

直流送電系統の動作特性ならびに三相
他励式インバータ回路に関する研究

成 圭 永

直流送電系統の動作特性ならびに三相 他励式インバータ回路に関する研究

京 都 大 学

成 圭 永

昭和34年10月

DOC
1960
20
電気系

目 次

結 言	1
第1章 直流送電系統の回路構成およびその動作	5
第2章 近似解法による直流送電系統の動作特性の解析	8
第3章 「林の解析法」による直流送電系統の定常現象の解析	24
第4章 直流送電系統の電圧変動時における過渡現象の解析	40
第5章 直流送電系統の起動時における過渡現象の解析	63
第6章 逆変換装置放電管の故障時における過渡現象の解析	79
第7章 順変換装置放電管の逆弧時における過渡現象の解析	109
第8章 低速型電子管式アナログ・コンピュータによる2,3の計算補遺	125
結 言	136
附 録	140
参考文献	142

結 言

大電力をかなりの長距離に亘って輸送する場合、特に送電の信頼度を高めたり、海底経過をたどらねばならない等のために、送電線としてケーブルを使用しなければならないような場合には、超高压交流送電よりも直流送電の方が経済的に有利となることは、古くから知られていたが、直流送電に対する技術的な諸問題の未解決のため、特に交流を直流に変換し、あるいはこの逆の変換を行う場合に用いられる水銀整流器の性能が超高压、大電流の送電目的に堪ええなかつたため、長い間実験段階を出なかつた。更に今迄直流送電に対し不利であるとされていた超高压交流送電の技術的な難点が、年々解決されていく結果、従来 of 交直両送電方式の優劣比較では一概に律しえなくなつたことも直流送電の実現をばむ大きな要因であつた。しかし最近における直流送電技術の進歩、特に水銀整流器の製作技術の進歩が十分超高压大電力送電の要求に呼応する段階に到達したため、直流送電方式は交流送電方式と全く対等の比重をもつて送電計画に考慮される対象となつた。

現在まで世界各国において実施された直流送電計画又は実験中の主なものを列挙すれば次のようである。

- 1) 1939年チューリッヒにおけるスイス国家博覧会においてB.B.社が50kV, 500kWの直流電力を20kmに亘り、博覧会会期中実験送電を行った。
- 2) 1945年才2次世界大戦直前にドイツのA.E.G. およびSiemens社が共同でエルベ河—ベルリン間約110kmに亘り400kV, 60MWの直流送電を約2週間断続運転した。
- 3) 1946年スエーデンの政府電力局とA.S.E.A.との協同でトロルヘツテン—メレルド間に45kV, 2MWの試験設備が設けられ、以後継続実験を行っている。
- 4) 1954年スエーデンの本土—ゴットランド島間100kmに亘り、100kV, 20MWの直流送電を開始した。

5) ソ連のスターリングラード—ドンバス間 473 km に亘り、800 kV、720 MW の直流送電計画をソ連才6次5ヶ年計画年度(1956~1960)中に完成する。

6) 1958年日本の九州本土—高島間に三菱電機が60 kV、7 MW の直流送電を開始した。

等々。

さて次に直流送電ならびにインバータ回路に関して従来なされた研究を概括すれば、まず交流送電との経済比較については、1932年 E.T.Z に報告された W. Gosebrush 氏の研究にはじまり、その後年々新たな角度から検討が加えられ、たとえば1941年 B.B. Mit. に報告された C. Ehrensperger 氏の論文、1948年 E.R.A. Report に報告された Busemann 氏の論文、同年 ЭЛЕКТРИЧЕСТВО に報告された A.N. Zlatopolski 氏によつて報告された論文等々ヨーロッパ各国の技術者により、詳細に論議され、その結果現在では一般に架空線により送電する場合でも、交直両送電形式の経済的限界距離がほぼ300~400 km であるとされ、とくにケーブル使用の場合にはこの限界距離がずっと低くなり、10 MW の送電電力でも20 km 以上であれば直流の方が有利であると結論されている。

