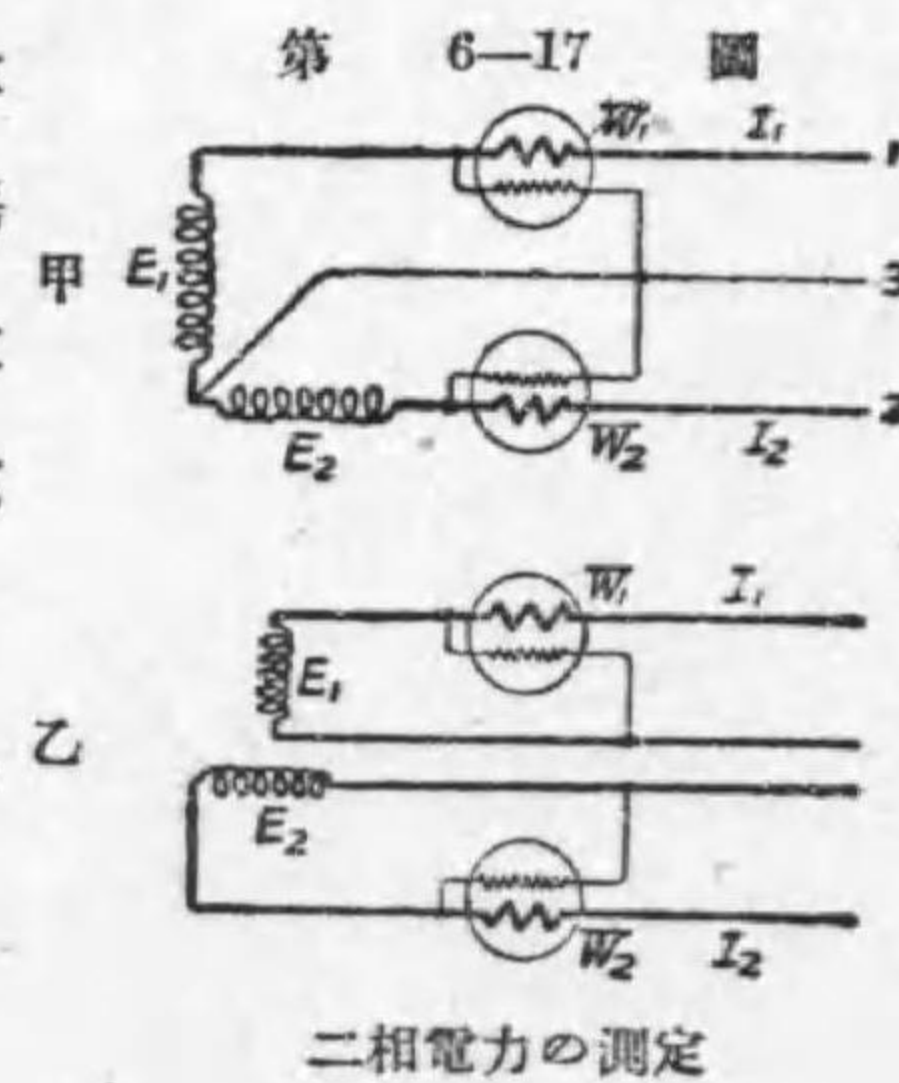
8. 多相電力の測定法

二相交流電力や三相交流電力の如き多相電力は、相数だけの数の單相用電力計を用ひて各相の電力を夫夫測定して、之れ等を加へ合はせば測定出来る譯である。

(イ)二相電力の測定 二相電力を測定するには、各相の電力を読むため二個の電力計 W_1 及び W_2 を各相に接続し、其の讀みの和を取ればよい。

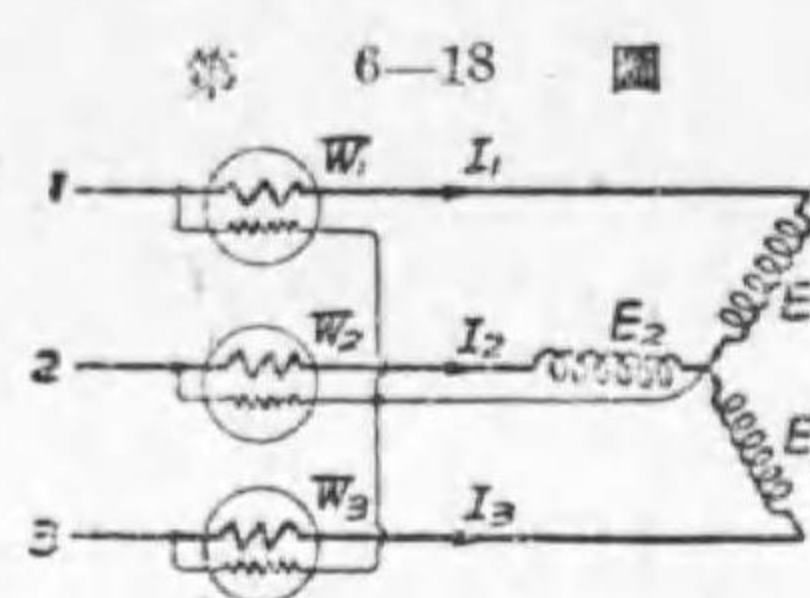
第6-17圖甲は二相三線式の場合、乙圖は二相四線式の場合の接続を示す。何れの場合も、第1相の電圧、電流及び其の間の位相差を夫々 E_1, I_1, φ_1 とし、第2相の電圧、電流及び其の間の相を夫々 E_2, I_2, φ_2 とせば、各電力計 W_1, W_2 の讀み P_1, P_2 は、

$$P_1 = E_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad P_2 = E_2 I_2 \cos \varphi_2$$



従つて二相電力は、 $P=P_1+P_2$ である。

(ロ)三相電力の測定 三相負荷の中性点を利用し得る場合は、三個の電



第 6-18 圖 中性点を利用し得る場合の三相電力の測定

力計 W_1, W_2, W_3 を第 6-18 圖の如く接続すれば、各電力計は夫々各相の電力を指示し、其の和が三相負荷電力である。

今 E_1, E_2, E_3 = 負荷の星形電圧

I_1, I_2, I_3 = 各相の電流

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ = 各相の電圧電流間の相差

とすれば、各相に接続された電力計 W_1, W_2, W_3 の読み P_1, P_2, P_3 は、

$$P_1 = E_1 I_1 \cos \varphi_1, P_2 = E_2 I_2 \cos \varphi_2, P_3 = E_3 I_3 \cos \varphi_3$$

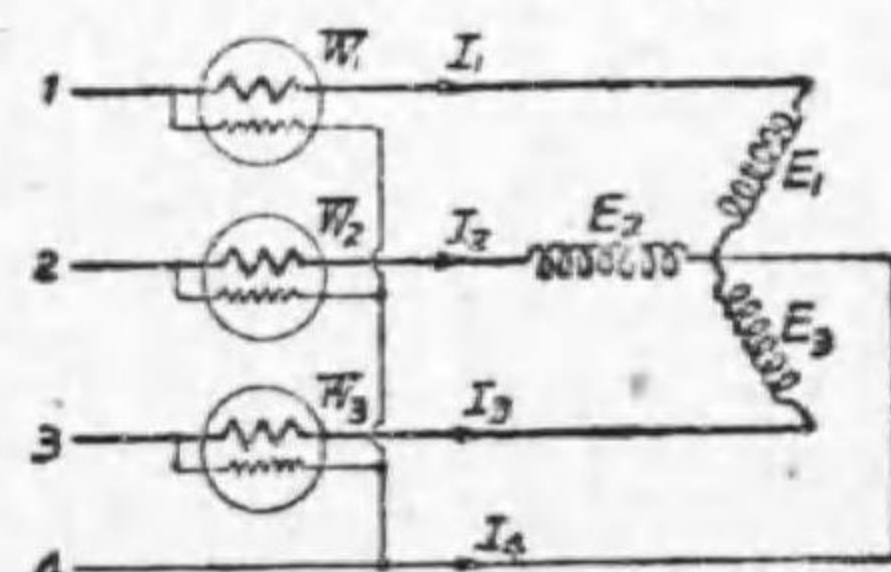
となるから、 $P_1+P_2+P_3$ が三相負荷の電力である。

第 6-19 圖の如き三相四線式回路の電

力を測る場合には、各電力計の電圧線輪を結べる共通点を必ずしも中性点に結ぶ必要なく、之れを中性線 4 に接続してよい譯である。何故なれば、各電力計は夫々電流線輪には各相の電流が通じ、又電

圧線輪は各相の電圧を受けて前の場合と全く同様になるからである。

第 6-19 圖



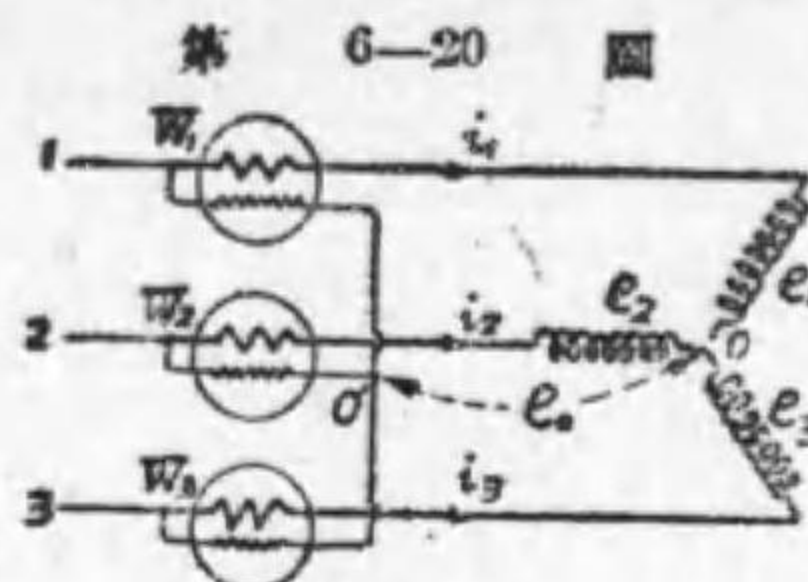
三相四線式回路の電力測定

9. 三相三線式回路の電力測定 前節(ロ)に述

べた三相三線式回路の電力測定法は、三相負荷の中性点を利用し得る場合の方法であつたが、中性点を利用し得られない場合の測定方法を茲に説明しよう。それには三個の電力計を用ひる三電力計法 (three-wattmeter

method) と二個の電力計を用ひる二電力計法 (two-wattmeter method) とがある。二電力計法は一名アロン法 (Aron's method) とも稱せられ普通に使用される方法である。

(イ)三電力計法 第 6-20 圖に示す様に、三個の電力計 W_1, W_2, W_3



三電力計法

を接続する。即ち各電力計の電流線輪は夫々各線に接続し、各電圧線輪の一端は夫々各線に他端は共通に結ぶ。即ち電圧線輪は O' を共通点として三線間に星形に接続される。斯

様に接続すれば、各電力計は各相の電力を指示しないが、之れ等三個の電力計の読みの和は三相電力となるのである。

次に之れを説明しよう。今、

e_1, e_2, e_3 = 負荷の各相の電圧の瞬時値、

$e_0 = O'O$ 間の電圧の瞬時値、

i_1, i_2, i_3 = 各相の電流の瞬時値、とせば、

$$\text{三相瞬時電力は、 } p = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 \quad (1)$$

O 點にキルヒホッフの第一法則を適用すれば、 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

$$\therefore e_0(i_1 + i_2 + i_3) = 0 \quad (2)$$

(1) 式より (2) 式を減じて、

$$\begin{aligned} p &= e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 - e_0(i_1 + i_2 + i_3) \\ &= (e_1 - e_0)i_1 + (e_2 - e_0)i_2 + (e_3 - e_0)i_3 \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式の右邊で、第一項の $(e_1 - e_0)$ は $O'O$ 間の電圧即ち W_1 の電圧線輪の受ける電圧の瞬時値で、 i_1 は W_1 の電流線輪の電流の瞬時値であるから、第 1 項 $(e_1 - e_0)i_1$ は W_1 に働く瞬時電力である。同様に第 2 項、第

3項は夫々 W_2, W_3 に働く瞬時電力である。即ち三相瞬時電力 p は W_1, W_2, W_3 に働く瞬時電力の和である。従つて、(3)式を交流の一周期間に平均すれば、次の結果を得る譯である。

$$\text{三相電力 } P = (W_1 \text{ の讀}) + (W_2 \text{ の讀}) + (W_3 \text{ の讀}) \quad (3')$$

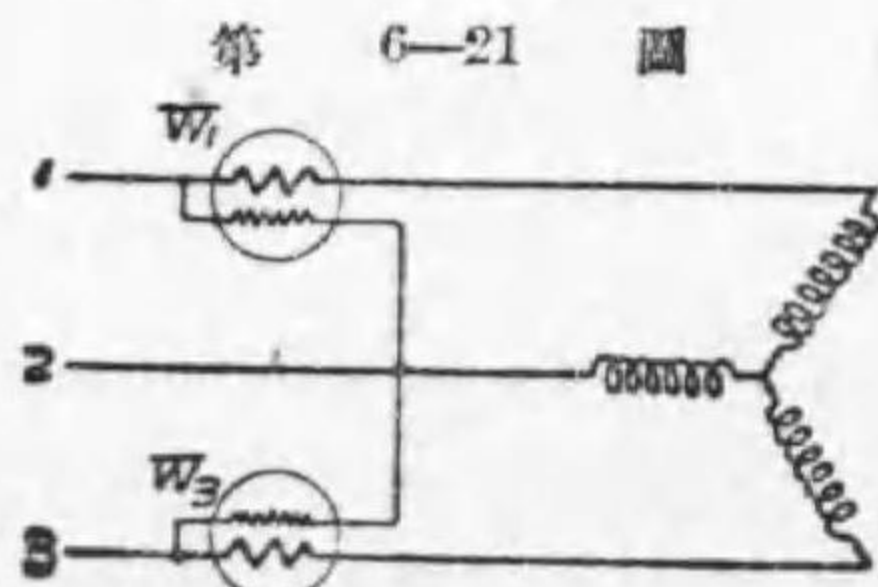
(ロ)二電力計法 今假りに第6-20圖に於て、各電力計の電壓線輪の共通點 O' を第2線に接続したとする。然らば此の場合の $O'O$ 間の電壓 e_0 は e_2 と等しいから、(3)式に於て、 $e_0 = e_2$ とおけば、次の結果を得る。

$$\begin{aligned} \text{三相瞬時電力 } p &= e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 \\ &= (e_1 - e_2) i_1 + (e_3 - e_2) i_3 \quad (4) \end{aligned}$$

(4)式の右邊に於ける第1項の $(e_1 - e_2)$ は1-2間即ち W_1 の電壓線輪の受ける瞬時電圧で i_1 は W_1 の電流線輪の瞬時電流であるから、第1項は W_1 に働く瞬時電力である。第2項の $(e_3 - e_2)$ は3-2間即ち W_3 の電壓線輪の受ける瞬時電圧で、 i_3 は W_3 の電流線輪の瞬時電流であるから、第2項は W_3 に働く瞬時電力である。従つて(4)式を一周期間につき平均すれば次の結果を得る。

$$\text{三相電力 } P = (W_1 \text{ の讀}) + (W_3 \text{ の讀}) \quad (4')$$

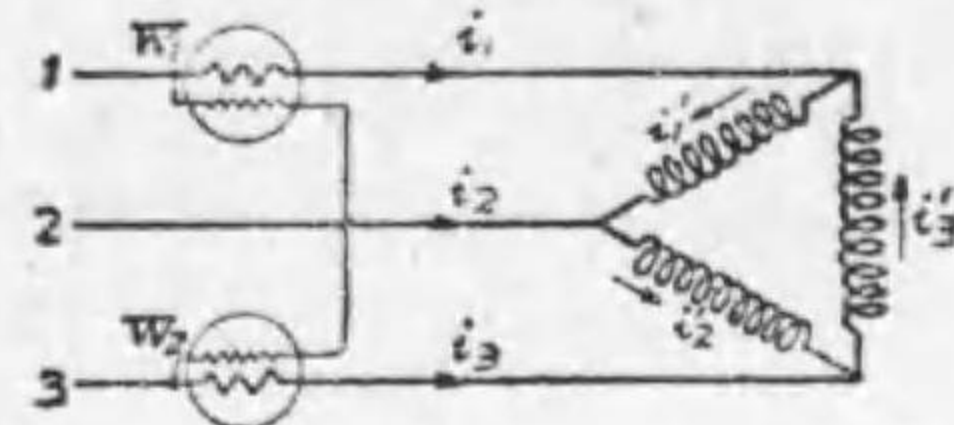
而して此の場合には、 W_2 なる電力計は勿論何等指示しないで不必要となるから、第6-21圖の如く二個の電力計を接続してその讀みの和を以つて三相電力が測定される譯である。



第 6-21 圖
二 電 力 計 法

以上は負荷が星形接続の場合に就いて説明したが、負荷が三角接続の場合でも電力計を同様に接続して三相電力を測り

第 6-22 圖



二 電 力 計 法

得る事は勿論である。例へば、第6-22圖に於て、第1,第2,第3線の電位の瞬時値を夫々 v_1, v_2, v_3 とし、 i_1', i_2', i_3' を夫々負荷電流の瞬時値とし、各線の電流の瞬時値を夫々 i_1, i_2, i_3 とせば、

$$i_1' = i_1 + i_3', \quad i_2' = i_2 - i_3'$$

$$\begin{aligned} \text{三相瞬時電力 } p &= (v_1 - v_2) i_1 + (v_2 - v_3) i_2 + (v_3 - v_1) i_3' \\ &= (v_1 - v_2)(i_1 + i_3') + (v_2 - v_3)(i_2 - i_3') + (v_3 - v_1) i_3' \\ &= (v_1 - v_2) i_1 + (v_3 - v_2) i_3 \\ &= (W_1 \text{ に働く瞬時電力}) + (W_2 \text{ に働く瞬時電力}) \end{aligned}$$

従つて三相電力は二個の電力計の指示の和に等しい。

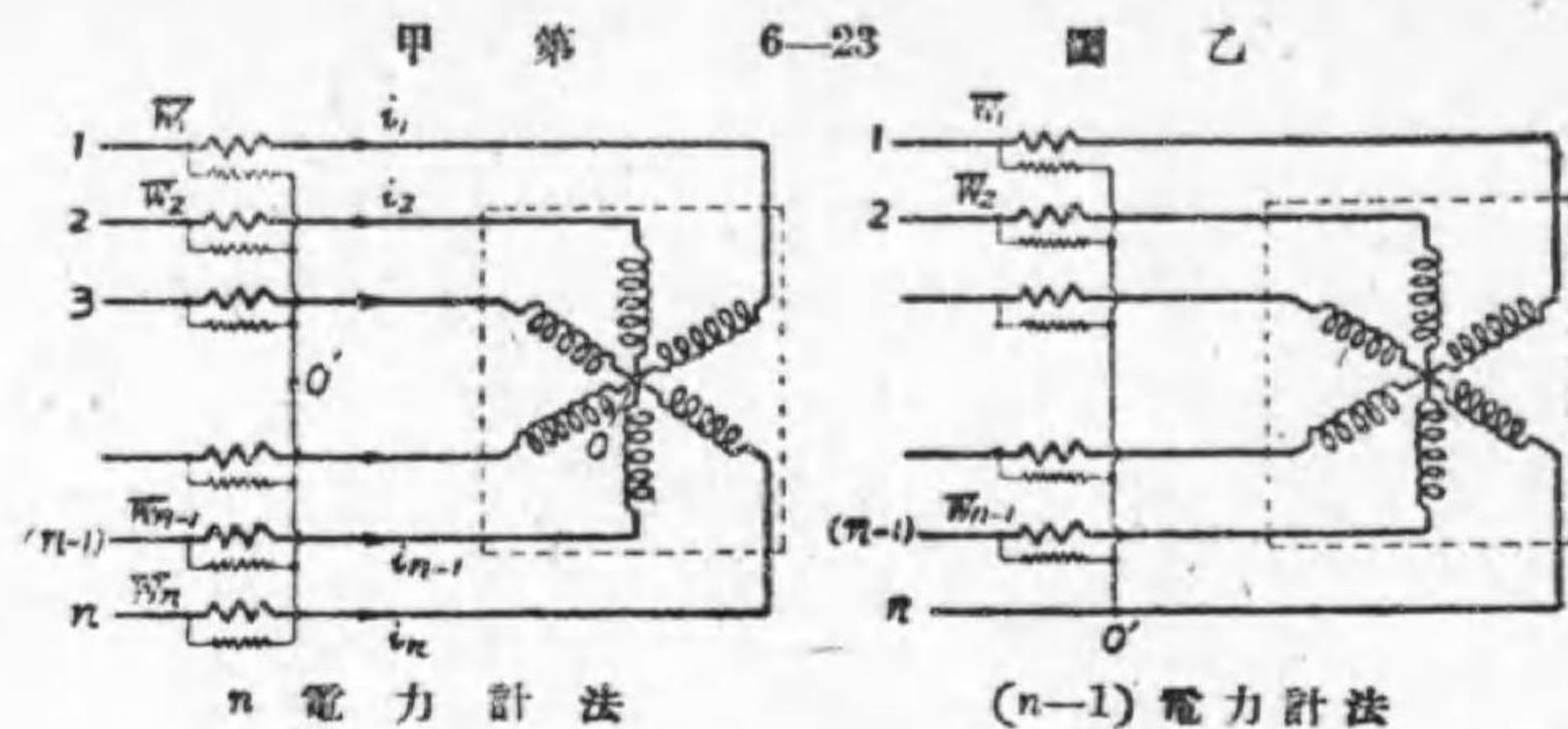
茲に注意すべき事は、各電力計の指示の和と云ふ事は一般に代數的和と云ふ事である。従つて各電力計を接続する場合、各電力計の電壓端子電流端子は、之れ等を單相回路に接続する場合の様に各電力計皆一様に接続し、而して共の中若し反方向に振れるものがあつたら、其の電力計の電壓線輪か又は電流線輪の内何れか一つの線輪の端子を元と反對に取り換へて接続し、其の電力計の讀みを負量として代數和を取るべきである。

