

# 交 流 計 算 盤

山 田 太 三 郎

送電線系統につながる多数の発電所と、大小種々の需要負荷。この間の電力の需給を経済的に行うことは実はなかなか面倒な問題であり、バランスのとれた設計、運営を行うことのもたらす利益は、電源そのものを増すことにおとらぬ重要な問題である。たとえばこれによつて総発電量 500 萬キロの 20% 有効な電力を生かすことができれば 100 萬キロの電力が浮くことになる。このような目的の計算を行うのが交流計算盤の生れた理由であるが、さらに廣く理工學の諸計算にも應用できるという二重の恩恵をもたらすものがこの交流計算盤である。

## 1. 緒 言

工學上の問題を解決する手段として模型による相似論的研究法が廣く行われている。例えば船舶工學の水槽試験、航空工學の風洞試験等がこれであるが、電氣工學でも、多数の発電所と大小様々の需要家の負荷、これを連絡する複雑な送電、配電網から成る電力系統につき、種々な条件下における正確な知識を得るためには模型による研究が必要である。「交流計算盤」(A.C. Network calculating board, または A.C. Network analyzer または A.C. Network calculator) は電氣工學における一つの模型として誕生し、電力系統運用上の問題および新設送電線に対する設計上の問題を解決する有力な手段であることが實證された。交流計算盤の運用の技術が進むに従つて、交流計算盤を単に電氣工學上の問題ばかりでなく、廣く工學上の問題を解く計算器として使用する傾向も生じたが、ANACOM (Electric analog computer) がこれであつて、電氣的等價回路として表現可能な問題、例えば熱傳導の問題、振れ振動の問題等に應用されるに至つた。交流計算盤は 1929 年 MIT (GE と共同) および Westinghouse に初めて建設され、現在世界中では總數三十數臺におよんでいる。わが國でもこの必要性は古くから認識され、計畫されたこともあつたが、種々の事情により實現を見るにいたらず今日におよんだが、1951 年 10 月初めて工業技術廳電氣試験所に國産(三菱電機製)のものが設置された。

## 2. 交流計算盤の設計

(1) 交流計算盤は電力系統の模型であるといつてもその機械的の性質(發電機、電動機の慣性)をも模擬させるためには莫大な經費を要するので、電氣的相似性のみ

を有する縮小模型である。従つて發電機の模型としては任意の大きさおよび位相を有する電壓を發生する装置であれば充分である。だから交流計算盤の發電機單位としては電壓調整器と位相調整器とを組合せた、「靜止機械」回轉部を含まない)を用いる。

(2) 交流計算盤は本來複雑な電力系統を對象としているので要素の数はなるべく多数あることが望ましい。従つて各要素はできるだけ小型、安價であることが重要な問題である。所要の  $\Omega$  數のリアクタンス、キャパシタンスを有する要素を作るのに、使用周波數を上げればインダクタンスおよびキャパシタンスは小となりとなり小型にし得ることは明瞭で、この意味では周波數は高いほど望ましいが、あまり高い周波數では測定精度、相互誘導の問題で難點を生ずる。現在の技術では 400~500 サイクルが最良と考えられているが、例外としては 10,000 サイクルを用いたものもある。

(3) 現在の電力系統は三相回路が基本であるが、交流計算盤で三相回路そのままを表現すれば、多数の要素を要するので、基本として單相回路で模擬する。平衡した平常時の三相電力系統を單相回路で模擬できることは周知のことがらであるが、故障等により不平衡を生じた三相電力系統に對しても、對稱座標法その他の變換法を用いて、三相回路の單相表示は可能であるので、交流計算盤で單相回路を基本として用いても大部分の問題に對しては何等の不都合を生じない。

(4) 縮少比の問題は交流計算盤では比較的樂な問題である。すなわち、電力系統の電壓電流に對して、それぞれ異なる縮少比を採用しても換算が可能であるので、交流計算盤の基準電壓、電流、インピーダンスの中、二つは製作上最も有利なものを採用することができる。現在のものでは、100 V 1 A (従つて 100  $\Omega$ ) 基準 (Westinghouse), 50 V, 50 mA (従つて 1000  $\Omega$ ) 基準 (G.E.) の二種類のもの廣く行われている。前者では、基準電流が大きいので設備がやゝ大型となる反面、直接計器を挿入しても回路に對する攪亂が少く、例えば發電機單位の諸量等は直接計器を挿入して測定する方法が採用されている。後者では小型となる反面常に増幅器付計器を用いなければならない。