次に直流送電一般に関する技術的研究については、すでに大がかりな送電が実地運転に入っている状態であり、とくにスエーデンにおいては上述のトロルヘツテン—メレルド間の実験設備により、回路現象、調整等々に関する基礎実験が詳細に行われ、その成果がいずれも1946年以後の C.I.G.R.E. に報告されている。

ドイツにおいても、上述のように才2次大戦末期に直流送電の実地運転を行つており、それ以前にすでに多くの基礎実験が行われたが不幸にして敗戦により、その後の研究が中断された。しかし過去における研究の集大成として1950年 Karl, Baudisch 氏により著書が公表された。これは直流送電全般に亘る基礎理論を近似解析法により、系統的に展開したものである。その他、ソ連においても才2次大戦後、長距離送電の必要性から直流送電に関する研究を本格的に開始し、レーニングラード

に直流送電研究所を設立し、多くの基礎研究を行っている現状であり、又イギリスにおいても英仏海峡の横断等、直流送電の必要性にかんがみ国立研究所内に模擬送電線を設置して研究を進め、とくに1952年以後、直流送電専門の機関誌“*Direct current*”を発行して、各国の直流送電技術者に投稿を求めている。一方日本においても直流送電に関する本格的な研究が開始されたのは1952年以後で屋久島の電源開発に伴う九州—屋久島間の直流送電計画を目指して、関係電力会社、電機およびケーブルメーカー、研究機関等により直流送電専門委員会が設立され、多くの基礎研究が進められて、すでに2回に亘り当委員会に中間報告が発表された。この中、とくに東京大学山田直平氏、電気試験所三上一郎氏等は近似解析法により、交直連繫システムの解析方法を導入され、直流送電システムの安定問題等にも言及されているが、解析方法としては上述の *K. Baudisch* 氏の域を出ていない。又1958年には三菱電機により日本最初の直流送電が九州—高島間で運転開始されたことは上述の通りである。

次にインバータ回路に関する理論的研究について言及すれば、まず、1941年東京芝浦電気の執行岩根氏により単相および多相インバータ回路に関する研究が発表されたが、その解析には厳密さを欠くものがあり、その後1951年吉住永三郎教授により、単相直列インバータ回路にはじめて「林の新解析法」が適用され、厳密な解析が行われた。又同年 *R. E. Turkington* 氏によつて三相自励式インバータ回路に関する研究が *A. I. E. E.* に公表されたが、同氏の理論にも厳密さを欠くものがあり、又過渡現象については全然言及されていない。その後1955年若林二郎講師により、三相自励式インバータ回路の定常時ならびに過渡時における動作特性が詳細に解明された。しかし直流送電に使用される三相他励式インバータ回路^がに関しては、その解析の困難さのために、ほとんど上述の *K. Baudisch* 氏の試みた近似解析法の域をはずせず、とくに直流送電線に接続された状態で、その動作特性を検討した研究は未だその例をみない。