10. ブロンデル氏定理

前節に於て、三相3線式負荷の電力は(3-1)個の單相電力計の指示の代數的和に依つて表はされる事を證明したが、之れを一般に擴張して、「結合 n 線式負荷の電力は $(n-1)$ 個の單相電力計の指示の代數的總和により表はされる。」と云ふ

Blondel's theorem) を茲に證明しよう。

今第6-23圖甲に示す結合 n 線式回路に、 n 個の電力計 W_1, W_2, \dots, W_n を接続するに、各電流線輪を各線に、各電圧線輪の一端子を各線に他の端子を共通の一点 O' に結ぶ。



$v_1, v_2, \dots, v_{n-1}, v_n =$ 第1, 第2, \dots , 第 $n-1$, 第 n 線の電位瞬時値,
 $v_0 = O'$ 點の電位瞬時値,

$i_1, i_2, \dots, i_{n-1}, i_n =$ 第1, 第2, \dots , 第 $n-1$, 第 n 線の電流瞬時値,
 とせば、第1線を通る電流は i_1 で、其の仕事の割合即ち電力の瞬時値は $v_1 i_1$ である。他の各線に就いても同様の事が云へる。故に n 個の線より負荷に供給される電力の瞬時値 p は、

$$p = v_1 i_1 + v_2 i_2 + \dots + v_{n-1} i_{n-1} + v_n i_n \quad (1)$$

然るに、 $i_1 + i_2 + \dots + i_{n-1} + i_n = 0$

$$\therefore v_0 (i_1 + i_2 + \dots + i_{n-1} + i_n) = 0 \quad (2)$$

(1) 式より (2) 式を減じて、

$$p = (v_1 - v_0) i_1 + (v_2 - v_0) i_2 + \dots + (v_{n-1} - v_0) i_{n-1} + (v_n - v_0) i_n \quad (3)$$

(3) 式の右邊の第一項は W_1 の電圧線輪の受ける電圧の瞬時値と其の電流線輪の電流の瞬時値との積即ち W_1 に働く瞬時電力である。以下同様に各項は夫々 W_2, \dots, W_n に働く瞬時電力である。従つて (3) 式を一周期に就き平均すれば、此の n 線式負荷の電力は n 個の電力計の讀みの和である事が判る。

若し共通結點 O' を n 線中の何れか一線例へば第 n 線につたとすれば、此の場合の O' の電位と云ふのは第 n 線の電位で、 $v_0 = v_n$ になるから、之れを (3) 式に代入して、

$$p = (v_1 - v_n) i_1 + (v_2 - v_n) i_2 + \dots + (v_{n-1} - v_n) i_{n-1} \quad (4)$$

$$= (W_1 \text{ に働く瞬時電力}) + \dots + (W_{n-1} \text{ に働く瞬時電力})$$

従つて此の式の一周期間の平均を取つて、次の結果を得る。

(結合 n 線式負荷の電力 P) = (W_1 の讀) + \dots + (W_{n-1} の讀)

即ち W_n の一個の電力計は不要となり乙圖の如く $(n-1)$ 個の電力計で負荷電力を測定し得る譯である。

茲に注意すべきは前節にも述べた通り、各電力計の讀みの和とは代数和であるから、逆に偏れた電力計の讀みは減すべきである。此の正負の混雜しない様にするには、各電力計の電圧及び電流端子には、電源から負荷に流れる電流の入る方の點を豫め符號を付けて置くがよい。それには電力計を單相交流回路に接続して見れば判るから、端子に符號を付けて置く。而して之れ等電力計を第6-23圖甲又は乙圖の如く接続する場合に、電源から負荷へ流れる電流が常に此の符號の付いた端子から入る様にする。斯様な接続をして、指針が目盛のしてある方向に偏れる電力計は正である。又

逆の方向に偏れる電力計は負であるから、その電圧線輪端子（或は電流線輪端子）を初めと逆に接続してその電力計の読みを負として取るべきである。實際は電圧線輪の極性を簡単に切換へる装置が設けてある。

尚ほ、 $(n-1)$ 電力計法は次の様に簡単に考へ得る。結合 n 線式に於て、第 n 線には他の $n-1$ 個の線の電流の和が負荷から電源へ歸へる、即ち第 n 線は共同歸線と考へられるから、乙圖の様に $(n-1)$ 個の電力計を接続すれば直ちに(4)式が得られ、従つて $(n-1)$ 個の電力計指針の代数和は負荷電力を示す事が判る。

前に述べた結合式諸回路の電力測定法は此のブロンデル定理の應用と見る事が出来る。即ち単相回路は2線式だから $2-1=1$ 個の電力計で、又二相3線式は $3-1=2$ 個の電力計で、又三相3線式も $3-1=2$ 個の電力計で、又三相4線式は $4-1=3$ 個の電力計で夫々電力を測定する事が出来る。

11. 二電力計法に依る平衡三相電力測定

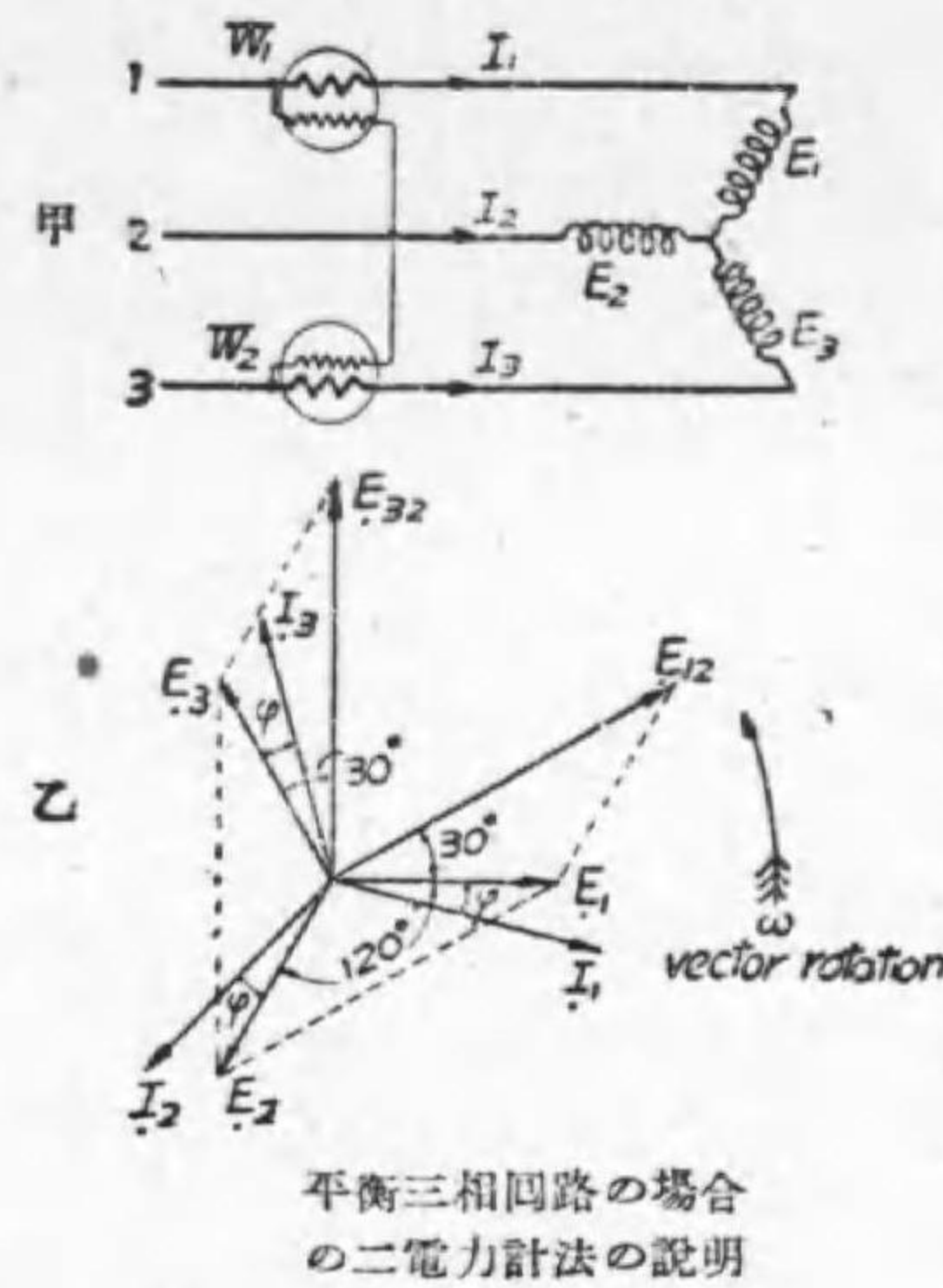
二電力計法の原理は廣く應用されるから、充分に理解して置かなければならぬ。其の一般の説明は第六章第8節に述べた通りであるが、正弦波交流電路に於ける平衡三相負荷の場合に之れをベクトル圖で説明すると、各電力計の指示の關係が一層判り良くなるから茲に説明しよう。第6-24圖甲に示す平衡三相負荷に於て、

E_1, E_2, E_3 = 各相の星形電壓(實効値), I_1, I_2, I_3 = 各相電流(實効値),

φ = 各相に於ける電流が電壓より遅れる相差角

とし、相順 (phase sequence) 即ち相回轉 (phase rotation) の順序が $E_1-E_2-E_3$ の順とすれば、之れ等のベクトルは乙圖の様になる。即ち負

第 6-24 圖



平衡三相回路の場合
の二電力計法の説明

荷は平衡せる故各電壓の値は等しく且つ120度宛の相差があり、又各電流の値は等しく且つ120度宛の相差がある。電力計 W_1 の電圧線輪は1-2間の電圧即ち $E_1 - E_2$ なるベクトル差 E_{12} なる電圧を受け、電流線輪には I_1 が通ずるから、 W_1 の読みは E_{12} と I_1 との生ずる電力である。然るに圖から明かなる通り、 E_{12} と E_1 とは相差 30° であるから、 E_{12} と I_1 とは $(30^\circ + \varphi)$ なる相差があり、 W_1 の指示電力 P_1 は $E_{12} I_1$

$\times \cos(30^\circ + \varphi)$ である。又電力計 W_2 の電圧線輪の受ける電圧は3-2間の電圧即ち $E_3 - E_2$ 即ち E_{32} で、電流線輪には I_3 が流れるから W_2 の読みは E_{32} と I_3 との生ずる電力である。然るに E_{32} と I_3 との相差は $(30^\circ - \varphi)$ であるから、 W_2 の指示電力 P_2 は $E_{32} I_3 \cos(30^\circ - \varphi)$ である。即ち W_1, W_2 の読みは夫々、

$$P_1 = E_{12} I_1 \cos(30^\circ + \varphi), \quad P_2 = E_{32} I_3 \cos(30^\circ - \varphi)$$

然るに負荷は平衡せる故、各電壓の値は等しく、各電流の値は等しいから、

$E_1 = E_2 = E_3 =$ 此の星形電壓の値を E とすると、

$E_{12} = E_{32} =$ 此の線間電壓の値を E' とせば $= \sqrt{3} E$ である。

$I_1 = I_2 = I_3 =$ 此の線電流の値を I とする。

之れ等の値を P_1, P_2 の式に代入すれば、

$$P_1 = E' I \cos(30^\circ + \varphi) \quad (イ)$$

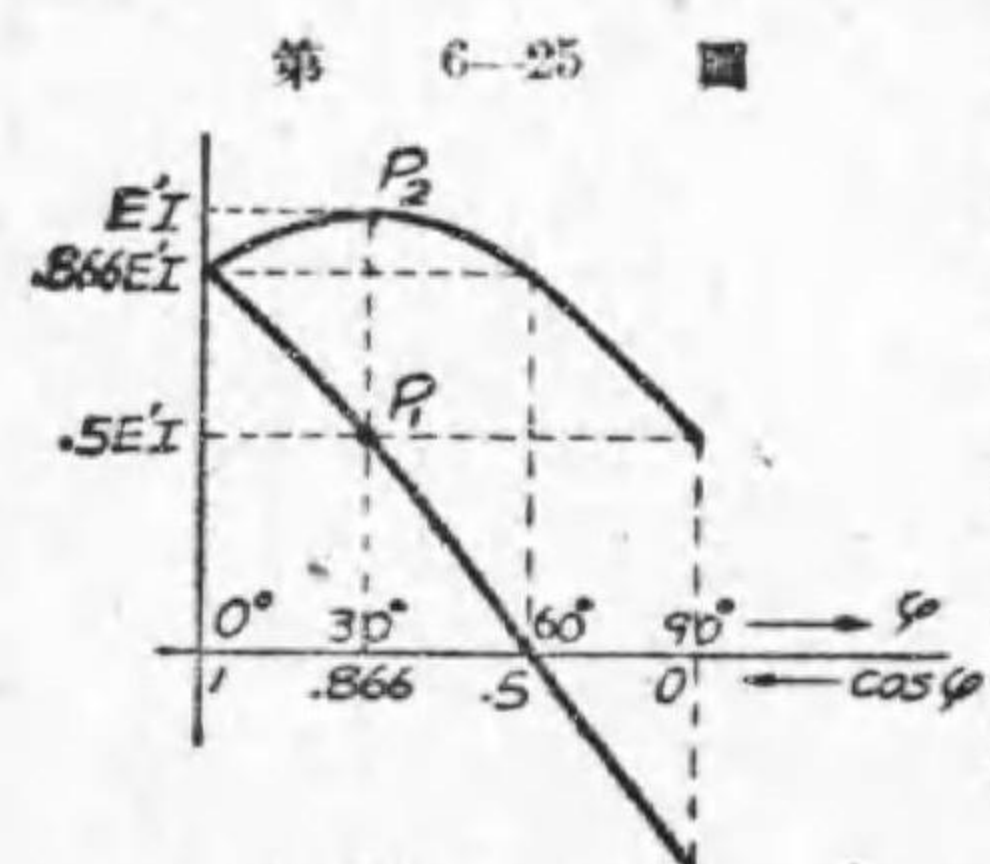
$$P_2 = E' I \cos(30^\circ - \varphi) \quad (ロ)$$

$$\begin{aligned} \therefore P_1 + P_2 &= E' I \{ \cos(30^\circ + \varphi) + \cos(30^\circ - \varphi) \} \\ &= E' I \times 2 \cos 30^\circ \cos \varphi = \sqrt{3} E' I \cos \varphi \quad (ハ) \end{aligned}$$

$$\text{又は, } P_1 + P_2 = 3E' I \cos \varphi \quad (ニ)$$

即ち、二個の電力計の読みの和 ($P_1 + P_2$) は三相電力 ($\sqrt{3} E' I \cos \varphi = 3E' I \cos \varphi$) に等しい。

次に各電力計の読み P_1, P_2 は (イ), (ロ) の式から明かに力率角 φ の値に応じて変化する。従つて P_1, P_2 は負荷の力率 $\cos \varphi$ に依りて変化する



第 6-25 圖 P_1, P_2 と φ の關係

事が判る。之れ等と φ 又は $\cos \varphi$ との關係をグラフに示すと第 6-25 圖のようになる。此の場合は P_2 は力率の如何に拘らず常に正であるが、 P_1 の値は力率が 0.5 以下は負である。即ち負荷の力率が 0.5 以下では W_1 は反對に偏れる事になるから、その電壓線輪の端子を反對に

接続して指針の偏れを正常にして其の時の W_1 の読み P_1 を負として取るべきである。即ち力率 0.5 以下では三相電力は $P_2 - P_1$ とすべきである。尚ほ第 6-25 圖より明かなる通り、力率が 1 即ち 100% の場合は二つの電力計の読みは相等しく、又力率が 0.866 即ち 86.6% の場合は、 W_1 の電力計の読みは W_2 の読みの半分で、又力率が 50% の場合は W_1 の読みは零即ち W_1 は偏れないのである。

若し負荷が進電流で各相電流が夫々各相電壓より φ だけ進んで居る場

合は、上に得た (イ), (ロ) の式中で φ の代りに $-\varphi$ を代入すればよい。従つて進電流の場合は、 $P_1 = E' I \cos(30^\circ - \varphi)$, $P_2 = E' I \cos(30^\circ + \varphi)$ となる。

例 1. 本節の結果から、負荷の力率を算出する公式を導き出せ。

解 (イ), (ロ) 二式 $P_1 = E' I \cos(30^\circ + \varphi)$, $P_2 = E' I \cos(30^\circ - \varphi)$ から、

$$P_1 + P_2 = \sqrt{3} E' I \cos \varphi \quad (ハ)$$

$$\begin{aligned} \text{又 } P_2 - P_1 &= E' I \{ \cos(30^\circ - \varphi) - \cos(30^\circ + \varphi) \} = E' I \times 2 \sin 30^\circ \sin \varphi \\ &= E' I \sin \varphi \quad (ニ) \end{aligned}$$

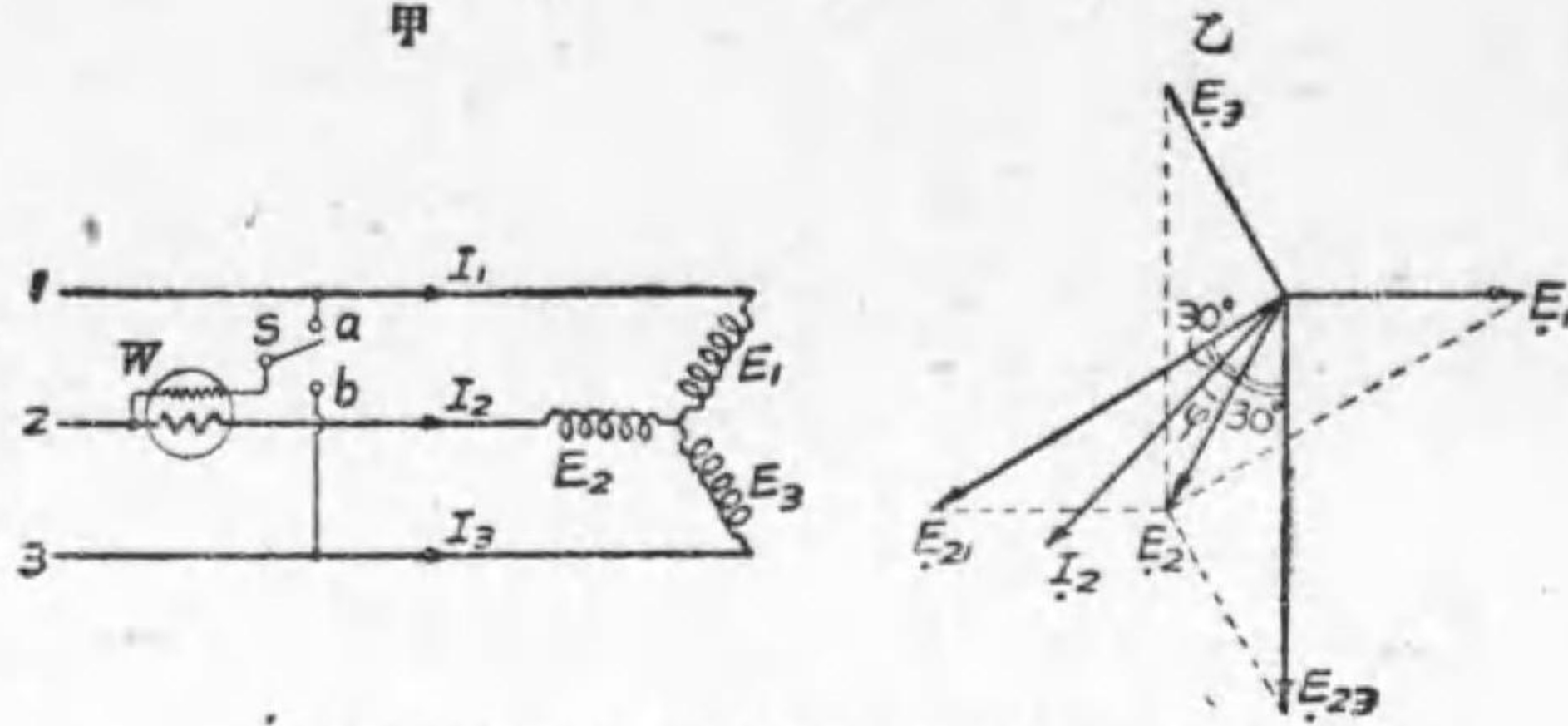
$$(ニ) \text{ を } (ハ) \text{ で邊々割つて, } \frac{1}{\sqrt{3}} \tan \varphi = \frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2} \therefore \tan \varphi = \sqrt{3} \frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2}$$

$$\begin{aligned} \therefore \cos \varphi &= \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2} \right)^2}} \\ &= \frac{P_1 + P_2}{2\sqrt{P_1^2 + P_2^2 - P_1 P_2}} \quad (ホ) \end{aligned}$$