## 3. 電氣試験所の交流計算盤

交流計算盤は各部より成つている。電源部 (三相 500 サイクル, 200 V を發生する)。計測機 (各單位の電氣量

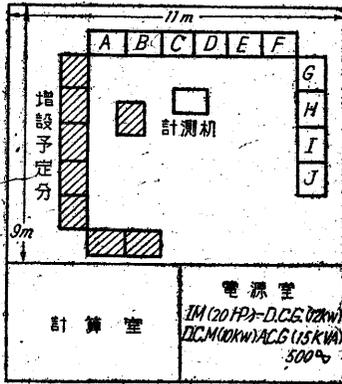
第1表 電気試験所交流計算盤施設計画

単位名 年度	電源	計測機	発電機 単位	発電機 リアクター 単位	線路 単位	負荷 単位	負荷 調整器	キャパシタ ンター 単位	単 捲 変 壓 器	相 互 結 合 単 位	總計
昭和 25	1	1	9	9	80	24	24	64	18	15	226
" 26	0	0	9	9	20	12	8	52	18	12	122
" 27	0	1	0	0	20	0	4	10	0	12	46
合計	1	2	18	18	120	36	36	126	36	40	394

すなわち電圧、電流の大きさおよび位相を測定するベクトル計器、電圧、電流、電力、無効電力の大きさを測定するスカラー計器、および上記計器を各単位に接続するための選擇繼電器より成つている。発電機単位(発電所を代表するもので電圧調整器と位相調整器より成る)。線路単位(送配電線および変圧器インピーダンスを代表するRとLの直列回路)

負荷単位(直並列に切換可能のRとLの回路) 負荷調整器単位(線路電圧變動に無關係に一定な負荷を代表させるために負荷單位に附屬して使用するもので、タップ付單捲變壓器と二次側に接続された電圧計より成り、線路電圧變動の際はタップを切換えて二次電圧を一定、すなわち負荷單位にかゝる電圧を一定にするように調整する)。キャパシタ単位(送電線の並列容量および調相設備を代表する)。單捲變壓器單位(變壓器タップを代表する)。相互結合單位(回線間相互結合および對稱分回路間の結合に用いる)。接続盤(各單位の正、負端子に接続されてゐる一對づつのプラグとプラグを隣合せに挿入することによりプラグ間の接続を行うジャックとより成る)。

第1圖は電気試験所交流計算盤の配置圖、第2圖は各單位の配置圖、第1表は施設計畫である。第1圖の斜線部は第1表中26,27年度における増設計畫に對應



第1圖 交流計算の配置圖

するものである。第2表は各單位の性能一覽表であり第3圖は各單位の結線圖である。

(1) 発電機單位 接続は第3圖(a)の通りであつて勵磁アドミッタンスと漏洩インダクタンスをコンデンサーで補償し、電圧變動率をできるだけ良くしている。同一圖の回路では電圧調整器で電圧を調整すると位相角も變化し、使用上不便であるので、位相および電圧調整を獨立して行い得るよう變更する計畫である。

第2表 各單位の性能

單位名	調整範圍	最小調整段	精 度
發 電 機	0~360 度 0~400 V	連 續	
發電機リアクター	0~500 Ω	0.2 Ω	±1.5%
線 路	抵抗 0~150 Ω リアクタンス 0~160 Ω	0.2 Ω 連 續	同上
負 荷	抵抗 0~3000 Ω リアクタンス 0~2400 Ω	2 Ω 連 續	同上
キャパシタ(大)	0~164 μF	4 μF	同上
キャパシタ(小)	0~4 μF	0.01 μF	同上
單捲變壓器	±20%	0.5%	比誤差 0.5% 以下
相互結合	1:1 1:√3 1:2		同上