したがつて本研究においては、まずインバータが直流送電線に接続された状態を前提とし、直流送電システム全般の定常時、過渡時における動作

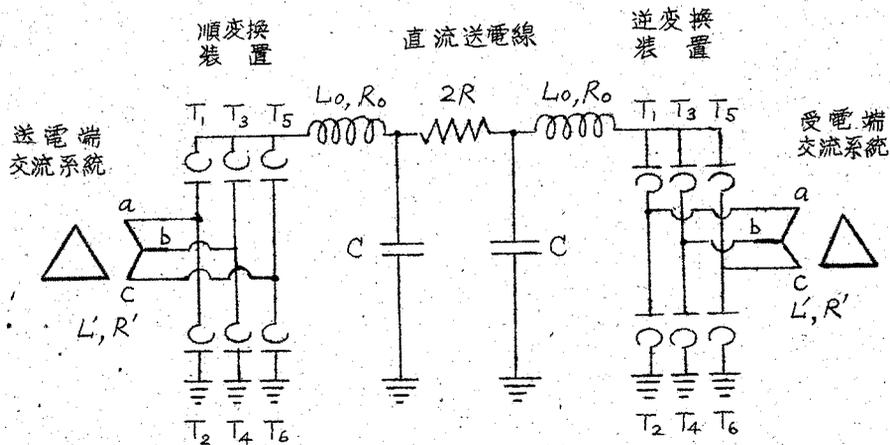
特性ならびにこれと相互に関連した状態におけるインバータ回路の動作特性を解明することを目的とした。その際インバータ回路を一種の断続回路とみなし、断続回路に対する「林の新解析法」を適用し、従来の解析法では解明しえなかった種々の現象につき詳細な検討を試みた。たとえば、才3章においては直流送電線上の電流、電圧の脈動分と動作条件との関連性を明確にし、才4章においては電源電圧変動時における過渡現象を詳細に論述した。又才5章においては起動時における過渡現象について吟味し、その結果、直流送電システムの起動には起動可能期間が存在し、この期間内で順変換装置（整流器）および逆変換装置（インバータ）を投入しなければならないことを明かにした。又才6章においては逆変換装置放電管の故障時における過渡現象を解析し、一般に逆変換装置の通弧事故は適当な条件さえ満足すれば、何等特別な制御装置を用いなくとも自然に定常状態に復帰することを明かにした。さらに才7章においては、順変換装置放電管逆弧時における過渡現象の解析を行い、逆弧電流の波高値と逆弧発生時点との関連性を明確にした。

これらの研究結果により、直流送電システムおよび三相他励式インバータ回路の運転ならびに設計基準に一つの指針を与えることができれば幸いである。

尚この研究は林重憲教授の御指導により行つたものであることを記し、同教授に深甚なる感謝の意を表す。

第1章 直流送電システムの回路構成およびその動作

本研究においては、直流送電システムとして第1-1図に示めす回路すなわち、送電端交流系統、順変換装置、直流送電線、逆変換装置、受電端交流系統等々によつて構成される回路を考える。ここで順変換装置（いわゆる整流器）は送電端変電所に設置され、三相交流を直流に変換する装置であり、通常、格子制御放電管（水銀整流器を用いるのが普通である）を図のようにいわゆるグレース接続方式にしたがつて結線されたものである。この接続方式は一般に、各放電管の対地絶縁の点で他の方式よりすぐれているので、直流送電のように超高圧を対象とする整流機構には最も適しており、通常図のような結線を大地を中性点として、正負対称に数段直列に接続されるものであるが、ここでは図のようにグレース接続1組よりなる回路について取扱うことにする。次に直流送電線の入出力端に設置されたコイル L_0 はそれぞれ直流電流平滑用に挿入されたものである。後述するように、直流送電システムの動作特性には重要な役割を演ずるものであり、その設定には特に注意が必要である。図中の R_0 はその



第1-1図

抵抗分を示す。又直流送電線は一般にケーブルを使用するのが普通であり、ここではケーブル使用の場合のみを考慮して、図のようにこれを扱

抗 $2R$ および容量 $2C$ の集中常数で等価することにした。逆変換装置（いわゆるインバータ）は受電端変電所に設置され、直流を三相交流に変換する装置であつて、順変換装置と同様、一般にグレース接続方式で結線される。ただし電流の流通方向から容易にわかるように、各放電管の陽極、陰極の位置が大地に対し、順変換装置の場合とは逆向きになつてゐる。 L, R' はそれぞれ、順変換装置側および逆変換装置側における転流変圧器のリーケージインダクタンスとその抵抗分であり、各交流系統はいずれもその容量が十分大きいものとする。又逆変換装置は一般にかなりの無効電力を消費するので、受電端の変電所には無効電力供給源が設置されるのが普通であるが、ここではこれを受電端の交流系統に含ませて考えることにする。更に各放電管の陽極回路には通常転流リアクトルを挿入するが、これも L, R' に含まれているものと解釈する。