例 2. 一個の電力計を使用し、二電力計法の原理を應用して平衡三相電力を測定する方法を述べよ。

解 電力計の電流線輪を三線中の何れか一線に接続し、電壓線輪は其の一端を其の線に接続し、他端を切替開閉器で以つて他の二線に接続し得る様に装置する。即ち第 6-26 圖甲は其の一例である。電流線輪には I_2 を通じ置き、開閉器 S を初めに a に閉ぢて電壓線輪には 2-1 間の電壓 $E_2 - E_1$ 即ち E_{21} を與へて其の読み P_1 を得る。次に S を b に閉ぢて電壓線輪には 2-3 間の電壓 $E_2 - E_3$ 即ち E_{23} を與へて其の時の読み P_2

第 6-26 圖



一個の電力計により平衡三相電力を測定する法

を得る。此の場合のベクトル圖(乙圖)より、次の關係を得る。

$$P_1 = E' I \cos(30^\circ - \varphi)$$

$$P_2 = E' I \cos(30^\circ + \varphi)$$

(但し、線間電壓 $E_{21} = E_{23}$ の値を E' 、又線電流 I_2 の値を I とする事は本文の通り) 従つて、本節と同じく、 $P_1 + P_2 = \sqrt{3} E' I \cos \varphi$ で、二回の讀みの和は三相電力を表はすのである。

12. 一相の電力を測定して平衡三相電力を求むる法

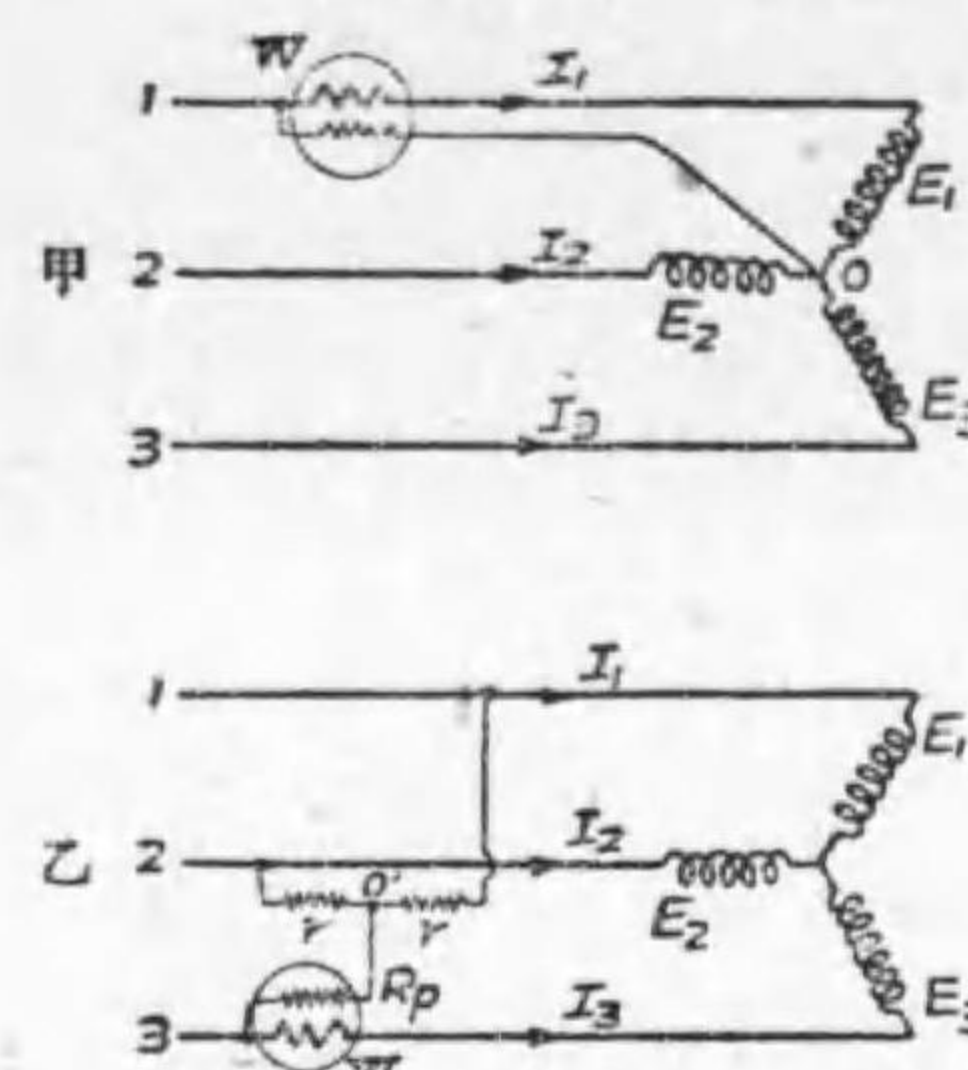
三相負荷が平衡せる場合には各相の電力は等しいから、一個の電力計を用ひて一相の電力を測定し、之れを3倍すれば平衡三相電力を得る譯である。

(イ) 中性點を利用し得る場合 第6-27圖甲に示す様に電力計を一相に接続して、負荷の第一相の相電壓を E_1 、又電流を I_1 、相差を φ とせば、其の讀み P_1 は、

$$P_1 = E_1 I_1 \cos \varphi = E I \cos \varphi$$

但し、各相電壓 $E_1 = E_2 = E_3 = E$ とし、各電流 $I_1 = I_2 = I_3 = I$ とす。

第 6-27 圖



一相電力測定法により平衡三相電力を測定する法

故に、此の P_1 の3倍即ち、

$$3P_1 = 3EI \cos \varphi$$

は三相電力である。

(ロ) 中性點を利用し得ない場合 此の場合には人工的に中性點を作る。即ち乙圖に示す様に電力計の電流線輪は何れか一線例へば第3線に接続し、電壓線輪の一端は其の線に、他端は Y 箱(star box) と稱する抵抗箱の中點 O' に結び、Y 箱の兩端子を 1, 2 の線に接続する。Y 箱

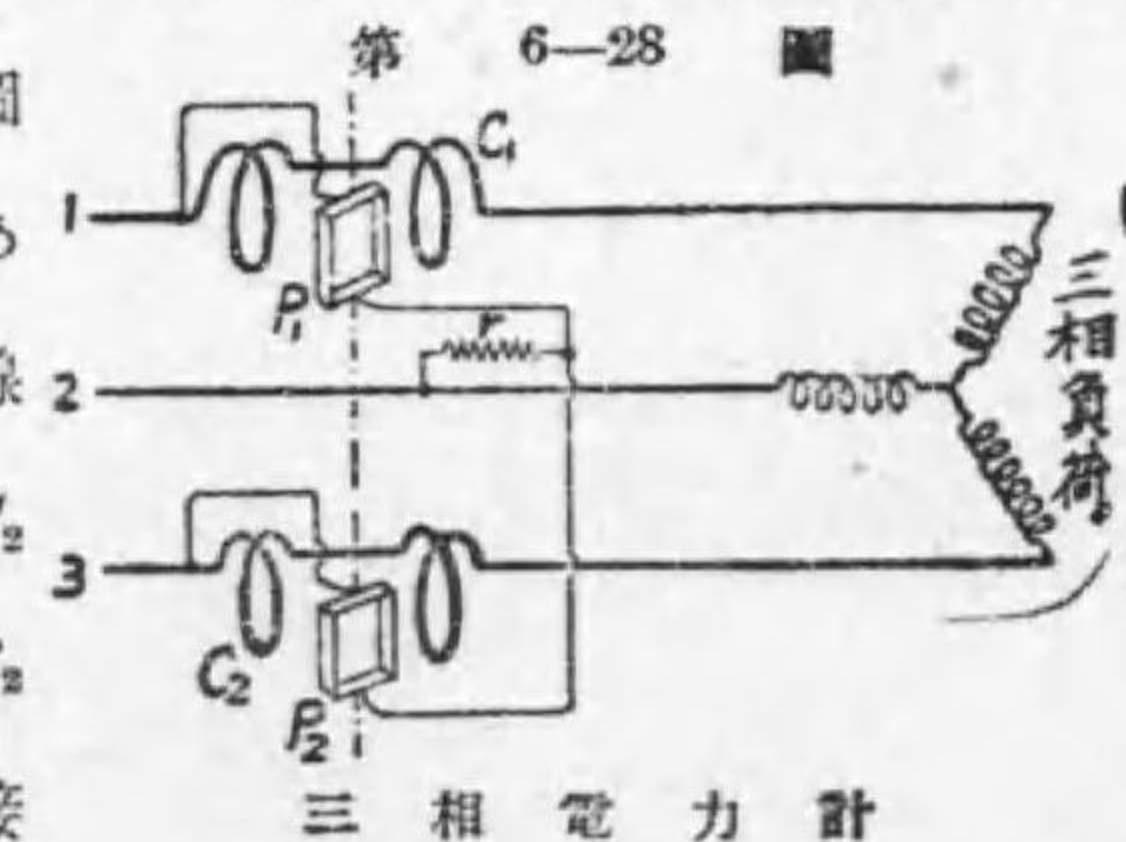
は電力計の電壓線輪回路抵抗 R_p と等しき値の抵抗 r を二個直列に接続したもので、中點 O' にも端子を有する。従つて乙圖の如く接続すれば、 $R_p = r$ であるから O' 點は 1, 2, 3 間の中性點と同電位である。故に電壓線輪には此の場合 E_3 と同値の電壓が與へられるから、電力計の讀み P_1 は第三相の電力を表はす。従つて三相電力は $3P_1$ となる。

13. 三相電力計

三相電力計は二電力計法の原理に基い

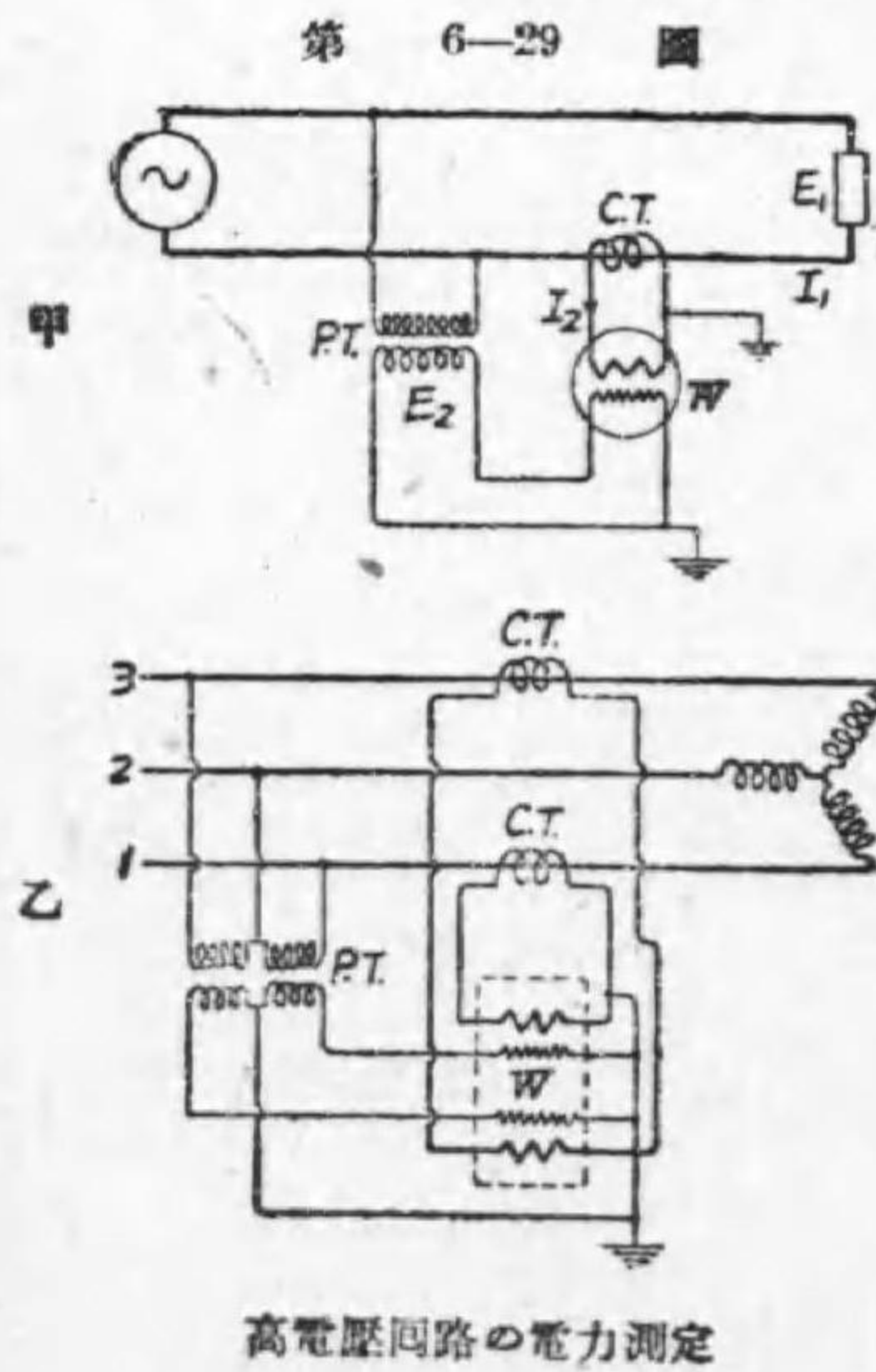
て作られたものである。第6-28圖はウェストン三相電力計の略圖である。單相用電力計の電壓及び電流線

輪の素子二組 P_1, C_1 及び P_2, C_2 を上下に装置し、可動線輪 P_1, P_2 は同一軸に取付けられたもので、接



積は二電力計法と同様である。上部の素子 $P_1 C_1$ に依つて P_1 に生ずる駆動トルクと下部の素子 $P_2 C_2$ に依つて P_2 に生ずる駆動トルクとの代数和が常に同一軸に働くから、三相電力に比例するトルクの爲に指針は目盛盤上に三相電力を指示する譯である。但し此の場合に上部と下部との素子が近いために、上部の P_1 と下部の C_2 、及び下部の P_2 と上部の C_1 との間にも幾分トルクを生ずるから、之れ等の餘分のトルクを補償する爲に適當な値の抵抗 r を圖の如く設けてある（その理論は省略する）。尙ほ現在のウェストン會社のものでは、上部の素子と下部の素子との間に鐵板の遮磁装置を施して、上述の餘分のトルクが加はらない様にしてある。

14. 高電圧回路の電力測定 交流高電圧回路には



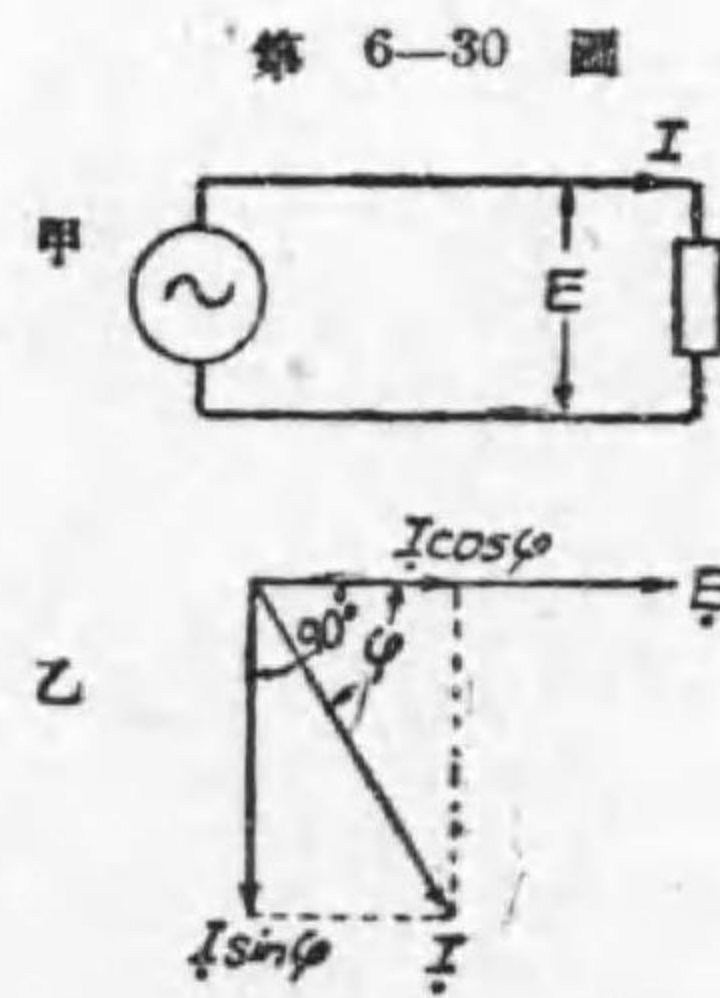
高電圧回路の電力測定

電圧變成器及び變流器と共に電力計を接続する。第6-29圖甲は單相電力測定の場合の接続で、電力計の電壓線輪を電壓變成器 $P.T.$ の二次に、又電流線輪を變流器 $C.T.$ の二次に接続する。従つて電力計のトルクは $P.T.$ の二次電壓 E_2 及び $C.T.$ の二次電流 I_2 及びその間の相差の餘弦に比例する。然るに E_2 は一次電壓 E_1 に又 I_2 は一次電流 I_1 に比例し、又 $E_2 I_2$ 間の相差は $E_1 I_1$ 間の相差と殆んど等しいから、電力

計のトルクは負荷電力に比例する譯である。尤も嚴密に考へると、變成器の變成比及び位相角によつて誤差を伴ふものであるが、之れに就いては上級に行つて更めて研究することにする。

乙圖は三相電力測定の場合の接続で、之れは二電力計法に基き三相電力計の二素子に夫々二個の變壓器 $P.T.$ 及び二個の變流器 $C.T.$ の二次を結べるものである。即ち電力計の上部素子の電壓線輪には 1-2 間の電壓に比例する電壓が與へられ、電流線輪には 1 線の電流に比例する電流を通じ、又下部素子の電壓線輪には 3-2 間の電壓に比例する電壓が與へられ、電流線輪には 3 線の電流に比例する電流が通ずるから、二電力計法の原理により、三相電力計 W には三相負荷に比例するトルクが作用するから、三相電力を測り得る譯である。