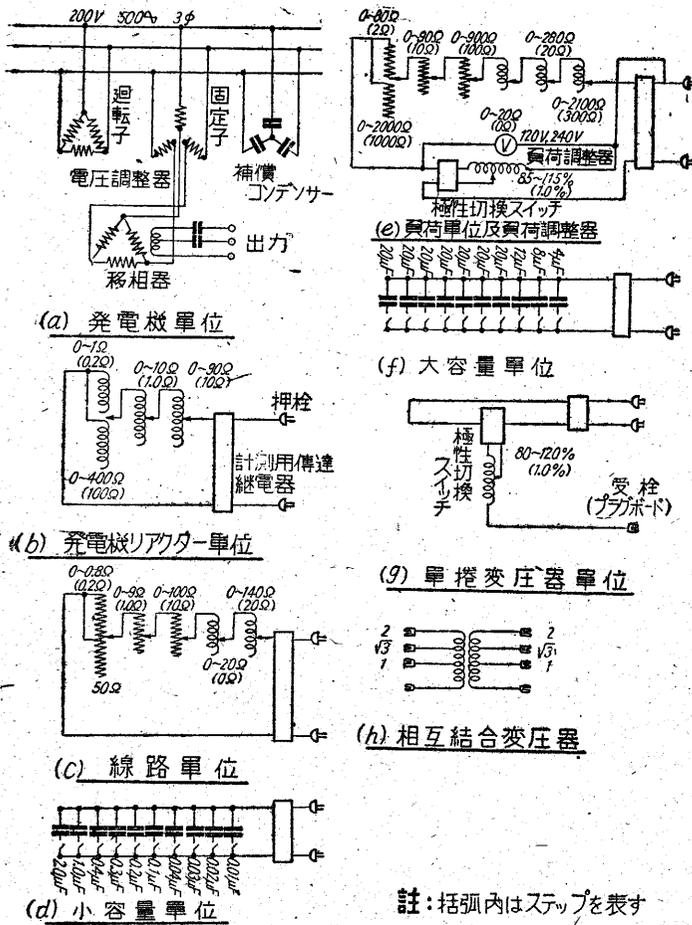
(2) 線路單位および負荷單位用リアクター リアクト

G <sub>1</sub>	G <sub>4</sub>	G <sub>7</sub>				L <sub>1</sub> L <sub>5</sub>	L <sub>9</sub> L <sub>13</sub>	1 6	11 16	21 26	31 36						
G <sub>2</sub>	G <sub>5</sub>	G <sub>8</sub>				L <sub>2</sub> L <sub>6</sub>	L <sub>10</sub> L <sub>14</sub>	2 7	12 17	22 27	32 37						
G <sub>3</sub>	G <sub>6</sub>	G <sub>9</sub>			P.B. No. 1	L <sub>0</sub> A	L <sub>0</sub> A	3 8	13 18	23 28	33 38						
X <sub>1</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>7</sub>				L <sub>3</sub> L <sub>7</sub>	L <sub>11</sub> L <sub>15</sub>	4 9	14 19	24 29	34 39						
X <sub>2</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>8</sub>				L <sub>4</sub> L <sub>8</sub>	L <sub>12</sub> L <sub>16</sub>	5 10	15 20	25 30	35 40						
X <sub>3</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>9</sub>			M <sub>1</sub> M <sub>2</sub> M <sub>3</sub> M <sub>4</sub>			C <sub>1</sub> C <sub>4</sub>	C <sub>7</sub> C <sub>10</sub>	C <sub>13</sub> C <sub>16</sub>	C <sub>19</sub> C <sub>22</sub>						
					M <sub>5</sub> M <sub>6</sub> M <sub>7</sub> M <sub>8</sub>			C <sub>2</sub> C <sub>5</sub>	C <sub>8</sub> C <sub>11</sub>	C <sub>14</sub> C <sub>17</sub>	C <sub>20</sub> C <sub>23</sub>						
								C <sub>3</sub> C <sub>6</sub>	C <sub>9</sub> C <sub>12</sub>	C <sub>15</sub> C <sub>18</sub>	C <sub>21</sub> C <sub>24</sub>						
A			B			C			D			E			F		