さて、この系統が定常運転状態にある場合には、順変換装置ならびに逆変換装置の各放電管は交流系統の三相交流に同期した点弧パルスを格子（又は点弧子）

オ 1-1 表

に印加することによりオ 1-1 表に示す順序にしたがつて順次点弧していく。表中の偶数番目の各回路状態はいわゆる転流期間に相当するもの

回路状態	点弧放電管	回路状態	点弧放電管
1	$T_4 \quad T_1$	7	$T_3 \quad T_2$
2	$T_4 \quad T_1 \quad T_6$	8	$T_3 \quad T_2 \quad T_5$
3	$T_1 \quad T_6$	9	$T_2 \quad T_5$
4	$T_1 \quad T_6 \quad T_3$	10	$T_2 \quad T_5 \quad T_4$
5	$T_6 \quad T_3$	11	$T_5 \quad T_4$
6	$T_6 \quad T_3 \quad T_2$	12	$T_5 \quad T_4 \quad T_1$

で通常重複角とよばれる。たとえばオ 2 番目回路状態とは、低圧側（大地側）の放電管 T_4 から低圧側の放電管 T_6 へ点弧放電管が移行する期間を指すものであり、この期間中は点弧放電管が3個となる。定常運転時における各回路状態の継続期間は各奇数番目回路状態および各偶数番目回路状態については、それぞれ一定であるが、奇数番目回路状態と偶数番目回路状態とは一般に奇数番目回路状態の方がずっと大きい。今、奇

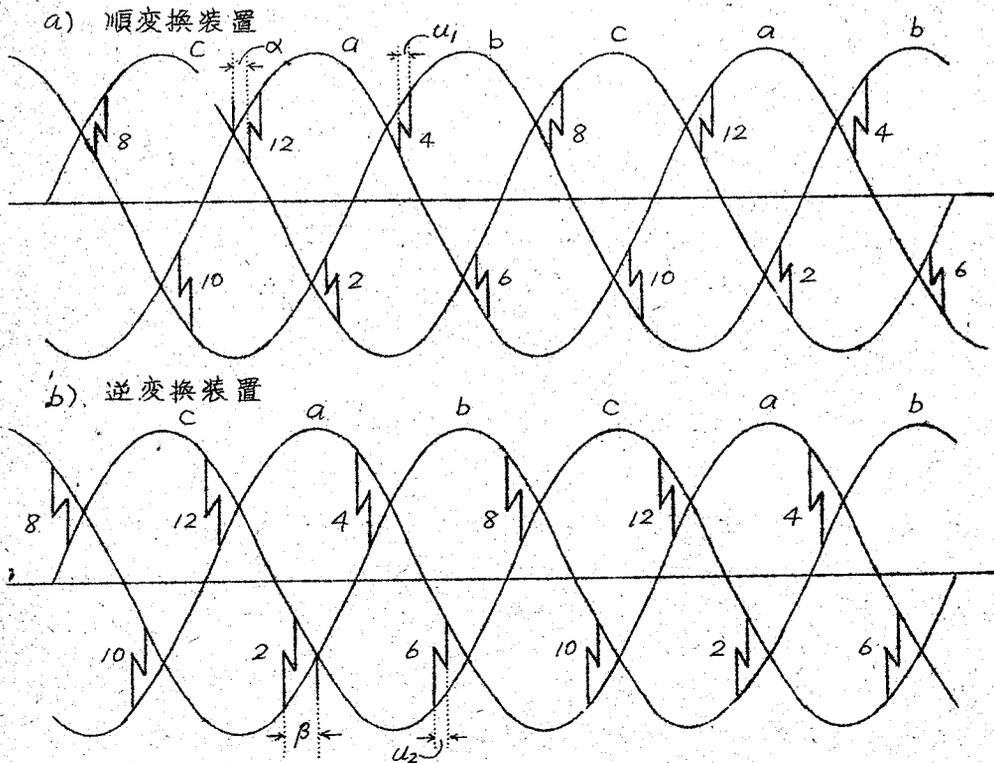
奇番目回路状態の継続期間を τ_1 、偶番目回路状態の継続期間を τ_2 とすれば、次の関係がある。