15. 無効電力の測定 第6-30圖甲の交流回路に於て



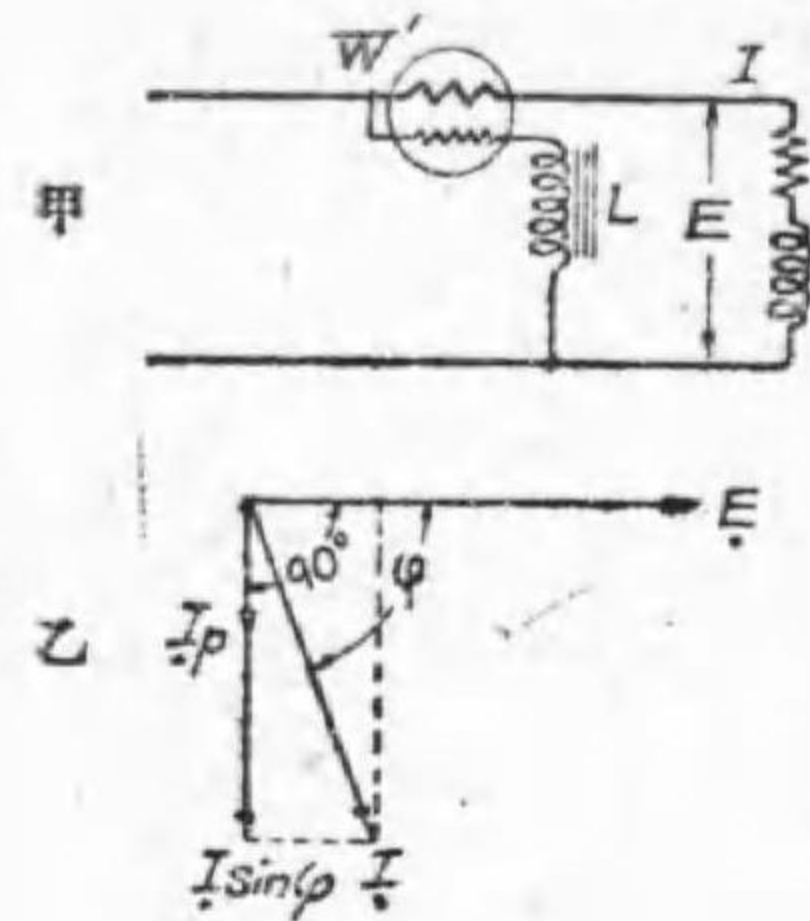
負荷電壓 E ヲルト、電流 I アムペア、電流が電壓より遅れる角を ϕ とせば乙圖のベクトル圖を得る。電流 I を電壓 E と同相及び 90 度の分に分解した $I \cos \phi$ 及び $I \sin \phi$ は、夫夫電流の有効分及び無効分である。此の場合 $E \times I \cos \phi$ は電力で、 $E \times I \sin \phi$ は無効電力である。無効電力の單位は無効ワット又はパール (var) [之れは volt ampere reactive の略]

である。即ち無効電力 P_r は、

$$P_r = E I \sin \phi \text{ パール}$$

力率の低い回路では電力が非常に小であるから、ウェストン低力率用電力計以外の普通の電力計で、その電力を測ると誤差が大になる。此の場合には却つて無効電力が大であるから、此の無効電力を測る方がよい。無効電力を測る計器を無効電力計と稱する。

第 6-31 圖



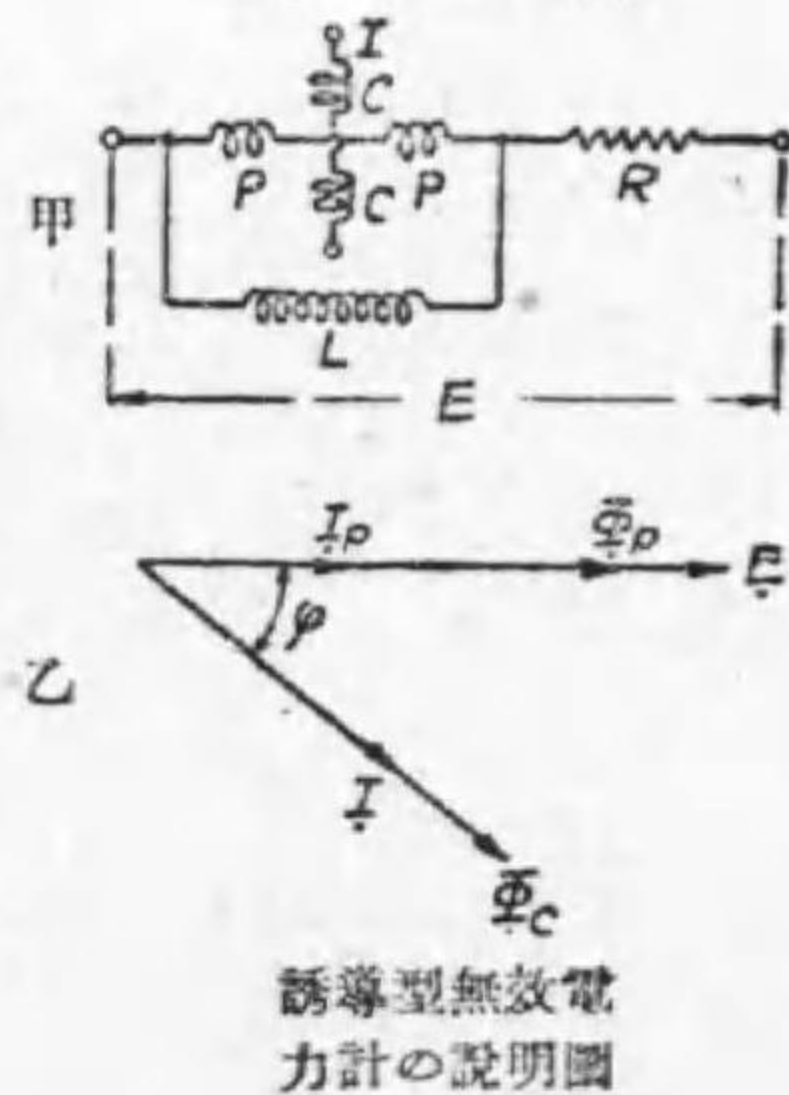
無効電力測定

第 6-31 圖甲は電流計型無効電力計を示す。これは普通の電流計型電力計の構造と同様で、只電力計の電圧線輪の直列抵抗の代りにインダクタンス線輪 L (又は蓄電器) を接続したものである。此の無効電力計 W' の電流線輪には電流 I が通じ、又電圧線輪回路はインダクタンスのみであるから、之れに通ずる電流 I_p は電圧 E から 90 度遅れる。従つて乙圖の如きベクトル圖を得る。W' の

電圧線輪には I と I_p との電流力作用によつてトルクを生ずるから、駆動トルクは I_p × I sin φ に比例する。I_p は E に比例するから結局駆動トルクは E I sin φ 即ち無効電力に比例する。従つて無効電力計が作られる譯である。尤も電圧線輪は幾分抵抗も有する故、I_p は E から丁度 90 度遅れる事は出来ないから、誤差を伴ふもので殊に力率の高い程誤差は大となる。

第 6-32 圖甲は誘導型無効電力計を示すもので、フェラリス型電力計に

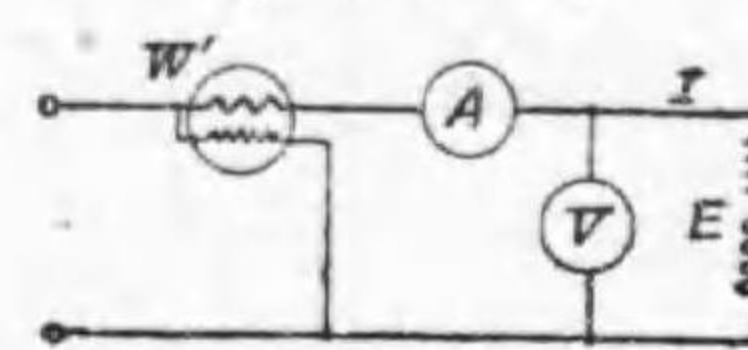
第 6-32 圖



誘導型無効電力計の説明圖

於て電圧線輪 PP に並列にインダクタンス線輪 L を接続せるものに抵抗 R を直列にして電圧 E を與ふるもので、此の理論は省略するが、L 及び R の値を適當に選定して電圧線輪電流 I_p を電圧 E と同相にする方法を講じてゐる。従つて電圧磁束 Φ_p と電流磁束 Φ_c とは乙圖に示す如く電圧電流間の相差 φ に等しいから、圓筒に生ずるトルクは Φ_p Φ_c sin φ 従つて E I sin φ 即ち無効電力に比例する譯である。

第 6-33 圖



単相回路の無効電流及び力率の測定

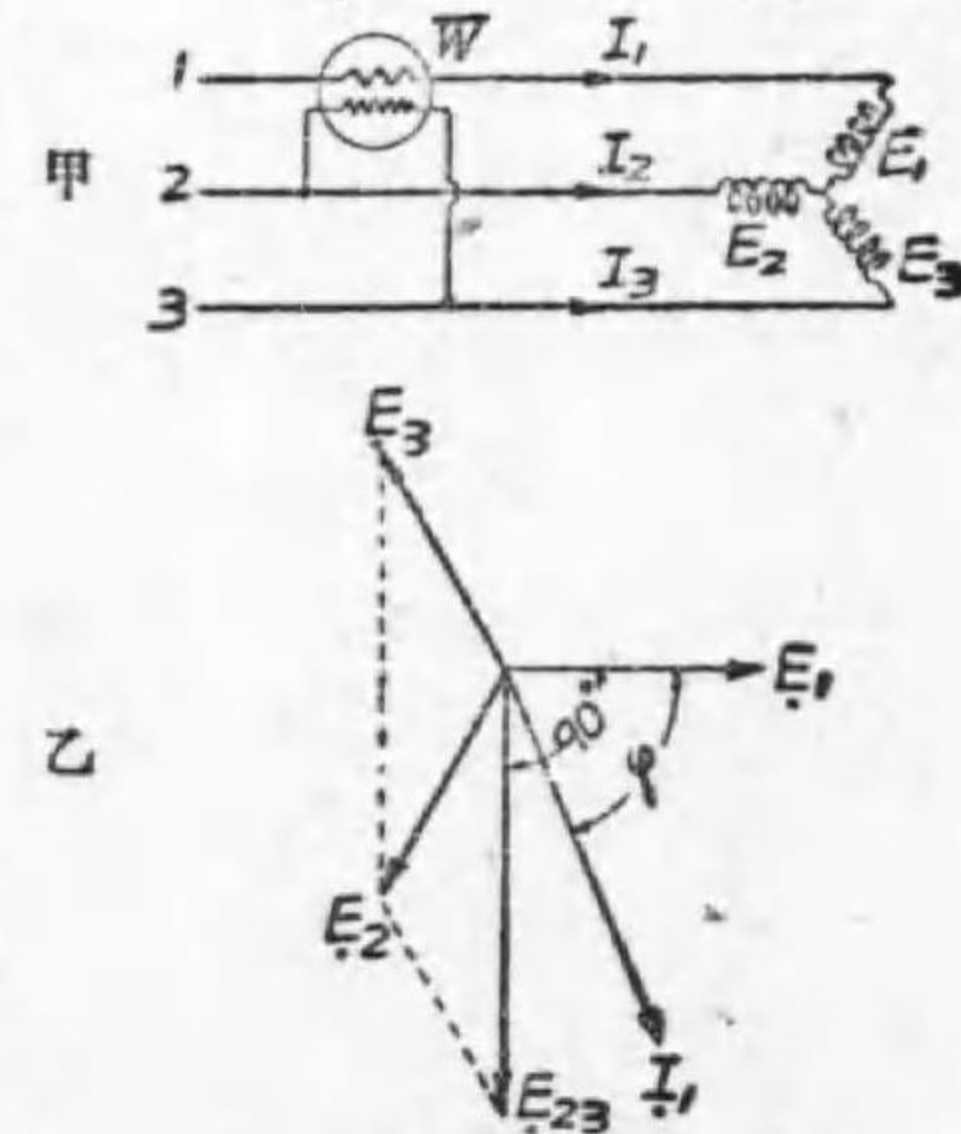
第 6-33 圖の如く無効電力計 W', 電圧計 V 及び電流計 A を接続すれば、夫々の読み P_r = E I sin φ, E, I から無効電流及び力率が求められる。即ち

$$\text{無効電流 } I \sin \phi = \frac{P_r}{E}$$

$$\text{力率 } \cos \phi = \sqrt{1 - \sin^2 \phi} = \sqrt{1 - \left(\frac{P_r}{EI}\right)^2}$$

平衡三相式回路では普通の電流計型電力計を使用して無効電力を測定する事が出来る。第 6-34 圖甲はこの場合の接続である。即ち電流線輪には I₁ を通じ、電圧線輪には 2-3 間の電圧 E₂₃ を與へる。乙圖は此の場合のベクトル圖で、E₂₃ 即ち E₂ - E₃ は E₁ と 90 度の相差を有するから、E₂₃ と I₁ とは 90° - φ の相差を有する譯で、従つて電力計 W の読みは E₂₃ I₁ ×

第 6-34 圖

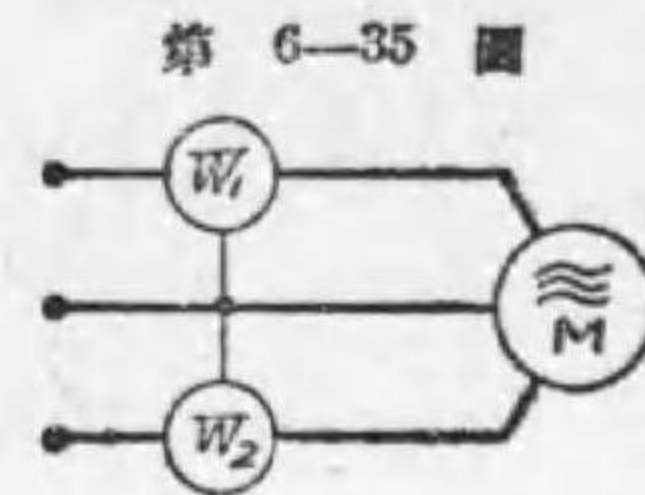


甲…平衡三相回路の無効電力の測定法
乙…同上の説明圖

$\cos(90^\circ - \phi)$ である。 E_{23} は線間電圧 (E') で I_1 は線電流 (I) であるから、電力計の読みは $E' I \sin \phi$ になる。之れに $\sqrt{3}$ を乗すれば三相無効電力 ($\sqrt{3} E' I \sin \phi$) となる。

問 題 (選試)

1. 三個の電圧計を用ひて単相交流回路の電力を測定する方法を述べよ。
2. 三個の電流計を用ひて単相交流電力を測定する方法の原理を説明せよ。但し電圧及び電流は正弦波とす。
3. 指示電力計の構造を説明せよ。
4. 指示電力計を用ひて交流電力を測定するに當りて生ずる最も普通なる誤差の原因如何。
5. 二個の単相電力計を用ひて不平衡三相三線式回路の電力を測定する場合の電線接続を圖示せよ。
6. 中性点を接地したる星形結線の三相發電機より同様の接続をなしたる負荷に送電する場合に、其の送電線に挿入せる電力計は實際送出したる電力よりも稍小なる讀みを呈せり。而して之れを接地せざる三角形に変更せしに斯の如き現象を呈せずと云ふ、其の原理を説明せよ。勿論電力計は正確なるものとす。
7. 二個の電力計を以つて三相誘導電動機の入力を測定せしに、一方の電力計が他の電力計の2倍を指示せり。電動機の力率幾何なりや。但し電圧電流は純正弦波と假定す。 答 86.6%
8. 三相誘導電動機の無負荷に於ける電力及び力率を第6-35圖の如く



2 個の電力計を用ひて測定せんとす。各電力計の讀みを W_1, W_2 とすれば電動機に供給せらるる電力及び力率如何。但し力率は 50% 以下なるものとす。

答 電力 $\sqrt{3} W_1 \sim W_2$
 力率 $\frac{W_1 - W_2}{2\sqrt{W_1^2 + W_2^2 + W_1 W_2}}$

9. 結合 n 線式回路の電力は $(n-1)$ 個の単相電力計に依り測定し得ることを證明せよ。
10. 平衡三相回路に於て、普通の電流計型電力計 1 個を用ひ無効電力を測定する方法を述べ之れを説明せよ。

第七章 種々の電気測定器

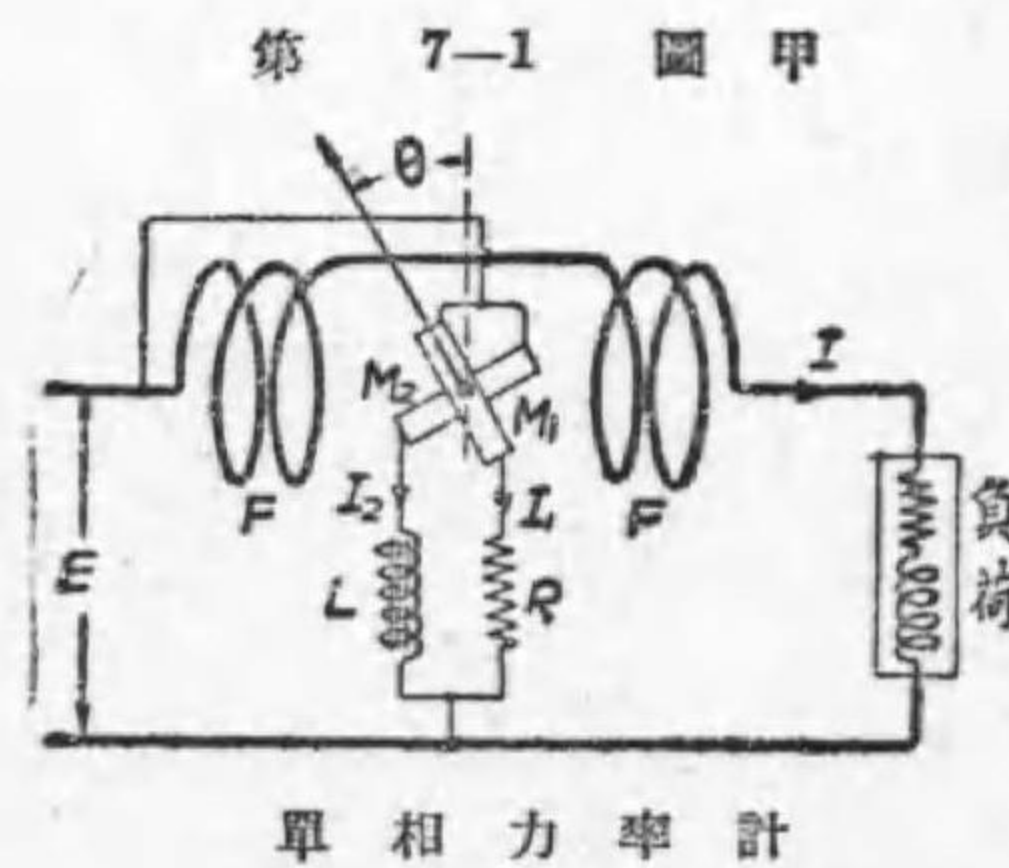
1. 種々の電気測定器

今迄に述べなかつた電気測定器中、次に示す指示計器及び自記計器を本章で説明しよう。

- イ. 力率計 (power-factor meter)……交流回路の力率を指示する計器
- ロ. 周波計 (frequency meter)……交流回路の周波数を指示する計器
- ハ. 同期検定器 (synchronizer or synchroscope)……二つの交流機の同期を検する装置
- ニ. 静電検漏器 (electrostatic ground detector)……無接地式高電圧線路の漏電を検する計器
- ホ. 自記計器 (recording meter)……電気諸量を圖紙に自記する計器