L <sub>17</sub> L <sub>19</sub>	L <sub>21</sub> L <sub>23</sub>					41 46	51 56	61 66	71 76		
L <sub>18</sub> L <sub>20</sub>	L <sub>22</sub> L <sub>24</sub>					42 47	52 57	62 67	72 77		
L <sub>0</sub> A	T <sub>7</sub> T <sub>11</sub> T <sub>15</sub> T <sub>8</sub> T <sub>12</sub> T <sub>16</sub>				P.B. No. 2	43 48	53 58	63 68	73 78		
T <sub>1</sub> T <sub>3</sub> T <sub>5</sub> T <sub>2</sub> T <sub>4</sub> T <sub>6</sub>	T <sub>9</sub> T <sub>13</sub> T <sub>17</sub> T <sub>10</sub> T <sub>14</sub> T <sub>18</sub>					44 49	54 59	64 69	74 79		
C <sub>61</sub> C <sub>62</sub>	C <sub>63</sub> C <sub>64</sub>					45 50	55 60	65 70	75 80		
C <sub>25</sub> C <sub>28</sub> C <sub>26</sub> C <sub>29</sub> C <sub>27</sub> C <sub>30</sub>	C <sub>31</sub> C <sub>34</sub> C <sub>32</sub> C <sub>35</sub> C <sub>33</sub> C <sub>36</sub>	M <sub>9</sub> M <sub>10</sub> M <sub>11</sub> M <sub>12</sub>	M <sub>13</sub> M <sub>14</sub> M <sub>15</sub> M <sub>16</sub>			C <sub>37</sub> C <sub>40</sub> C <sub>38</sub> C <sub>41</sub> C <sub>39</sub> C <sub>42</sub>	C <sub>43</sub> C <sub>46</sub> C <sub>44</sub> C <sub>47</sub> C <sub>45</sub> C <sub>48</sub>	C <sub>49</sub> C <sub>52</sub> C <sub>50</sub> C <sub>53</sub> C <sub>51</sub> C <sub>54</sub>	C <sub>55</sub> C <sub>58</sub> C <sub>56</sub> C <sub>59</sub> C <sub>57</sub> C <sub>60</sub>		
G			H			I			J		

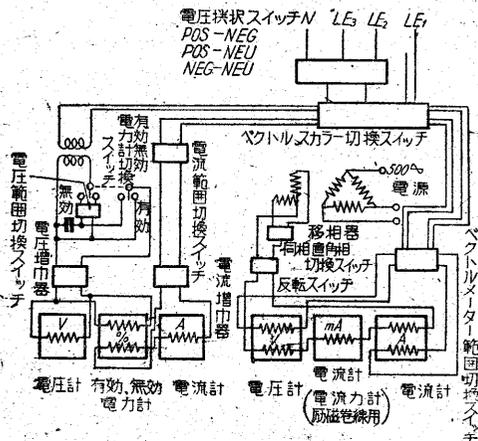
G 發電機單位  
X 發電機リアクター單位  
番號のみ 線路單位  
L 負荷單位  
M 相互結合單位  
C キャパシタ單位  
P.B. ブラックボード  
T 單捲變壓器單位  
L<sub>0</sub>A 負荷調整器

第2圖 各單位の配置圖



第3圖 各単位の結線圖

ターをできるだけ純粹のリアクタンスにする必要がある  
ので、鐵心にはハイパーニック (49%Fe, 51%Ni) を用  
い、 $R/X$  を大體 3% 以下にするよう努力した。またリ  
アクタンスの電流による變化は例えば 140Ω リアクタ  
ー 100Ω タップでは 0.1A で 100.2Ω, 0.5A で 100.3



第4圖 計測回路結線圖

$\Omega$ , 1A で 100.4, 1.5A で 100.4  $\Omega$  である。  
またリアクターの微細調整部は鐵心の空隙  
を變化してリアクタンスを變化させる方式  
を取り、その調整範圍は 1~5  $\Omega$ , および  
4~20  $\Omega$  である。

(3) 線路單位および負荷單位抵抗器

ベークライトボビンに綿卷ユリカ線を無  
誘導巻したものを使用しているが、増設分  
には耐久性の觀點から珪礫引を採用する豫  
定である。

(4) 計測機 スカラー計器およびベク  
トル計器の結線圖を第4圖に示す。スカラ  
ー計器は増幅器付であつて、電壓用に 1mA  
のデイバイダー、電流用に 60mV のシヤ  
ントを用い回路におよぼす影響は無視でき  
るようになっている。電力計兼無効電力計  
も増幅器の出力側でも電流計および電壓計  
に直列に接続されている。またベクトル計  
器はワットメーター型の電流計および電壓  
計よりなり、計器の一方のコイルは 500 サ  
イクル電源に直結する位相調整器により勵  
磁され、他方のコイルは回路電壓および電  
流により勵磁される。計器の負擔の大部分  
は位相調整器より供給され、回路から取る  
エネルギーは小さい。上記の回路を回路に挿  
入するために各單位呼出用押釦があり、繼  
電器の動作により計器を任意の單位に接続  
できるようになっている。計器の性能は第  
3表の通りである。