すなわち
$$\tau_1 + \tau_2 = \frac{1}{6f_0} \quad (1.1)$$

ここに f_0 は交流系統の周波数であり、以下の解析においてはすべてこれを $60/s$ とする。

各放電管の点弧開始位相、すなわちいわゆる、制御角は順変換装置の場合には送電端交流系統の線間電圧に対し、遅れ位相をとり、逆変換装置の場合には受電端交流系統の線間電圧に対し進み位相をとる。この遅れ位相 α および進み位相 β と各交流系統の相電圧との位相関係を図示したものがオ 1-2 図である。図中の u_1 および u_2 はそれぞれ各変換装置の転流期間を示すものである。尚、図中の番号は転流期間の回路状態の番号を与えるものであり、奇数番目回路状態については、たとえばオ 3 番目回路状態とは、図の 2 および 4 の転流期間では含まれた期間を指す。

オ 1-2 図



第2章 近似解法による直流送電システムの動作特性の解析

直流送電システムの動作は非常に複雑であり、系統全般の特性を厳密に解析することは、一般に困難であるので、この章ではまず従来より用いられている近似解法により、系統全般の定常運転時における動作特性の大略について吟味を行う。

2.1 基礎方程式の導入

(i) 順変換装置の出力直流電圧および直流電流

順変換装置の出力直流電圧は、転流変圧器内の抵抗分による電圧降下および放電管の管内電圧降下を無視すれば、第1-2図に示される脈動電圧の平均値で与えられ、これを E_{Gd} とすれば次の積分を遂行すればよい。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} E_{Gd} &= \frac{1}{2\pi/3} \int_0^{\frac{2\pi}{3} - (\alpha + u_1)} \sqrt{2} E_g \cdot E_{gph} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + u_1 + \omega t\right) d(\omega t) \\ &+ \frac{1}{2\pi/3} \int_0^{\alpha} \sqrt{2} E_g \cdot E_{gph} \cdot \sin\left(\frac{5}{6}\pi + \omega t\right) d(\omega t) \\ &+ \frac{1}{2\pi/3} \int_0^{u_1} \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{2} E_g \cdot E_{gph} \sin\left(\frac{5}{6}\pi + \alpha + \omega t\right) + \sqrt{2} E_g \cdot E_{gph} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \omega t\right) \right\} d(\omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{すなわち} \quad E_{Gd} &= \frac{3}{\pi} \cdot E_g \cdot \sqrt{6} \cdot E_{gph} \cdot \frac{1}{2} \left\{ \cos\alpha + \cos(\alpha + u_1) \right\} \\ \text{ここに} \quad E_{gph} &= \text{送電端交流系統の定格相電圧} \\ E_g &= \text{同上の変動係数} \\ \alpha &= \text{順変換装置の遅れ制御角} \\ u_1 &= \text{同上の重複角} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} E_{Gd} \\ E_{gph} \\ E_g \\ \alpha \\ u_1 \end{aligned}} \right\} \text{--- (2.1)}$$

同様に順変換装置の出力直流電流は、それが近似的に転流電流の重複角

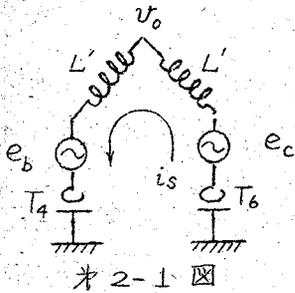
* (註) 誘導分による電圧降下は重複角 u_1 として考慮されている。

すなわち (2.1) および (2.2) より

$$E_{Gd} = 2 \cdot \frac{3}{2\pi} E_g \cdot \sqrt{6} E_{gph} \cdot \cos\alpha - \frac{I_g \cdot 2L'\omega}{2\pi/3} \quad \text{となる。文献 2) 参照。}$$