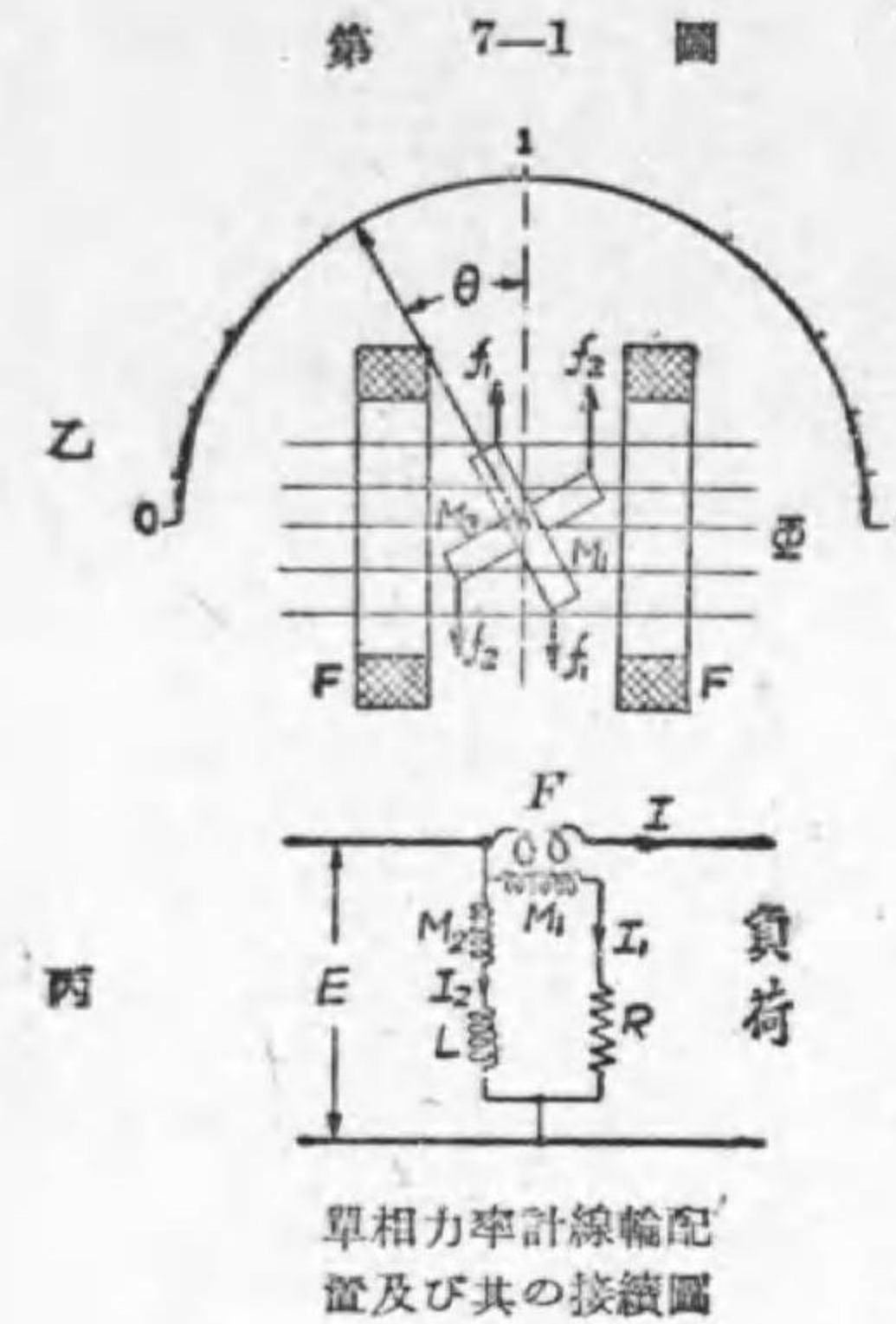
2. 力率計

第 7-1 圖甲は単相用力率計の一例で、電流力計型計器である。F は固定線輪で之れに電流 I を通じ、又 M₁, M₂ は可動線輪で互に直角に軸に取付けられ、軸には指針が取付けられて居る。M₁ には無誘導抵抗 R が直列に接続され、M₂ にはインダクタンスの大なる電流線輪 L が直列に接続され、之れ等は圖に示す如く並列に接続されて電圧 E を受ける。乙圖は線輪の配置圖で、丙圖はその接続を判り易くした圖である。此の計器は丁度、F と M₁ とで



單相力率計

第 7-1 圖 甲



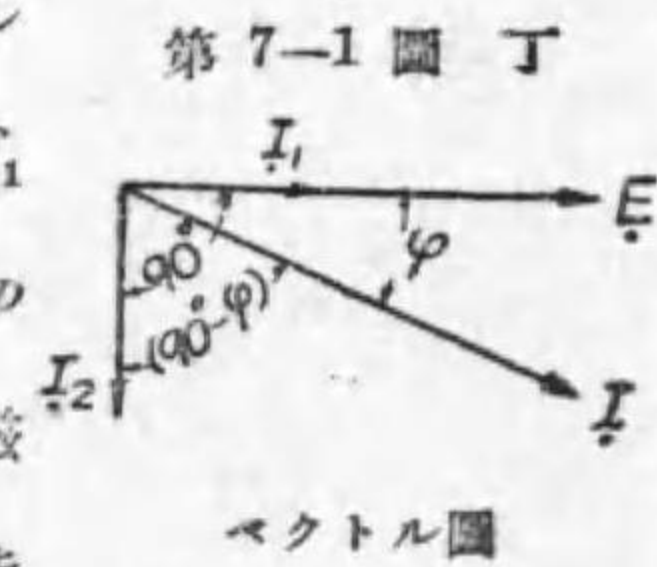
單相力率計線輪配置及び其の接続圖

第 7-1 圖

電力計の作用をせしめ、又 F と M₂ とで無効電力計の作用をせしめた組合せとなつて居て、普通の指示計器に於ける如き制御彈條を取付けずに、F M₁ の電流力作用によるトルクと、F M₂ の電流力作用によるトルクとが互に反対方向になる様に装置されてある。

今負荷電流 I が電圧 E より φ だけ位相が遅れて居る場合に、指針の傾斜従つて M₁ の傾斜が F 線輪の軸に直角の位置より θ 角をなして居るとする。此の場合の F M₁ 間の電流

力によるトルク及び F M₂ 間の電流力によるトルクを考へよう。M₁ 回路は殆んど抵抗のみであるからその電流 I₁ は電圧 E と同相であり、又 M₂ 回路は殆んどインダクタンスのみであるからその電流 I₂ は電圧 E から 90 度遅れる。丁圖は電圧電流等のベクトル圖である。F の I と M₁ の I₁ との電流力 f₁ は、I と I₁ との相違が φ であるから、I I₁ cos φ に比例し、其の方向は乙圖に示す如く F の作る磁界 Φ と直角の方向であるから、トルク D₁ は時計式方向で、



第 7-1 圖 丁

ベクトル圖

$$D_1 = k I I_1 \cos \phi \times \sin \theta \quad (1)$$

又 F の I と M₂ の I₂ との電流力 f₂ は、I と I₂ との相違が (90-φ)

であるから、 $II_2 \cos(90^\circ - \varphi) = II_2 \sin \varphi$ に比例し、其の方向は乙圖の如く Φ と 90° であるから、トルク D_2 は反時計式方向に、

$$D_2 = k II_2 \sin \varphi \sin(90^\circ - \theta) = k II_2 \sin \varphi \cos \theta \quad (\square)$$

I_1, I_2 は電圧 E に比例するから、 $D_1 = K EI \cos \varphi \sin \theta$, $D_2 = K' EI \times \sin \varphi \cos \theta$, 即ち D_1 は電力 $EI \cos \varphi$ に関係し、 D_2 は無効電力 $EI \sin \varphi$ に関係するものである事が判る。

さて D_1 及び D_2 なる二つのトルクは θ に関係し、可動線輪従つて指針は、 $D_1 = D_2$ となつて静止するから、 φ と θ との関係は次のやうにして求められる。

$$II_1 \cos \varphi \sin \theta = II_2 \sin \varphi \cos \theta$$

$$\therefore \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{I_2}{I_1} \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}$$

$$\tan \theta = \frac{I_2}{I_1} \tan \varphi \quad (\wedge)$$

故に $I_1 = I_2$ に作つて置けば、 $\tan \theta = \tan \varphi$

$$\therefore \theta = \varphi \quad (\wedge')$$

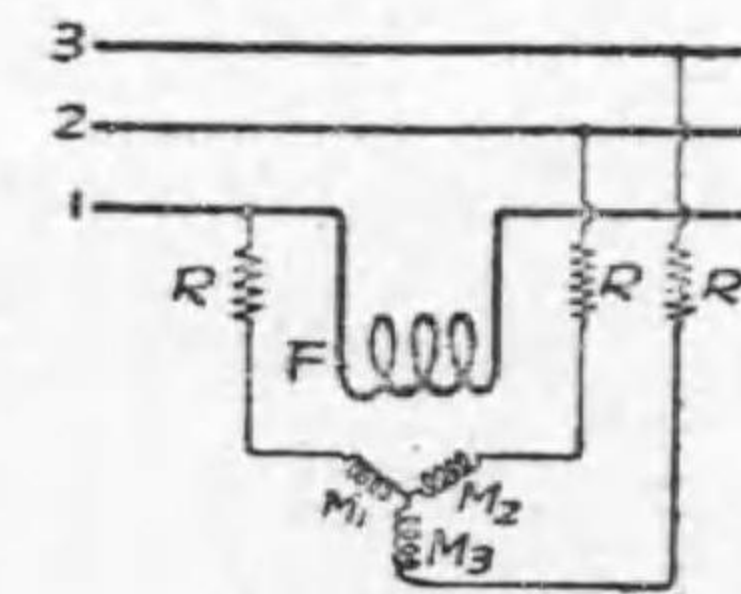
即ち指針の傾斜角 θ は電圧電流間の相差 φ に等しい。従つて目盛盤上には φ の餘弦 $\cos \varphi$ 即ち力率を目盛る事が出来る譯である。特別の場合として若し、負荷が無誘導無容量の負荷の場合即ち力率 $\cos \varphi = 1$ の場合は $\varphi = 0$ で従つて $\theta = 0$, 即ち目盛の中央が力率 1 である。若し又負荷が進み電流の場合例へば電流が電圧より φ だけ進んで居る場合は、上の(ハ)式にて、 φ の代りに $(-\varphi)$ とおき、 $\theta = -\varphi$, $\therefore \varphi = -\theta$ 即ち指針は中央より右側に θ だけ傾いて其の時の力率を指示する譯である。

尚ほ此の単相力率計では上の簡単な説明でも判る通り、周波数の變化に

よつて、可動線輪のインピーダンスが異なるから可動線輪電流の大きさ及び位相が種々異なる爲め周波数變化により誤差を生ずる事が判る。従つて之れは規定周波数の回路に使用すべきである。

力率計は上述の様に負荷の電力による駆動トルク D_1 と無効電力による制御トルク D_2 とを利用したものであると考へたが、又次の様に考へてもよい。即ち固定電流線輪 F の作る交番磁界と、 M_1, M_2 なる二つの可動電圧線輪によつて生ずる一つの回轉磁界 (M_1, M_2 は互に直角で、又各の電流 I_1, I_2 は互に 90° 度の相差を有するから一つの回轉磁界を作る) との作用を利用したものと考へてもよい。即ち可動線輪の取るべき位置は、 F の磁界が最大となる瞬時に於て、可動線輪の回轉磁界の方向が F の磁界の方向と一致する様な位置を取つて、指針は其の相差に相當する力率を指示するのである。

第 7-2 圖

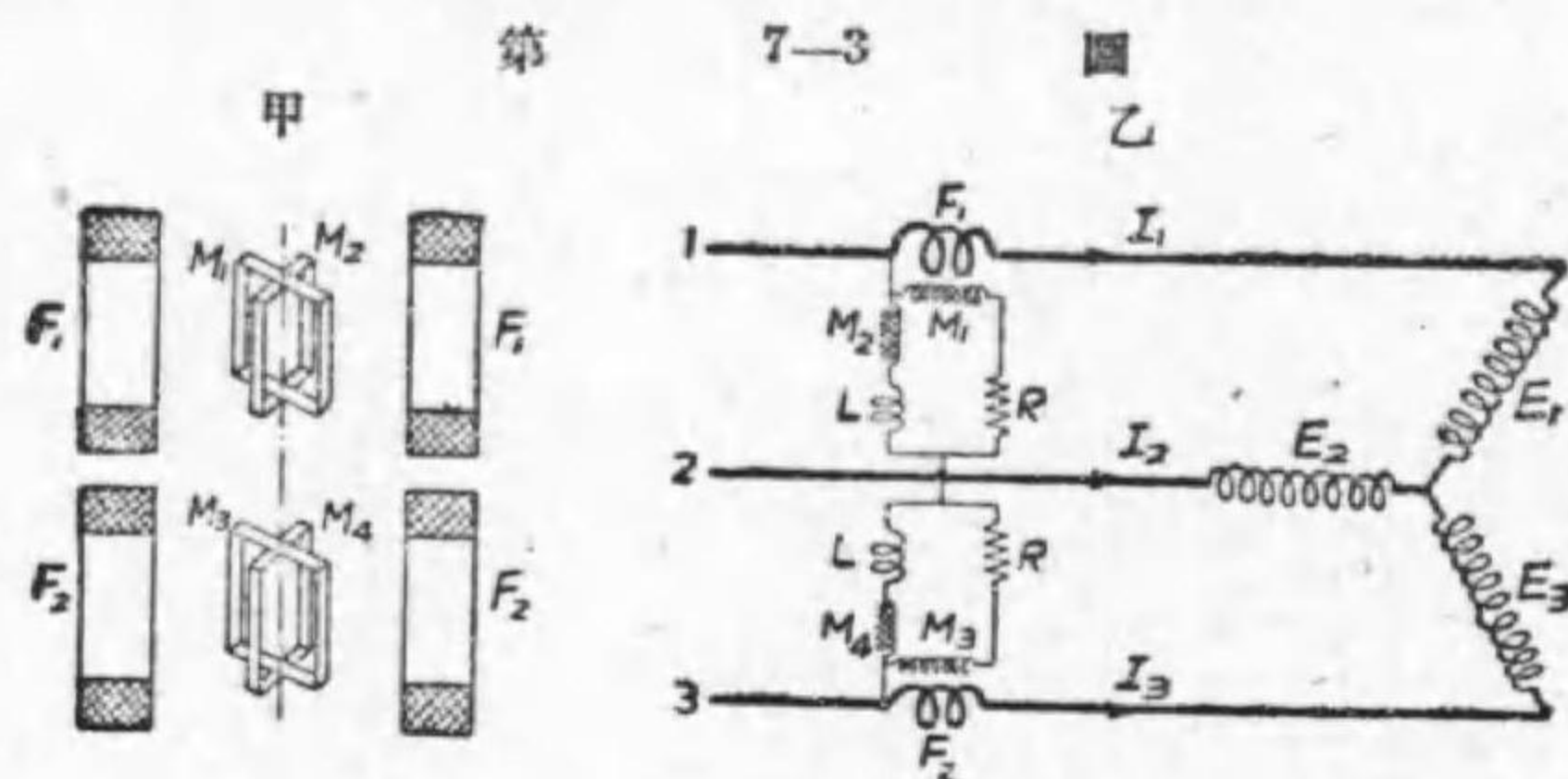


平衡三相力率計

第 7-2 圖は平衡三相式用い力率計の一例である。 F が固定の電流線輪で、 M_1, M_2, M_3 は可動電圧線輪で、 F の磁界内に於て、各は 120° 度隔て、同一軸に取付けられ、各に抵抗 R が接続されて居る。 F は三線中の一線に接続され、 M_1, M_2, M_3 は Y 形に結ばれて線間に接続される。 M_1, M_2, M_3 は互に 120° 度宛隔てられ且つ相隣れる線輪の電流の位相が 120° 度宛の相差を有するから、可動電圧線輪によつては一つの回轉磁界が作られる。又 F によつては交番磁界が作られる。従つて単相力率計と同様に、固定線輪の作る交番磁界と可動線輪の作る回轉磁界との作用により、可動線輪は電圧電流間の相差に應じた位置を取り、之れに取付けた指針は

目盛盤上に力率を指示するのである。此の三相用電力計にはインダクタンス線輪を用ひてないから、周波数変化による誤差は生じない。

第 7-3 圖は高津博士の力率計で、之れが回路の平衡不平衡の如何に拘らず使用される計器である。単相力率計に於ける固定電流線輪及び可動電圧線輪素子を二組上下に装置せるもので、甲圖はその配置圖、乙圖はその



高 津 氏 力 率 計

接続圖を示す。F₁ 及び F₂ は夫々上下の固定電流線輪、M₁, M₂ 及び M₃, M₄ は夫々上下の可動電圧線輪で共通軸に取付けられてある。M₁, M₃ には抵抗 R が接続され、M₂, M₄ には塞流線輪 L が接続され、全體が二電力計法の接続になつて居る。軸に取付けられたる指針は常に其の回路の力率を指示するものである。茲に一般の力率とは次式に示す値である。

$$\text{力率} = \frac{P}{\sqrt{I^2 + P_r^2}} = \frac{E_1 I_1 \cos \varphi_1 + E_2 I_2 \cos \varphi_2 + E_3 I_3 \cos \varphi_3}{\sqrt{(E_1 I_1 \cos \varphi_1 + E_2 I_2 \cos \varphi_2 + E_3 I_3 \cos \varphi_3)^2 + (E_1 I_1 \sin \varphi_1 + E_2 I_2 \sin \varphi_2 + E_3 I_3 \sin \varphi_3)^2}}$$

但し、P=全實効電力 (ワット)、P_r=全無効電力 (バル)

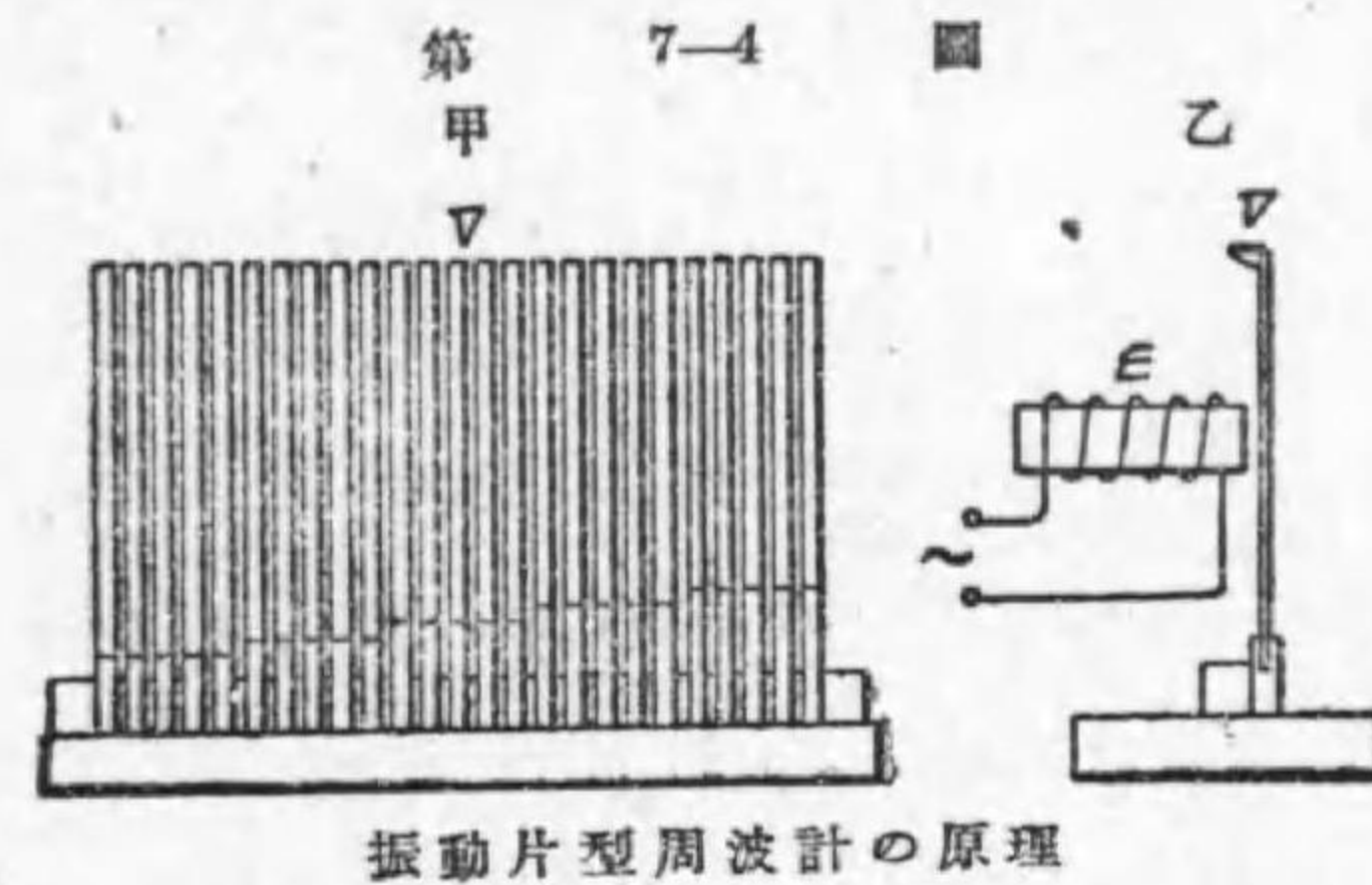
E₁, E₂, E₃=負荷の各相の星形電圧、I₁, I₂, I₃=各線の電流

φ₁, φ₂, φ₃=各相の電圧電流間の相差

3. 周波計

周波計には機械的共振現象を利用したものと電氣的のものがあるが、後者の電氣的のものには種々のものがある。茲には機械的共振を利用した振動片型と後者中の一二の周波計とを説明しよう。