第3表 計器の性能

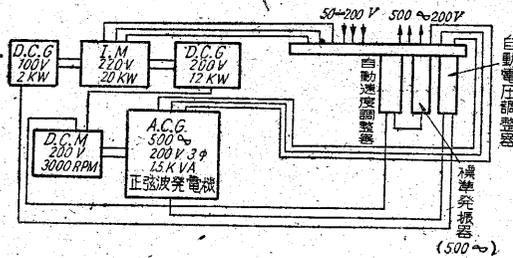
(イ) スカラー測定裝置

1. 電壓計、電流計、電力計(兼無効電力計)はすべて 0.5 級とし電力計  
および電壓計に對する電壓増幅器が回路から取る電流は 0.001A、  
電壓感度は 1000  $\Omega/V$  とし、分壓器電壓降下は 0.06V 以下と  
する。
2. 電壓増幅器、電流増幅器、分壓器、分流器精度は比較差  $\pm 0.5\%$   
以内、位相誤差 30 分以内とする。

(ロ) ベクトル測定裝置

1. 電壓計、電流計は 0.5 級とし、電壓計が回路から取る最高電流は  
0.005A 以下、感度は 120  $\Omega/V$  とし、電流計による電壓降下は  
0.06V 以下とする。
2. 標準位相器  
電壓計、電流計の勵磁コイルに對し標準電流 100mA を供給す  
るまたダイヤルおよび副尺によつて 10 分まで精密によみとり、  
精度は 10 分以内とする。

(5) 電源部、電源部の構成を第5圖に示す周波數を  
安定にするため誘導電動機驅動直流發電機により直流を  
發生し、これが直流電動機驅動 500 サイクル交流發電機  
に給電する。自動電壓調整器、自動速度調整器を備えて  
いる。500 サイクル交流發電機の性能は 5kW 單相負荷  
で周波數變動  $\pm 0.2\%$  以下、電壓變動 0.5% 以下、電壓



第5圖 電源部の構成

不平衡率 1% 以下高周波含有率基本波の 1.5% 以下である。

4. 交流計算盤の用途

交流計算盤は本来電力系統問題を等価交流回路網問題として取扱うものであるが、容易にわかるようにどんな種類の問題でも等価回路網が得られるならば交流計算盤で解き得るのである。さらに、交流計算盤は或周波数範囲では比較的優れた精度を有する抵抗、インダクタンス、キャパシタンスを多数有しているの、これらによつて組立てられた電気回路に過渡現象をおこさせた場合主な周波数成分が上の周波数範囲に入れば相当信頼のおける過渡現象的な解を得ることもできる。

このようにあまり高い精度を要求するのでもなければ広い範囲にわたつた各種問題を簡単に、しかも迅速に扱うことができるが、ちなみに米國、英國において交流計算盤の使用時間の各種問題への割りふりは第4表の通りである。

第4表 交流計算盤の使用実績  
(全使用時間に対する百分率)

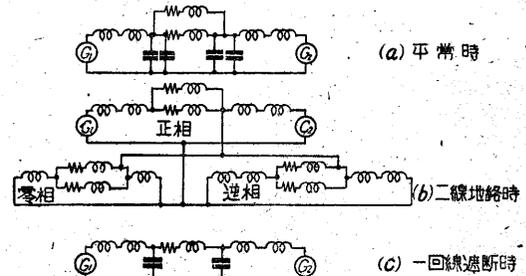
	米國 (1)	米國 (2)	英 國
定常運轉問題	60%	75%	55%
安定度問題	15%	10%	34%
故障問題	5%	10%	10%
その他の諸問題	20%	5%	1%

(1) 定常運轉問題 送電線の電力電流の決定や力率電壓改善用の調相容量の決定、電力系統の連繋方法の決定等の問題であるが、これに關しては多くの説明を要しないと思う。