** (註) 点弧しはじめた放電管の陽極電流のこと。

終末時点における値に等しいことにより、この重複角（転流期間）終末時点における転流電流の値によって与えられる。直流電流を I_{Gd} 、転流電流を $i_s(t)$ とし、たとえば、第2番目回路状態を例にとれば、転流電流は第2-1図の矢印し方向に流れ、 I_{Gd} は次のようにして求められる。



$$I_{Gd} = i_s(t = u_1) = \int_0^{u_1} \frac{u_1}{\omega} \frac{(e_b - e_c)}{2L'} dt = - \int_0^{u_1} \frac{E_g \sqrt{6} E_{gph} \sin(\alpha + \omega t)}{2L'\omega} d(\omega t)$$

すなわち

$$I_{Gd} = \frac{E_g \sqrt{6} E_{gph}}{2L'\omega} \{ \cos \alpha - \cos(\alpha + u_1) \} \quad (2.2)$$

ここに、 L' は送電端側転流変圧器のリーケージインダクタンスであり、抵抗分 R' は無視した。

(ii) 直流送電線の受電端および送電端における直流電圧および直流電流

送電線の受電端における直流電圧および直流電流をそれぞれ E_{wd} および I_{wd} とし、又送電線の抵抗を $2R$ とすれば、定常運転時においては平滑用コイル L_0 内の電圧降下は無視しうるので、次の関係がえられる。

$$E_{Gd} - I_{Gd} \cdot 2R = E_{wd}, \quad I_{Gd} = I_{wd} \quad (2.3)$$

(iii) 逆変換装置の入力直流電圧および直流電流

(i) の場合と全く同様にして、直流電圧 E_{wd} は第1.2図 b) に示される脈動電圧の平均値で与えられ、直流電流 I_{wd} は逆変換装置における転流電流の転流期間終末時点における値によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \text{すなわち} \quad E_{wd} &= \frac{3}{\pi} \cdot E_w \cdot \sqrt{6} E_{wph} \cdot \frac{1}{2} \{ \cos(\beta - u_2) + \cos \beta \} \\ I_{wd} &= E_w \cdot \frac{\sqrt{6} E_{wph}}{2L'\omega} \{ \cos(\beta - u_2) - \cos \beta \} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

ここに $E_{wph} =$ 受電端交流系統の定格相電圧*
 $E_w =$ 同上の変動係数
 $\beta =$ 逆変換装置の進み制御角
 $u_2 =$ 同上の重複角
 $L' =$ 受電端側転流変圧器のリーケージインダクタンス

(IV) 数値計算例

以下の数値計算に当って、上述の各回路常数ならびに動作条件はそれぞれ次のように選定した。すなわち、まず送電電圧 100 kV、送電電流 250 A、送電電力 25 MW を目標とし、送電線中の電圧降下を 10% とし、 $2R = 40 \Omega$ 、送受電端の交流系統電圧は共に相等しいとして $E_{gph} = E_{wph} = 50 \text{ kV}$ 、リーケージインダクタンスは送受電端とも約 5% の電圧降下を与えるものとし $L'w = 12 \Omega$ を基準値とした。

a) 順変換装置の動作特性

(2.1)式および(2.2)式を辺々相割れば次のようになる。すなわち

$$\frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + u_1)}{\cos\alpha - \cos(\alpha + u_1)} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{E_{gd}}{I_{gd} \cdot L'w}$$

ここで次のような助変数を定義すれば上式は次の(2.5)式となる。すなわち

$$e_g \equiv \frac{E_{gd}}{E_g}, \quad i_g \equiv \frac{I_{gd}}{I_g}, \quad l \equiv \frac{L'w}{Lw}, \quad C_g \equiv \frac{\pi}{3} \cdot \frac{E_g}{I_g \cdot Lw} \quad \text{とすれば}$$