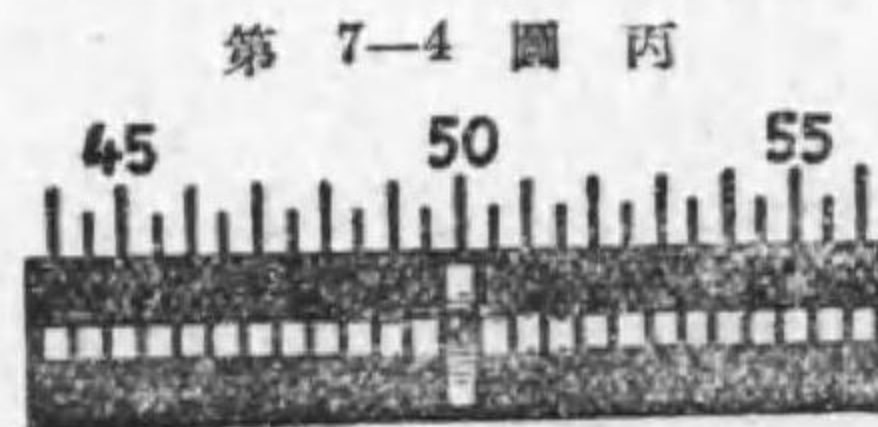
(イ)振動片型周波計 第 7-4 圖はフラーム (Frahm) 氏の考案に基づ



振 動 片 型 周 波 計 の 原 理

く獨逸ハートマン會社其他の會社で作られる振動片型 (vibrating-reeds type) 周波計の原理を示す略圖である。V は下端で固定された鋼鐵片 (steel reeds) の一群で、

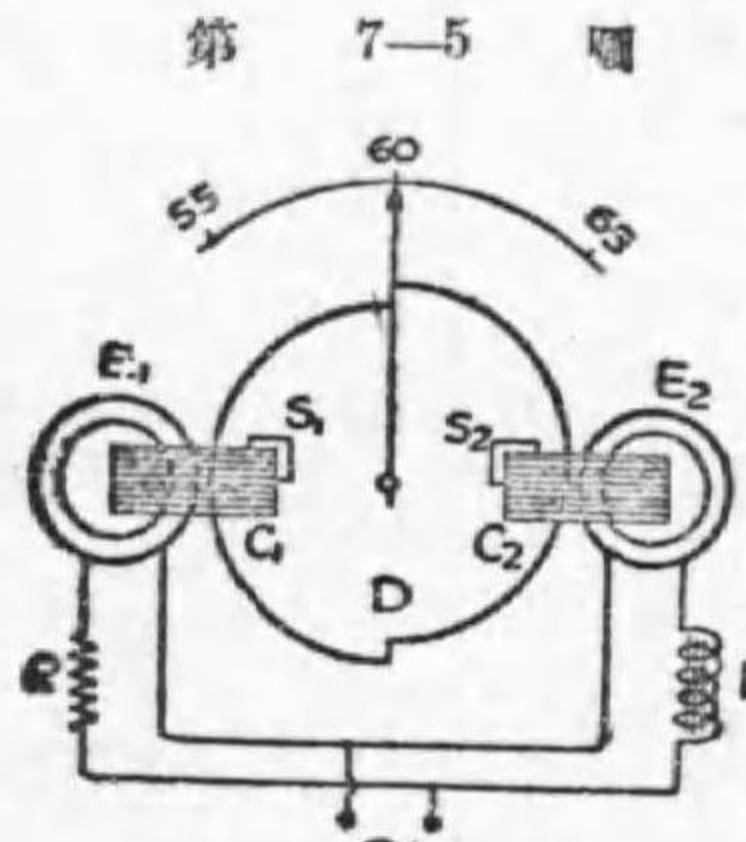
各鐵片は其の長さ及び質量等を適當に變へて各の固有振動周期を順次異にしたものである。鐵片に對向して交流電磁石 E を備へて居る。その勵磁線輪には適當な直列抵抗が接続され、周波數を測るべき電壓回路に接続する。斯様にして勵磁線輪に交流通すれば交番磁束を生じ、その一周波毎に二回宛鐵片を吸引するから、一群の鐵片中、被测周波數の二倍の固有振動數を有する鐵片のみは共振作用により盛んに振動するが、他の鐵片は殆んど振動しない。各鐵片の頭を白色に塗つて置き、共振したものが丙圖に示す様に長い白色帯に見え、目盛盤上に被测周波數を知る事が出来る。測定範圍が 45 より 60 サイクル迄の各振動片の厚さは 0.4 mm、幅は 4 mm で、長さは 55.5



周 波 計 の 目 盛 盤

mm より 46.5 mm 迄變化して居り、0.5 サイクル置きに讀む事が出来る。尙ほ交流電磁石の外に適當な永久磁石を併用すると、交番磁界の一周期中一回だけ鐵片を吸引するから、永久磁石を用ひない場合に 50 サイクル交流に對して共振する鐵片は永久磁石を併用すると 100 サイクルの交流に共振する事になる。従つて永久磁石を併用して同一計器で二種の測定範圍の周波計を作る事が出来る。

(ロ)誘導型周波計 第 7-5 圖はウェスチングハウス會社の誘導型周波計を示すもので、移動磁界型電壓計の二要素を差動的に組合せた構造である。



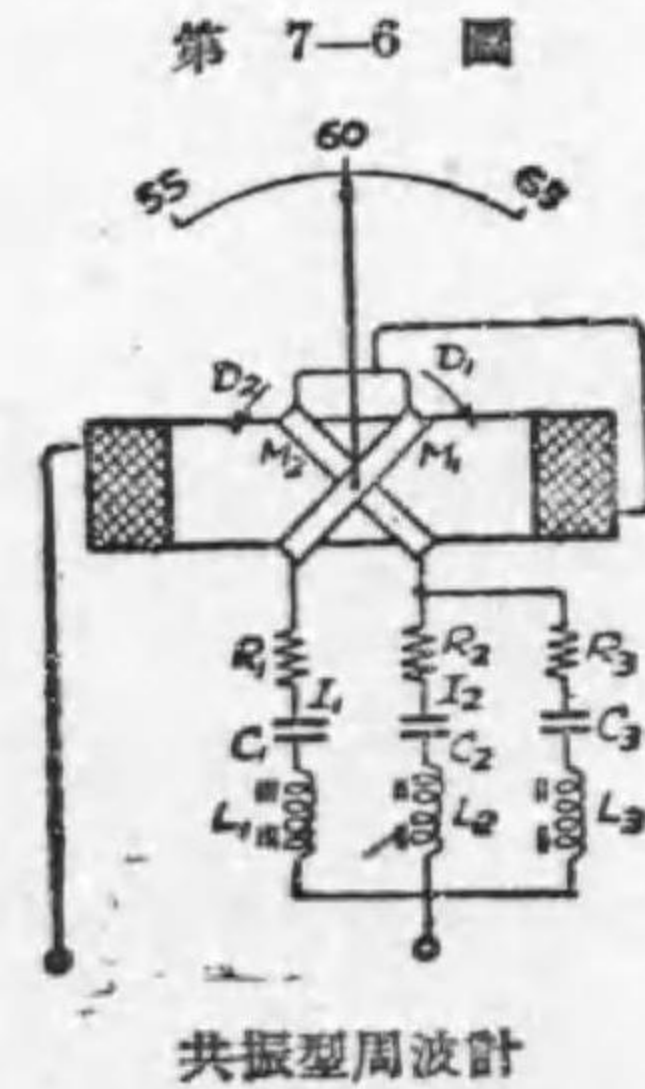
誘導型周波計

第 7-5 圖 E_1, E_2 は夫々成層鐵心に巻かれた線輪で、 E_1 には無誘導抵抗 R を直列に、又 E_2 にはインダクタンス L を直列に接続し、之れ等兩回路を並列にして被測周波数の交番電壓を與へる。各鐵心 C_1, C_2 の極は二分され夫々隈取線輪 S_1, S_2 が装置され、夫々の空隙に於て互に反方向の移動磁界を生じ、空隙に挟まるアルミニウム

板 D には夫々により互に反方向のトルクを生ずる。圓板 D の左半は軸を中心とする半圓で、右半は中心が軸より少しく上部に在る半圓である。圓板の靜止する位置は、左の動作部 E_1 による時計式方向のトルクと右の動作部 E_2 による反時計式方向のトルクとが平衡した位置に靜止するのである。例へば端子に與へた電壓の周波数が 60 サイクルの場合に圖の位置で靜止して居るとすると、此の場合 E_1 によるトルクと E_2 によるトルクとが平衡して居る。若し 60 サイクルより高い周波数であれば、左の RE_1 回路は殆んど抵抗だけであるから之れに通ずる電流は殆んど一定であるが、

右の LE_2 回路はインピーダンスが前より増す爲に E_2 の電流は前より減少するから、圓板 D は時計式に動く。然るに此の場合 C_1 の極の下にある圓板は初めと變りがなく従つて E_1 によるトルクは圓板の位置に無關係に一定であるが、 C_2 の極の下に来る圓板の部分は圓板が時計式に動くに従ひ次第に増加し、従つて E_2 によるトルクは初めより増して来る。此の E_2 によるトルクが丁度 E_1 によるトルクと平衡した位置に圓板は靜止し、従つて指針は 60 サイクルより右方に來て目盛盤上に其の場合の周波数を指示するのである。周波数が低くなると今の場合と反對で、 E_2 の電流が増し、 E_2 によるトルクが E_1 によるトルクよりも大になるから、圓板は反時計式に動く。然るに此の場合は C_2 の極の下に来る圓板の部分が次第に減少するから E_2 によるトルクは次第に減少し、遂に圓板の或る位置に於て E_2 によるトルクが E_1 によるトルクと平衡して圓板は靜止する。即ち指針は左方に於て目盛盤上に低い周波数を指示する。

(ハ)電流計型周波計 電流計型計器の中で電氣的共振現象を利用したゼネラル電氣會社の共振型 (resonance type) 周波計を説明しよう。第 7-6 圖はその原理を示すものである。固定線輪 F の作る磁界内に、互に直角に軸に取付けられた可動線輪 M_1, M_2 が装置されて居る。 M_1 には抵抗 R_1 、インダクタンス L_1 、容量 C_1 が直列に接続され、又 M_2 には R_2, L_2, C_2 が直列に接続されて、之れ等を並列に接続し、之れと固定線輪 F とが接続されて居る。各同調回路の同調周波数は基準周波数の上下 8 サイクルに選ばれて居る。即



共振型周波計

同調回路の同調周波数は基準周波数の上下 8 サイクルに選ばれて居る。即

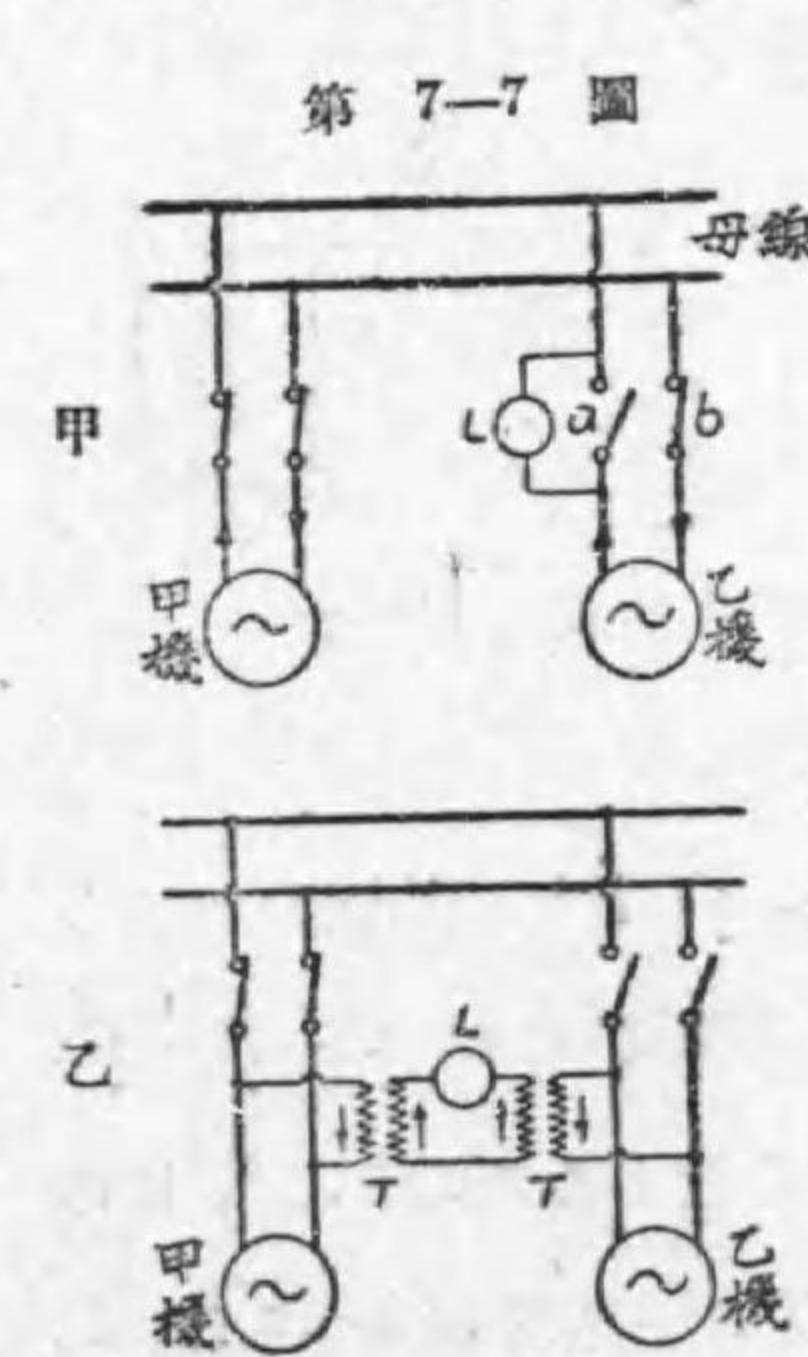
ち 60 サイクル用周波計に於ては、 L_1 及び C_1 は 68 サイクルの周波数で同調する、即ち誘導リアクタンスと容量リアクタンスと相等しく、又 L_2 及び C_2 は 52 サイクルの周波数に於て同調する、即ち誘導リアクタンスと容量リアクタンスと相等しく選定されて居る。即ち周波数が 68 サイクルの場合は M_1 の電流 I_1 は最大で、 M_2 の電流 I_2 は極く少いが、周波数が 52 サイクルの場合は M_2 の電流 I_2 が最大で、 M_1 の電流 I_1 は極く少いのである。 M_1 と F とにより生ずるトルク D_1 と、 M_2 と F とにより生ずるトルク D_2 とは互に反対方向となる様になつて居り、此の両トルクが平衡した位置に可動線輪は静止するのである。

今周波数 60 サイクルの交番電圧を端子間に與へた場合に可動線輪は圖の位置で静止して居るとすれば、周波数が之れより大になつて例へば 68 サイクル附近になると、 I_1 が大になり、 I_2 は小になるから、 M_1 に働くトルク D_1 が M_2 に働くトルク D_2 より大になるから可動線輪は圖の位置より右方に傾いて来る。然るに可動線輪に働くトルクは固定可動兩線輪の電流の値に關する以外に、固定可動兩線輪の相互位置にも關係するもので、可動線輪と固定線輪とが互に直角の時が大であるから、可動線輪が右に傾くに従ひ M_1 によるトルクは次第に減じ、 M_2 によるトルクは増して来るから、遂に兩トルクが平衡の位置に達して可動線輪は静止する。反対に周波数が 52 サイクル附近になると、 I_2 が大になり I_1 は小になるから、可動線輪は圖の位置より左方に傾き、 M_1 、 M_2 のトルクが平衡した位置で静止する。此の計器は同調回路を用ひて居る故、共振状態に近づくと電流は急激に増すので、55 サイクル乃至 65 サイクルの目盛を有する極めて感度の良い周波計が得られる。 L_2 及び C_2 は 38 サイクルの同調回路で、

之れを附けた理由は、52 サイクル以下の周波数では、若し L_2 、 C_2 がないと、 M_1 、 M_2 の電流が共に極小となり、指針を極めて不安定にするので、斯様な低い周波数の場合、指針を最低目盛より低い處に止めるためである。

4. 同期検定器 二つの交流発電機を並行運転せんとする際の必要條件は、(1) 電圧相等しい事、(2) 周波数相等しい事、(3) 位相が一致して居る事の三條件である。同期検定器は此の内の(2)及び(3)の二條件即ち二つの交流機の同期 (synchronism) を検するものである。同期検定器の種類も種々あるが次に二三のものを説明しよう。

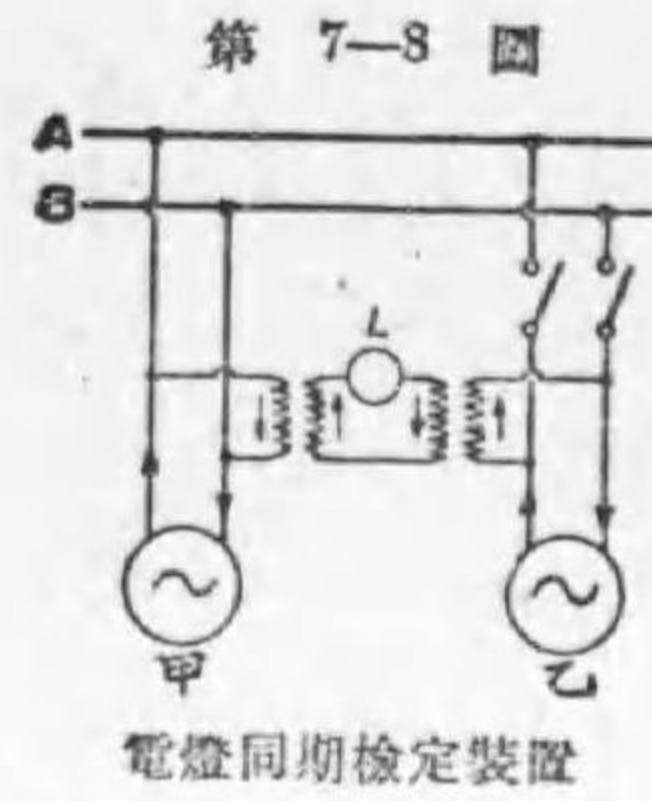
(イ) 電燈同期検定装置 第 7-7 圖甲は低壓單相回路の場合の電燈 L を



電燈同期検定装置

使用する最も簡単な電燈同期検定装置 (lamp synchronizer) である。既に運轉せる甲發電機又は母線に、平行運轉せんとする乙發電機の片切閉閉器の a を閉ぢずに母線と乙機との間に電燈 L を接続し、他の b を閉ぢると、母線 (又は甲機) と乙機とが同期である場合は兩方の電圧の差が與へられるから電燈は消える。若し兩機が同期でなければ電燈は明滅する。高電圧の場合には乙圖に示す如く、變壓器を使用すればよい。乙圖も同一線間に電燈を挿入した甲圖の場合と同様な接続である。