(2) 安定度問題 前述のように交流計算盤は電力系統の電気的模型であるので、發電機電動機の慣性の影響する安定度の問題の直接の模擬はできない。しかし安定度計算に用いられる段々法 (Step by step method) と同じ過程をふめば可能である。すなわち電力系統に或る攪亂が起つた場合發電機、電動機の機械的入出力と、電気的入出力との間に不平衡を生じ、發電機電動機の位相角の振動を生ずるが、微小時間中は、この入出力の不平衡は一定であるとすれば、微小時間後の位相角は數値計算でき、従つてその新しく計算された位相角を交流計算

盤に入れば微小時間後の系統の模擬ができる。このようにして、計算と交流計算盤の操作を交互に組合せれば位相角振動が計算できるので、安定度問題のように電気一機械的問題が取扱えるわけである。

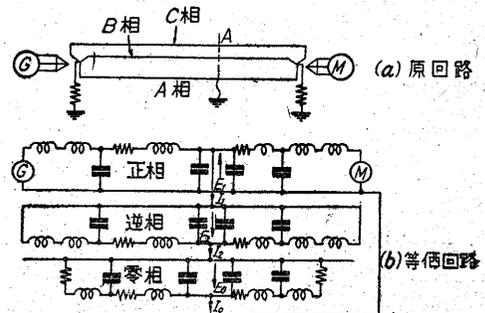
一例として二機系統の二線地絡故障一回線遮断時の計算過程を説明する。第6圖 (a) は平常時、(b) は二線地絡時、(c) は一回線遮断時の等価回路であるが、まず (a) の回路を組立てて發電機単位  $G_1, G_2$  の出力、入力を測定し、次に (b) の回路として同じく  $G_1, G_2$  の出力、入力を測定すれば、(a) および (b) の電力差は上述の出入力の不平衡に相當する。以上のように次々に新しい位相角を (b) の發電機単位に與えれば二線地絡時の位相角および電力動搖が計算できる。故障時間に相當する過程



第6圖 過渡安定度問題説明圖

(普通には 0.05 秒程度を一區間とするので故障時間が 0.05 秒の何倍かによつて、位相角調整の回数が定まる) の復回路を (c) として計算を續行すればよい。これらの計算を全部 hand-calculation で行う場合には、或る位相角における各部の電力の計算には莫大な勞力を使い、五機以上の問題は實際上不可能となるので、安定度問題における交流計算盤の有効性はきわめて大きい。

(3) 故障問題 遮断器耐量を決定する最大短絡電流の決定、一線地絡、二線地絡等の故障電流の分布等の問題がこれである。前述のように交流計算盤は單相回路を用いるので不平衡故障に對しては、對稱座標法 (正相、逆相、零相回路を用いる) Clarke 座標法 ( $\alpha, \beta, 0$  回路を用いる) による變換回路を用いる。



第7圖 一線地絡説明圖

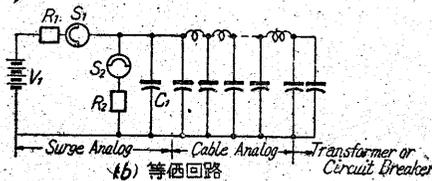
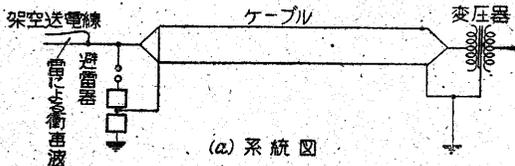
一例として、一線接地時の解法を示すと、第7圖 (a) A 點, A 相の一線地絡では A 點における對稱分電壓, 電流の間には

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_0 + \dot{E}_1 + \dot{E}_2 &= 0 \\ \dot{i}_0 &= \dot{i}_1 = \dot{i}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

の關係があるから等價回路として (b) を得る. 任意の點の故障電流の分布を求めるには, その點の正相, 逆相, 零相電流を對稱座標法の式に従つて綜合すればよい.

(4) 過渡現象 故障および遮斷器開閉時の異常電壓雷の衝擊電壓による機器に加わる過電壓等の問題がこれである. これ等の問題に對しては既述の交流計算盤の各要素の他に, 任意の波形の電壓を發生する裝置, 任意の電壓電流特性を有するインピーダンス要素, 數回の現象を任意の時間間隔で發生し得る同期開閉器等が必要である.