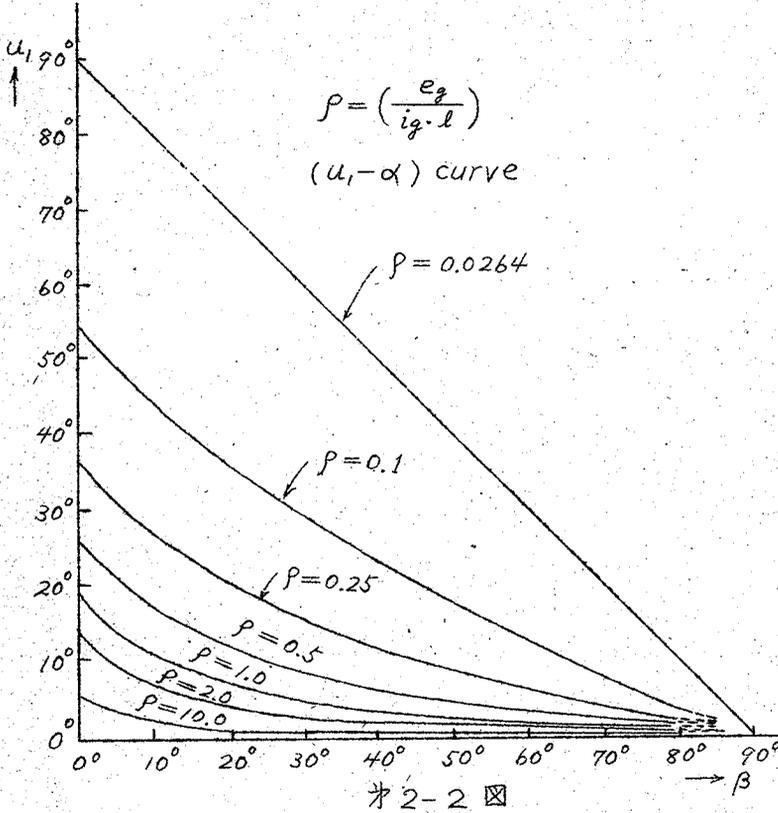
$$\frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + u_1)}{\cos\alpha - \cos(\alpha + u_1)} = C_g \left(\frac{e_g}{i_g \cdot l} \right) \equiv C_g \cdot \rho \quad (2.5)$$

ここに E_g 、および I_g はそれぞれ定格時における送電端直流電圧および直流電流を表わすもので、上述のように $E_g = 110 \text{ kV}$ 、 $I_g = 250 \text{ A}$ とする。又 L は転流変圧器のリーケージインダクタンスの基準値を示すもので、 $Lw = 12 \Omega$ とする。このように各常数を設定すれば(2.5)式中の

* (註) E_{gph} 、 E_{wph} はすべて直流側に換算した値をとるものとする。したがってこの場合 $E_{gph} = E_{wph}$ と考えて差しかえない。

C_G はこの場合約 38.4 となる。

さて (2.5) 式により定常運転時における制御角 α と重複角 u_1 の関係が任意の ρ の値に対して求めることができ、図 2-2 はその数値計算結果を与えるものである。図から明かなように、一般に順変換装置の重複角は助変数 ρ の値が大きいほど、したがって直流電圧すなわち交流電圧



が高いほど、
 転流インダク
 タンスおよび
 直流電流の値
 が小さいほど
 小さくなり、
 又制御角の値
 が大きいほど、
 小さくなるこ
 とがわかる。

次に (2.1)
 式と (2.2) 式
 とから
 $\cos(\alpha + u_1)$
 を消去し、こ
 こで更に E_0 、
 I_0 を次のよう

に定義すれば、(2.6) 式がえられる。すなわち、 $\frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_{gph} = E_0$ 、 $\frac{\sqrt{6} E_{gph}}{L\omega} = I_0$ とすれば

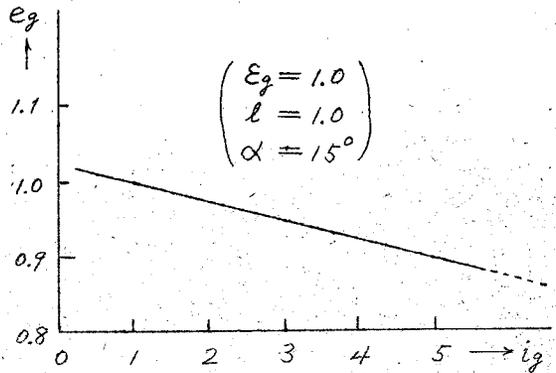
$$e_g \left(\frac{E_g}{E_0} \right) + (i_g \cdot l) \left(\frac{I_g}{I_0} \right) = E_g \cdot \cos \alpha \quad (2.6)$$