から、電燈が消えた時同期で、明滅の場合は兩機の周波数が異なる場合である。

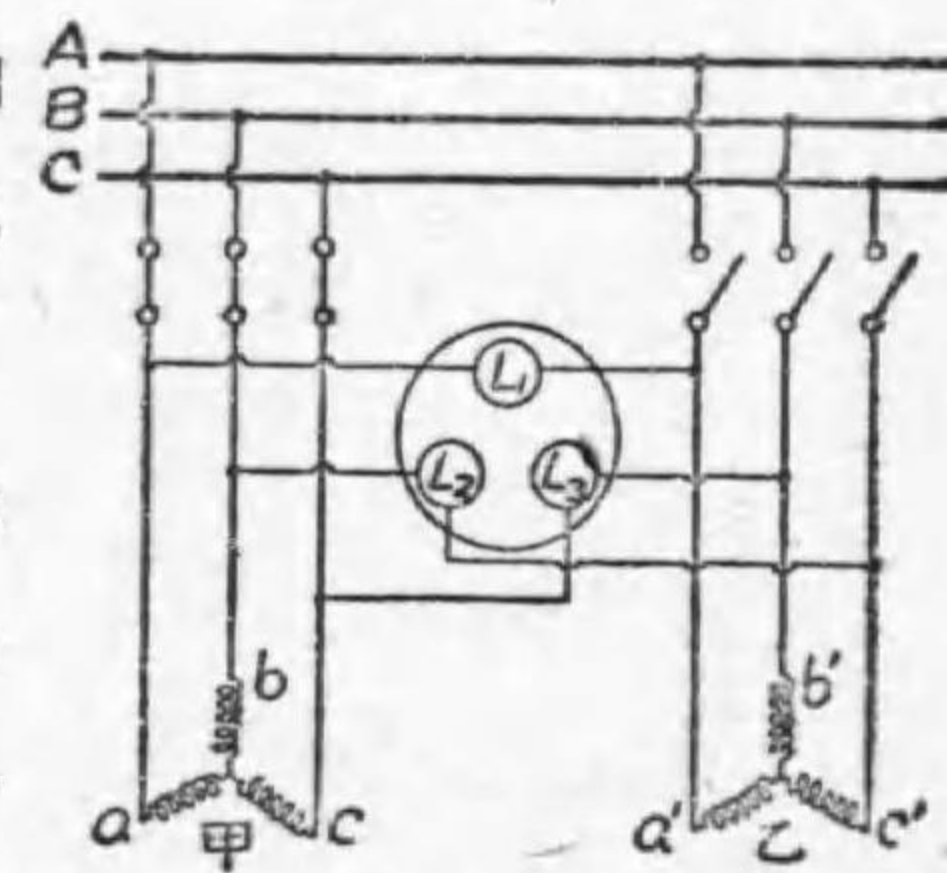


電燈同期検定装置

第7-8圖は異なる線間に電燈を挿入した場合で、此の接続では、電燈が最も明るく點燈して居る場合に甲乙兩機は同期になつて居る。電燈が明滅して居る場合は甲乙兩機の周波数の差がある。而して第7-7圖及び第7-8圖何れの場合でも電燈明滅の速さが大なる程兩機の周波数の差が大

で、明滅の速さが小なる程兩機の周波数の差が小である。

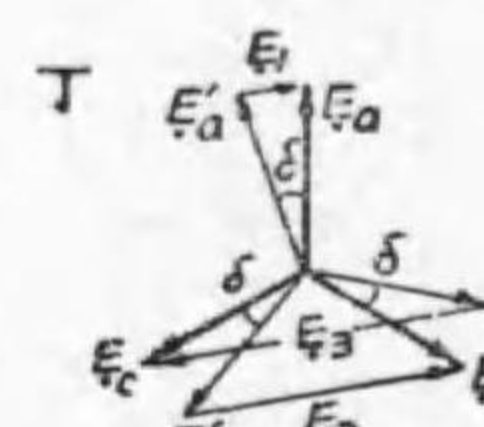
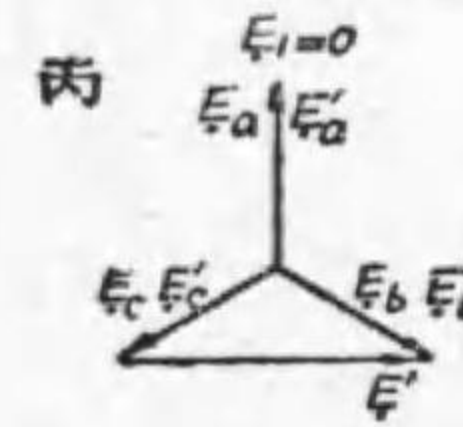
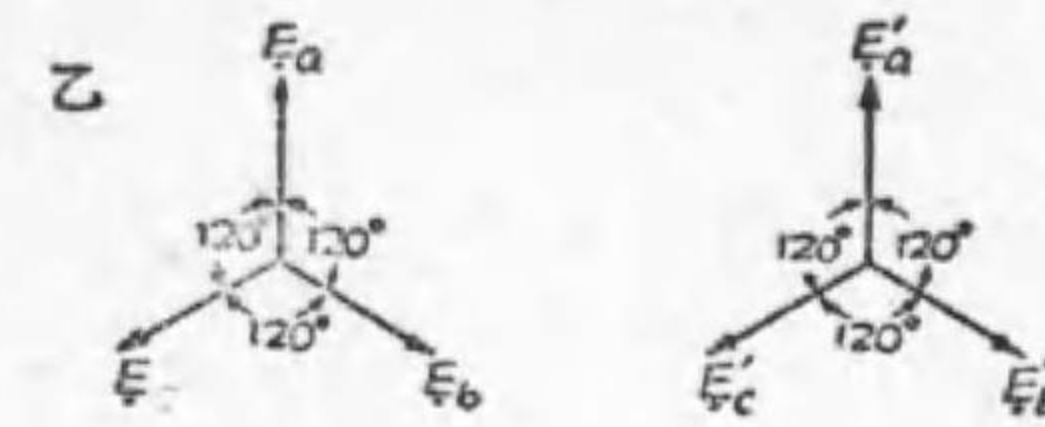
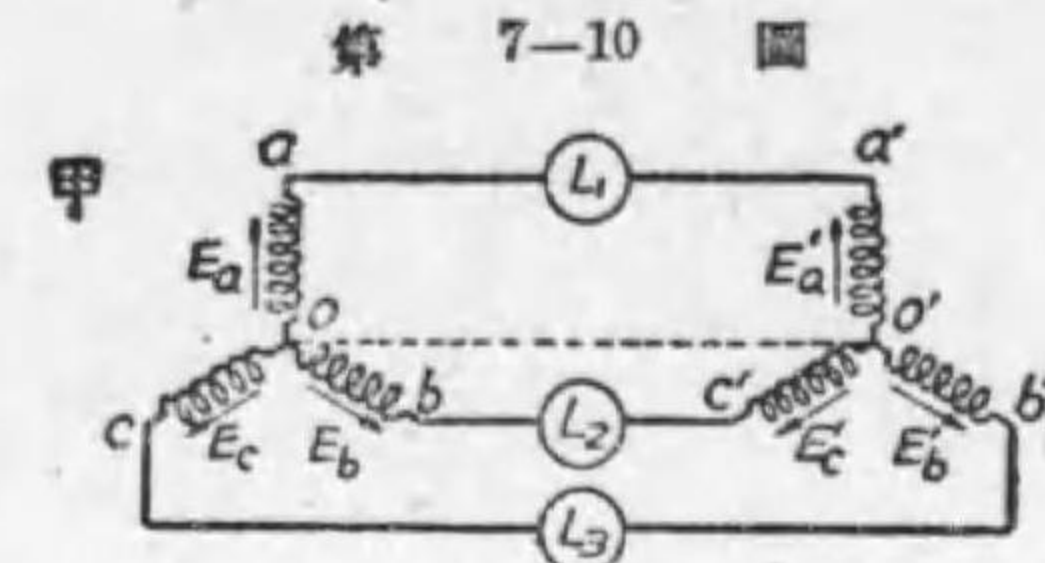
第7-9圖はシーメンス・エンド・ハルスケ (Siemens & Halske) の三相用の同期検定燈の接続である。圖は判り易くする爲め變壓器を除いたものである。三個の電燈 L_1, L_2, L_3 を用ひて L_1 は相對する相に、他の二個 L_2, L_3 は相を入れ違へて接続したものである。第7-10圖甲は更に之れを判り易くする爲の圖であつて、兩機の中性點 O, O' は同電位である。



三相用同期検定燈

甲機の a, b, c 相の起電力ベクトルを E_a, E_b, E_c とし、乙機の a', b', c' 相の起電力ベクトルを $E_{a'}, E_{b'}, E_{c'}$ とし、相順を夫々 $E_a - E_b - E_c$, $E_{a'} - E_{b'} - E_{c'}$ の順とする (乙圖参照)。甲圖より明かなる通り、 L_1 には $E_a - E_{a'}$ なる電圧が與へられ、 L_2 には $E_b - E_{c'}$ なる電圧が與へられ、 L_3 には $E_c - E_{b'}$ なる電圧が與へられる。之れ等 L_1, L_2, L_3 に與へられる電圧のベクトルを夫々 E_1, E_2, E_3 とせば、

$$E_1 = E_a - E_{a'}, \quad E_2 = E_b - E_{c'}, \quad E_3 = E_c - E_{b'}$$



三相同期検定燈説明圖

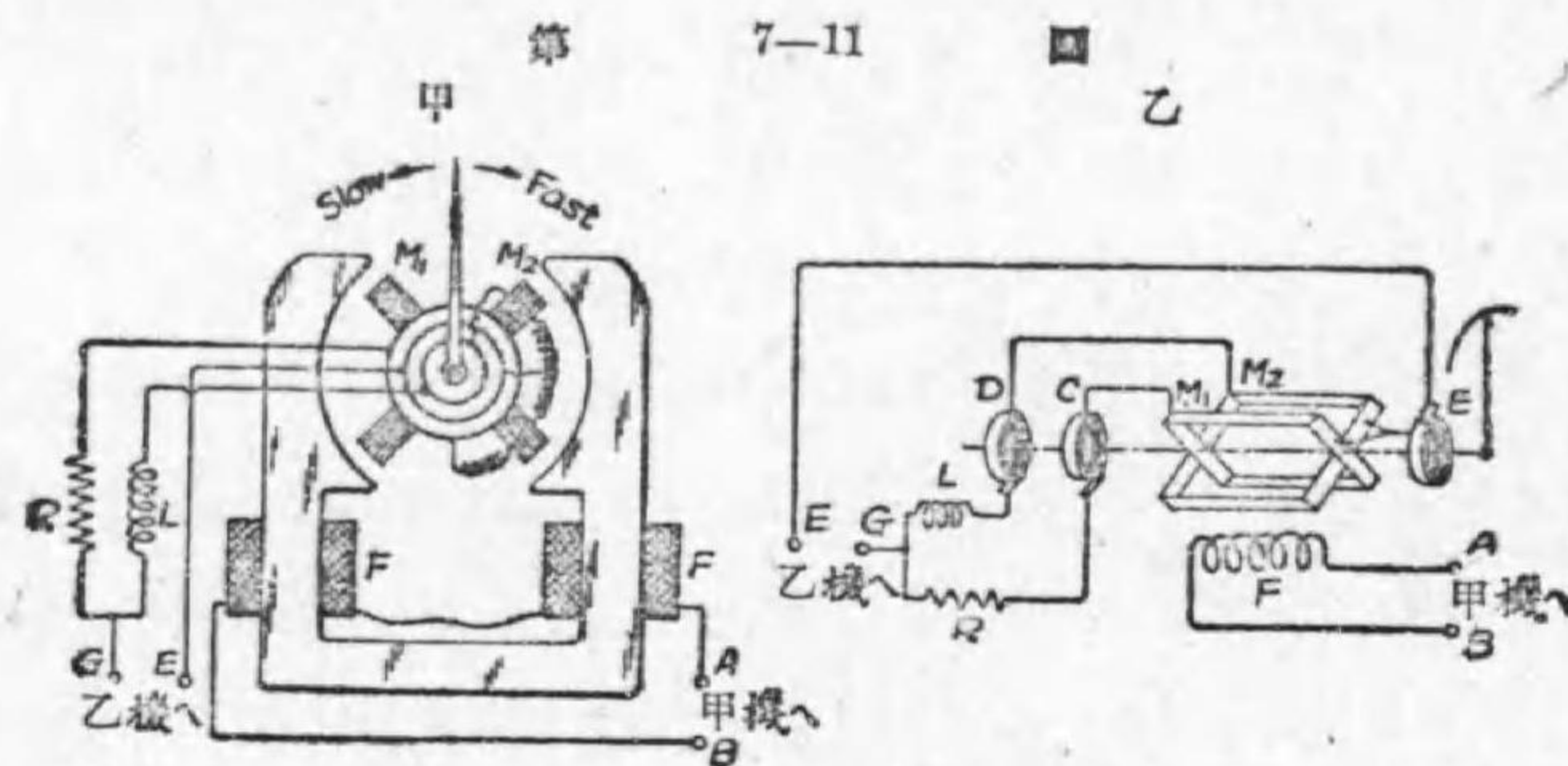
甲乙兩機が周波數等しく且つ位相が一致せる場合即ち同期の場合はベクトルは丙圖に示す様になる。従つて此の場合は $E_1=0, E_2$ 及び E_3 の値は何れも線間電壓 E' に等しい。即ち星形電壓 E_a の値の $\sqrt{3}$ 倍に等しい。斯様に同期の場合は L_1 の電燈は消え、 L_2, L_3 は $E' = \sqrt{3} E_a$ なる線間電壓を受けて同等に明るいのであるから、此の場合に第7-9圖に於ける主開閉器を閉ぢればよい譯である。

若し兩發電機が周波數等しくて位相が違ふ場合例へば、乙發電機が甲發電機より δ だけ位相が進んで居る場合は丁圖に示すベクトル關係を得る。此の場合は L_1 は點火し、 L_2 は前より薄暗くなり、 L_3 は前より増して明るくなる。

若し又兩機の周波數が違つて、例へば乙發電機が甲發電機より回轉が速過ぎる場合は、丁圖に於ける δ が時間と共に變はる。即ち丙圖のやうに位相が一致して居た瞬時 (即ち $\delta=0$ の瞬時) より次第に δ の値が増して行くから、 E_1 は零より次第に増し、 E_2 は E' より次第に減じ、 E_3 は E' より次第に大になる。従つて此の場合に電燈は L_1, L_2, L_3 の順序に滅火を繰り返へす。反對に若し乙機が甲機より速度が遅過ぎると電燈滅火の順序は $L_1, L_3, L_2, L_1, L_3, L_2$ の順になる。即ち電燈の滅火の順逆により乙機

の速い遅いが判る譯である。又電燈の明滅の速さが大なる程甲乙兩機の周波数の差の大なる事を意味し、明滅の速さの緩慢なる程兩機の周波数が近づいて居る事を意味する。要するに L_1 が消えて L_2, L_3 が同一光力である場合に兩機は同期であるから此の時に乙機の主開閉器を閉ぢればよい。

(ロ)リンコルン型同期検定器 第7-11圖甲はゼネラル電気会社のリンコルン型同期検定器 (Lincoln-type synchroscope) の原理を示すもので



リンコルン型同期検定器の原理

ある。これは根本原理に於ては単相力率計と同様である。 F は成層鐵心に巻かれた固定線輪で、その端子 $A B$ を既に運轉中なる發電機 (甲) 又は母線に接続する。 $M_1 M_2$ は可動線輪で、これはボールベアリング (ball bearing) の中で自由に回轉し得る心棒に取付けられ、電流は同一軸に取付けられた三つの集電環 (slip ring) C, D, E 及び之れ等に接する刷子から導かれる。乙圖は之れを判り易くした接続圖である。 M_1 には抵抗 R を直列に、又 M_2 にはインダクタンス L が直列に接続され、之れ等が並列に接続されてその $G E$ 端子を並行運轉をせんとする交流機乙に結ぶ。

單相力率計の原理と同様に、固定線輪 F の作る交番磁界と可動線輪の

作る回轉磁界との作用により動作するものである。故に甲乙兩機の周波数が等しければ單相力率計と全く同様に、可動線輪は兩機の電壓の位相差に應じた或る一定の位置を取つて靜止する。従つて今兩機の周波数が相等しく且つ位相が一致して居る場合即ち同期である場合に、指針が直立の位置を取る様に指針を軸に取付けて置けば、指針が此の直立の位置で靜止せる場合は甲乙兩機の同期になつたことを示し得る譯である。

若し指針が此の直立以外の他の位置即ち右又は左に傾いて靜止して居る場合は甲、乙兩機の間には周波数は等しいが位相は一致して居ない事が判る。而して指針が右に傾いて居る時乙機が甲機より位相が進んで居るとすれば、反對に指針が左に傾いて居る時は乙機が甲機より位相が遅れて居る事を意味するのである。若し又周波数が等しくなければ、甲乙兩機の位相は時々刻々と變はつて行くから、之れに應じて可動線輪は位置を變じて行くから軸の周りに回轉する譯である。若し指針の回轉が時計式方向の時乙機の方が速過ぎるならば、反對に指針が反時計式方向に回轉する場合は乙機の方が遅過ぎる事を意味する。而して兩機の周波数の差が大なる程、指針の回轉速度も大で、周波数の差が小なる程、指針の回轉速度も小になる。

要するに、乙機の方の速度を調整して、検定器の指針の回轉が次第に小になれば、甲乙兩機の周波数が近づいて來た事になり、指針が右又は左の或る位置に靜止して居る時は周波数は一致せるも兩機の方に相違がある事になり、指針が直立して居れば兩機は同期になつたことを示すのである。

(ハ)ウェストン同期検定器 第7-12圖甲はウェストン同期検定器 (Weston synchroscope) で、乙圖はその原理を示すもので、之れは一種

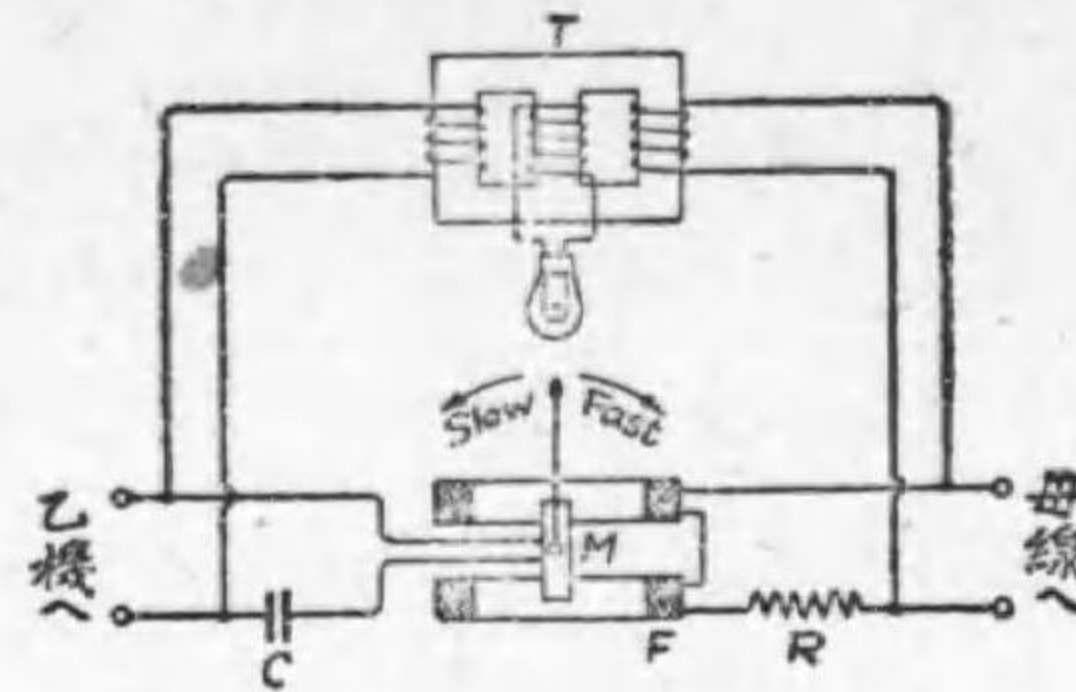
の弾條制御電流計である。 F が固定線輪で直列抵抗 R が接続され母線

第 7-12 圖 甲



ウェストン同期検定器

第 7-12 圖 乙



ウェストン同期検定器の原理

間 (又は既に運轉せる甲發電機) に接続し、又 M は可動線輪で蓄電器 C が直列に接続され、新に並列に接続さるべき乙發電機の電壓を與へる。可動線輪に取付けられた指針は制御彈條の作用により可動線輪に働くトルクが零なる場合に直立の位置を取る様に作られて居る。指針の前面に半透明の目盛盤があり、其の背後には同期検定用變壓器 T の二次線輪に接続された電燈があり、電燈により照らされる時のみ指針の位置が判る様になつて居る。〔電燈の接続は第 7-8 圖と同様である〕。