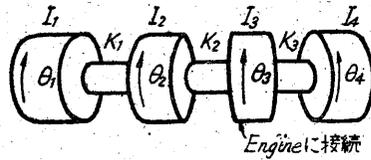
一例として W.H 社で行われた, ケーブルの末端に接続された變壓器を保護するために必要な避雷器の特性を研究した例について述べる. 第8圖 (a) は實際の回路で



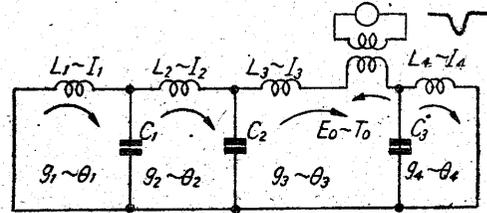
第8圖 過渡現象問題説明圖

第8圖 (b) は等價回路の一例である. 簡單のため變壓器は蓄電器で代表させ, ケーブルは20個のπ回路の從續接続で表現し, またこの等價回路は比較的ケーブルが長く反射波の影響のない場合で, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> なる同期開閉器を用いて電池 V<sub>1</sub> と組合せて電源としている. 圖中の R<sub>1</sub> で波頭峻度を調節し, S<sub>1</sub> 閉路後適當な時間後 S<sub>2</sub> を閉路し, S<sub>2</sub> の閉路後は R<sub>1</sub> と R<sub>2</sub> とで一定の電壓が送端にかゝるようになってゐる. この Analog Computer による實驗結果は計算値と非常によく一致することが報告されている.

(5) 等價回路問題 電氣工學の問題にもあるが, 特に物理, 機械工學上の問題で等價回路に直せるような問題がこれであり, 例えばタービン翼の温度分布. または振れ振動等の問題を電氣的等價回路に直して解決するわけである. 振れ振動を取扱う一例をあげると, 第9圖 (a) のように, I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub> の慣性定數を有する物體が spring constant, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> で連結され, I<sub>3</sub> に或る波形



(a) 構成圖



(b) 等價回路

第9圖 等價回路問題説明圖

の驅動トルクが印加された場合を考えると

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= I_1 p^2 \theta_1 + K_1 (\theta_1 - \theta_2) \\ 0 &= I_2 p^2 \theta_2 + K_1 (\theta_2 - \theta_1) + K_2 (\theta_2 - \theta_3) \\ T &= I_3 p^2 \theta_3 + K_2 (\theta_3 - \theta_2) + K_3 (\theta_3 - \theta_4) \\ 0 &= I_4 p^2 \theta_4 + K_3 (\theta_4 - \theta_3) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

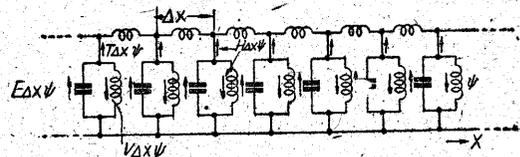
ただし  $p = d/dt$   $\theta$ ... 角度

ここで等價回路においてはインダクタンスを慣性定數にまた K をキャパシタンスに對應せしめれば第9圖 (b) の等價回路ができる. 第9圖 (b) では次式が成立する.

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= L_1 p'^2 q_1 + \frac{1}{c_1} (q_1 - q_2) \\ 0 &= L_2 p'^2 q_2 + \frac{1}{c_1} (q_2 - q_1) + \frac{1}{c_2} (q_2 - q_3) \\ E_0 &= L_3 p'^2 q_3 + \frac{1}{c_1} (q_3 - q_2) + \frac{1}{c_3} (q_3 - q_4) \\ 0 &= L_4 p'^2 q_4 + \frac{1}{c_3} (q_4 - q_3) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

ただし  $p' = d/dt'$

(3) 式で  $p' = d/dt'$  を用いたのは等價回路の L, C を實現可能な値にするため時間の單位を大にするためである. (2) と (3) の對應性から振れ振動の諸性質が解明できるわけで, E<sub>0</sub> には, E<sub>p</sub> 印加トルクに相當する任意の波形の電壓を發生する任意波形電源を用いればよい. また K が  $\theta$  に関し非直線性を有する場合にはキャパシタの代りに非直線要素を用いる. (以下 24 ページへ)



第10圖 等價回路問題説明圖 (Schrödinger の方程式の例)