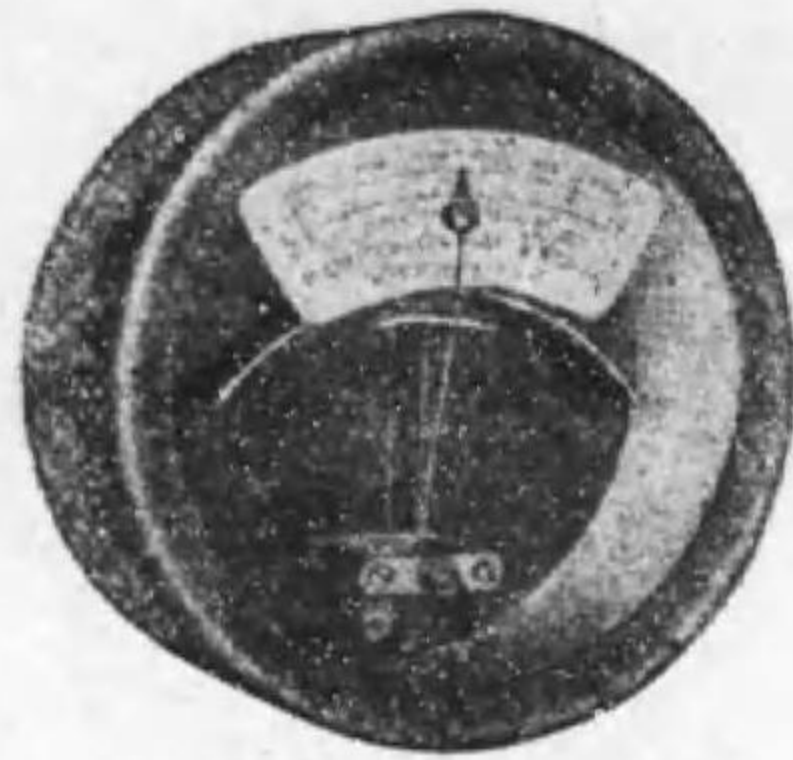
固定線輪 F には抵抗 R が接続されて居るから、 F の電流は殆んど母線電壓と同相である。又可動線輪 M の電流は蓄電器 C があるため、乙機の電壓より殆んど 90 度進む。〔 R, C は、固定線輪回路 (FR) と可動線輪回路 (MC) とを並列に接続して同一電壓を與へた場合に兩回路の電流が 90 度の相差を有する様な適當の値のものを用ひてある。〕従つて母線電壓と乙機の電壓とが同期の場合には F 及び M の電流は 90 度の相差があるから、可動線輪に働くトルクは零で指針は圖に示す様に中央を指す。

而して此の時には電燈は最も明るい。若し又母線電壓と乙機電壓とが 180 度の場合にも F 及び M の電流は 90 度の相差を有するから指針は中央を指すが、此の場合には電燈は消えて居るから指針が見えないのである。故に指針が中央を指して之が見えて居る場合が同期であるから、乙機の主開閉器を閉ぢればよいのである。又兩機の周波数が違つて居る場合には電燈は明滅を繰返へし、 FM の電流は相差が刻々に變化するから可動線輪に働くトルクは正、零、負と値が交互に變はり従つて指針は左右に動揺する。例へば乙機が速過ぎる場合は指針が右へ動く時に電燈が點火し、指針が左へ動く時に電燈が消えるから、目盛盤上では指針が右へ廻る様に見えるのである。又兩機の周波数が等しくて位相が異なつて居る場合には、その相差に應じた位置に指針は靜止し、電燈も相差に應じた一定の弱い光力で以つて照らして居る。而して指針が中央より右にあるか又は左にあるかによつて機の位相が進んで居るか又は遅れて居るかを示すのである。

5. 靜電檢漏器 電線路の絶縁が悪くなつて漏電のある場合には送電する譯に行かないから、此の漏電を検する檢漏器が必要である。茲に高電壓回路に用ひられる靜電 \times 壓計と同様な原理を用ひた靜電檢漏器 (electrostatic ground detector) を二三説明しよう。

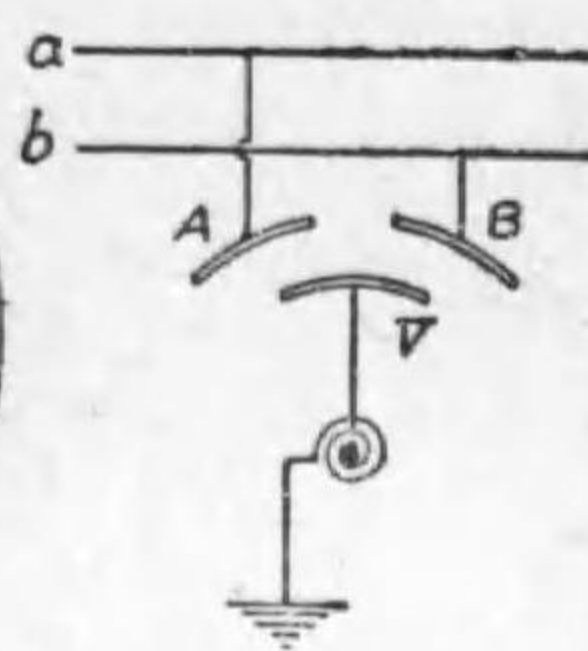
第 7-13 圖甲及び乙はウェスチングハウス会社の單相用檢漏器を示す。 A, B は二枚の固定アルミニウム片で夫々線路 a, b に接続される。 V は可動アルミニウム片で、之れを大地に接続する。固定片と可動片間の吸引力は其の間の電壓の自乗に比例する。従つて a, b 線から大地に漏電がない場合は、 a と大地間の電壓は b と大地間の電壓と等しく、 ΔV 間の引

第 7-13 圖 甲



ウェスチングハウス
社製単相用静電検漏器

第 7-13 圖 乙



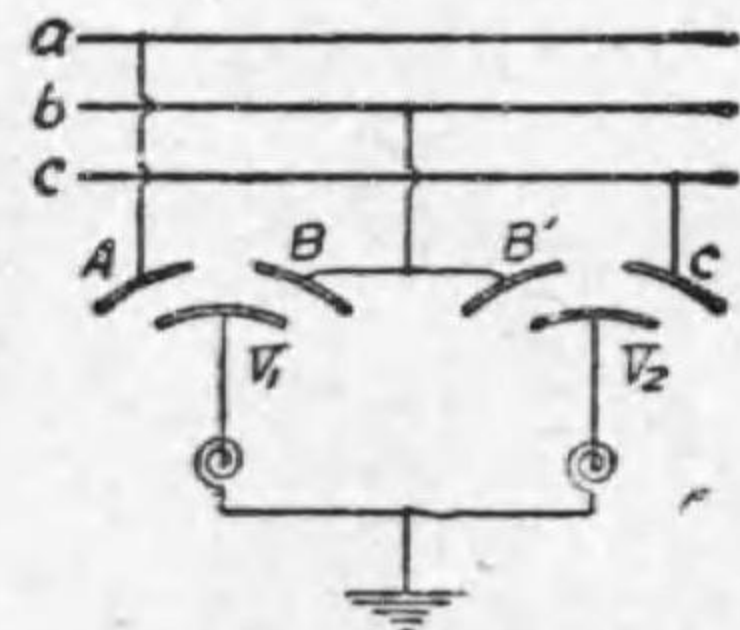
単相用静電検
漏器の接続図

力と BV 間の引力とは等しいから可動片 V は圖に示す中央の位置に静止して居る。若し a 線に漏電があると、 AV 間の電圧が低く、 BV 間の電圧が高くなるから、 A の V を吸引する力よりは B

の V を吸引する力が大となり可動片 V は右側に傾く。反対に b 線の絶縁が悪い場合は V は左側に傾く。可動片 V の軸には指針が取付けられ之れに對して目盛盤があるから、その指針の傾斜によつて a, b 何れの線に漏電があるかが判るのである。

第 7-14 圖は単相用検漏器二個を三相用とした場合の接続圖である。此の場合に a 線に漏電があれば V_1 は右に振れ、又 b 線に漏電がある場合は V_1 は左に、 V_2 は右に振れる。又 c 線に漏電があれば V_2 は左に振れる。

第 7-14 圖



単相用静電検漏器二
個を三相回路に使用

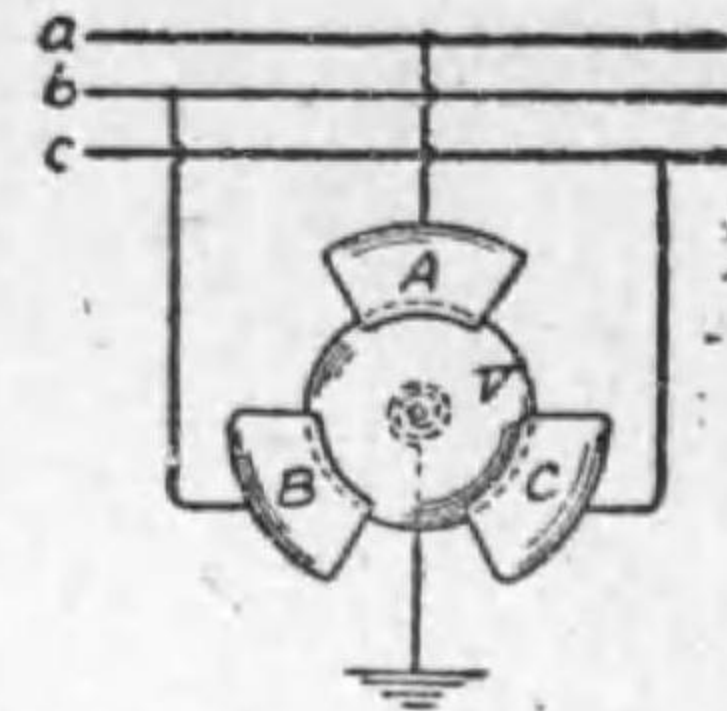
第 7-15 圖甲及び乙はウェスチングハウスの三相検漏器で、 A, B, C 三個の固定金屬片が夫夫三相式三線 a, b, c に接続され、之れに對し接地された可動金屬片 V が装置されて居る。各線の絶縁が等しい時には各固定片と可動片との間の吸引力は等しいから V は中央にあるが、一線 a の絶縁が悪い場合には、 AV 間の電圧小、 BV, CV 間の電圧大となり従つて V は A を遠ざかり B

第 7-15 圖 甲



ウェスチングハウス
社製三相用静電検漏器

第 7-15 圖 乙

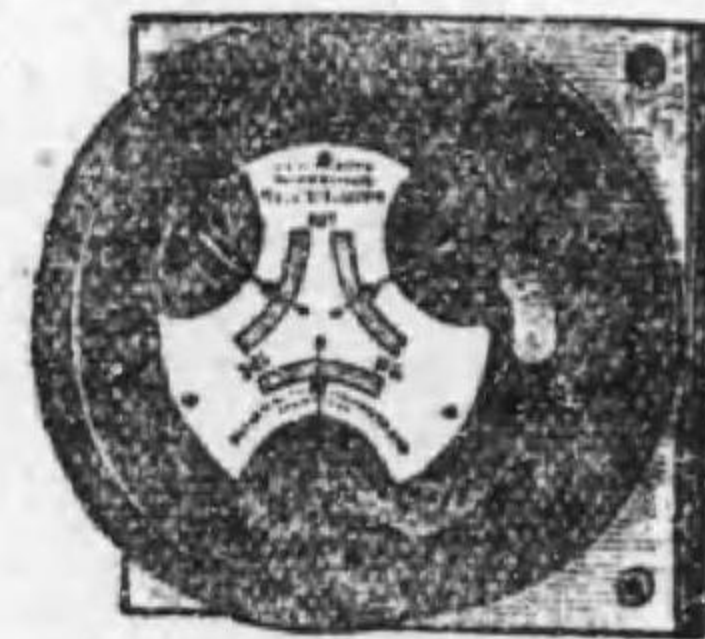


三相用静電検
漏器の接続圖

C の中間に傾くのである。

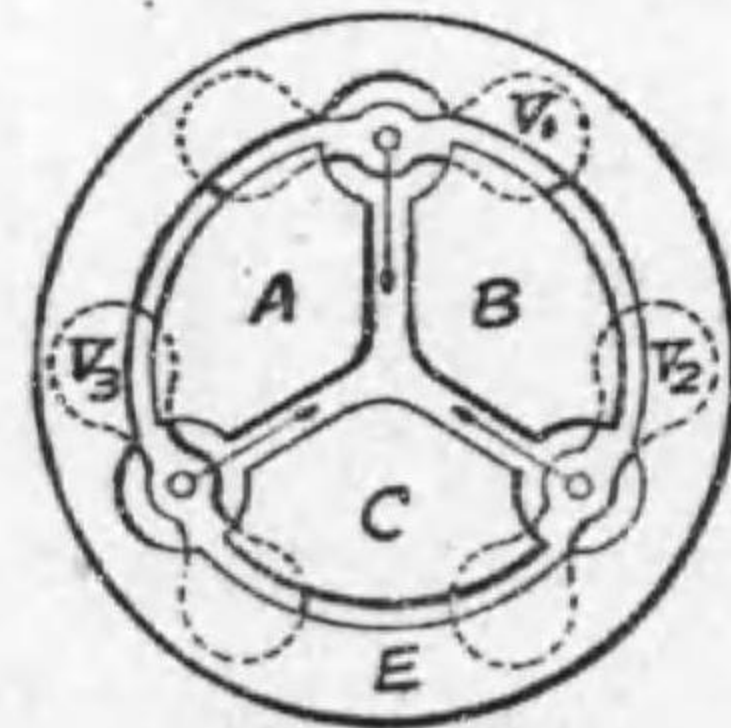
第 7-16 圖甲乙はゼネラル電気会社の三相検漏器を示すもので、 A, B, C は三個の固定金屬板で、圖には示してないが夫々三線 a, b, c に接続する。

第 7-16 圖 甲



ゼネラル電気会社三相検漏器

第 7-16 圖 乙



別に各象限の周圍に一個の環狀片 E を置き之れを接地し、各固定象限の中間に在る可動片 V_1, V_2, V_3 も E と共に接地される。各線 a, b, c の絶縁が等しい場合は、各可動片と固定片間の電圧等しく従つて可動片の指針は圖に示す如く静止して居るが、若し a 線の絶縁が悪くなると、 AV_1

間, AV_2 間の電圧小, BV_1 間, CV_2 間の電圧大となる爲め V_1 は B に吸引され, V_2 は C に吸引され, V_1, V_2 の指針は A 側へ傾くのである。

以上何れも回路の電圧に応じて適当な蓄電器を線と固定板間に接続してある。

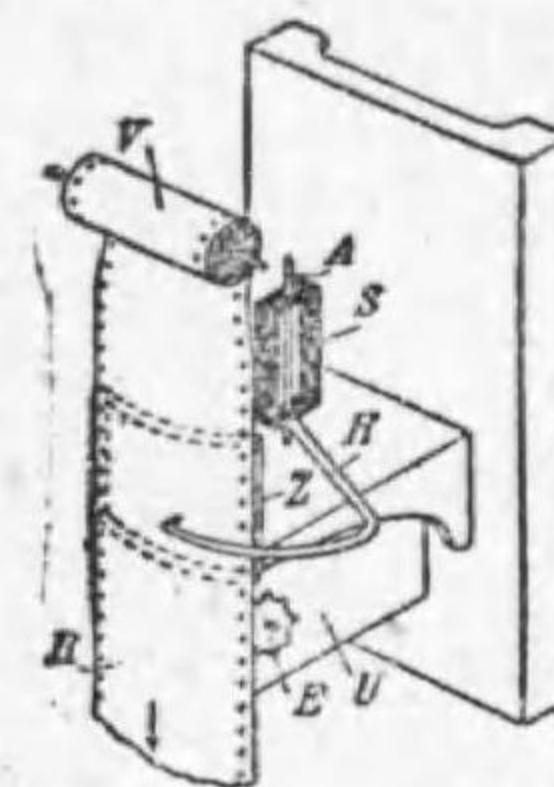
6. 自記計器 或る期間中の発電機の運轉状態を調査したりする様な場合には, 指示計器によつて電圧, 電流, 電力, 力率, 周波数等を十五分毎又は三十分毎に記入した日誌に依るだけでは不充分であつて, 絶えず之れ等の電氣値を記録する計器即ち自記計器が必要になる。自記計器は記録計器又は圖示計器 (curve-drawing instrument) とも稱する。

自記計器の動作の主要部は今迄述べた諸種の指示計器と同一原理で作られるが, 此の外に時計仕掛により一定速度で動きつゝある圖紙 (chart) 上に電氣値を記録する自記装置が必要である。自記計器は自記装置の種類によつて, (a) 記録用ペンを計器の指針の一端に取付け圖紙上に曲線を圖示する直動自記計器 (direct-writing recorder), (b) 記録用針を指針に取付け, 針が一定の時間毎 (例へば 15 秒とか又は 30 秒毎) に圖紙に接觸して點を畫かせる間歇自記計器 (intermittent recorder), (c) 指針は圖紙に接觸せず, 指針と圖紙の下部の導體間に火花を放電せしめて曲線を記録する火花式計器 (spark-recording meter), (d) 別の補助電源により働く繼電器 (relay) によつて記録用ペンを動作せしむる繼電器型自記計器 (relay-operated recorder) 等がある。此の内 (a) はペスが常に圖紙と接觸して居る爲に摩擦があるから計器主要部のトルクを大にしなければならぬから (b), (c), (d) に比して誤差が大である。茲には (イ) 直

動自記計器と (ロ) 繼電器型自記計器とを説明しよう。

(イ) 直動自記計器 普通の指示計器回轉軸に記録用ペンを取付けると簡単に自記計器を作り得る譯であるが, その儘ではペンが圓弧運動をするから, 圖紙上の記録曲線から簡単に平均値等を求める事が出来ない。仍つて

第 7-17 圖 甲 時間に對し被测値が直角座標式の自記計器が望ましい



ハートマン・
エンド・ブラウ
ン會社自記
計器の原理

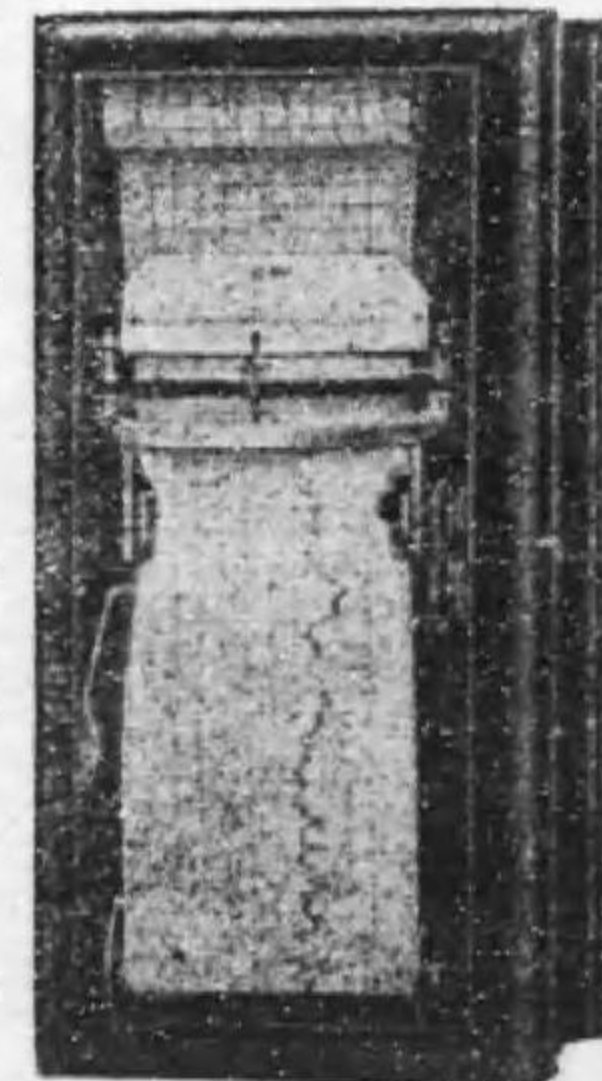
のである。第 7-17 圖甲は獨逸ハートマン・エンド・ブラウン會社の直角座標式の自記計器の自記装置の原理を示すものである。圖紙 R を卷筒 V より垂直に下方へ時計仕掛 U 及び E に依り移動せしめおき, その途中に計器の回轉部分 S の回轉軸 A を中心とせる圓筒片 Z を置いて之れに接する部分の圖紙を圓筒状ならしめ, アルミニウム製の鈎形指針 H を運動せしめるものである。乙圖は此の原理による自記電力計を示す。

鈎形指針の下方に記録用ペンを取付けある故下方に動く圖紙上に電力曲線を畫く。又鈎形指針の上方には指針が取付けられ, 之れに對し目盛盤を有する故之れにより電力を示すのである。

(ロ) 繼電器型自記計器 之れは記録用ペンと圖紙との間の摩擦により生ずべき誤差を除く爲に, 他の補助電源よりエネルギーを供給して繼電器を以つてペンを動作せしめ, 計器自身の消費電力を軽減せしむる方法である。

第 7-18 圖はウェスチングハウス繼電器型自記電

第 7-17 圖 乙



ハートマン・エ
ンド・ブラウ
ン會社自記電力計