この式より、直流電圧 e_g および直流電流 i_g を一定とすべき、交流系
 電圧 E_g と制御角の余弦 $\cos \alpha$ とは互に反比例することがわかる。

$E_g = 110 \text{ kV}$ 、 $I_g = 250 \text{ A}$ 、 $E_{gph} = 50 \text{ kV}$ 、 $L\omega = 12 \Omega$ 、 $e_g = i_g = l = 1.0$ 、
 とした場合、 $E_g = 1.0$ に対応する制御角 α は約 15° となる。又上式より

交流系統電圧 E_g および制御角 α を一定とした場合の直流電圧 e_g と直流電流 i_g の関係が求められる。才2-3図は $\alpha = 15^\circ$, $E_g = 1.0$ とした場合の計算結果である。

図から判かるように、順変換装置の出力直流電圧は直流電流の変化に殆ど影響されず、100%の直流電流増加に対し、たかだか3%程度低下するにすぎない。



才2-3図

(b) 逆変換装置の動作
特性

順変換装置の場合と全く同様にして、才(2.4)式の上,下の式を辺々相割れば次の式がえられる。

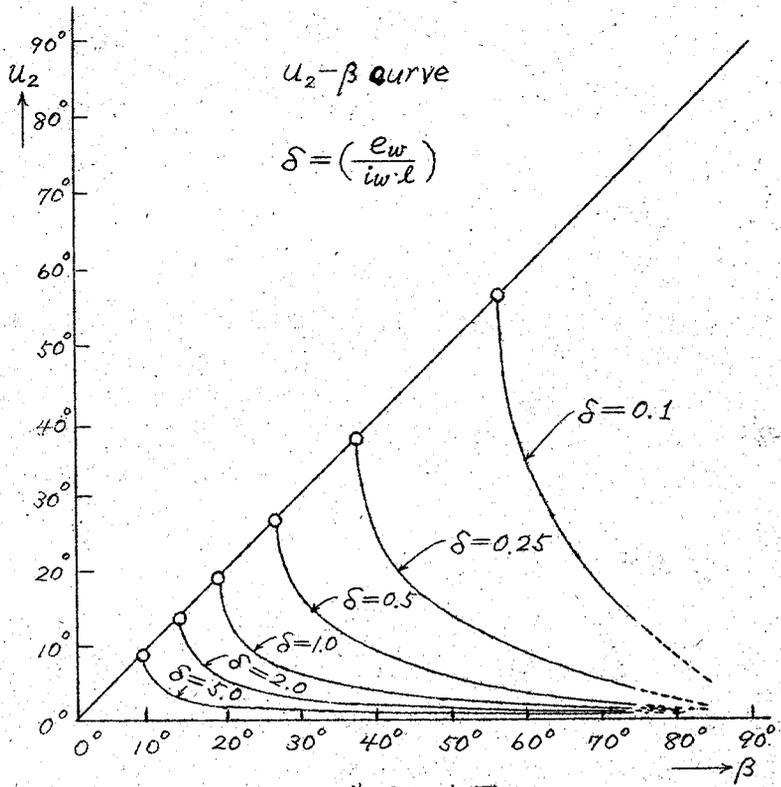
$$\frac{\cos(\beta - u_2) + \cos\beta}{\cos(\beta - u_2) - \cos\beta} = C_w \left(\frac{e_w}{i_w l} \right) \equiv C_w \cdot \delta \quad (2.7)$$

ここに $e_w \equiv \frac{E_w d}{E_w}$, $i_w \equiv \frac{I_w d}{I_w}$, $l \equiv \frac{L'w}{L_w}$, $C_w \equiv \frac{\pi}{3} \cdot \frac{E_w}{I_w L_w}$

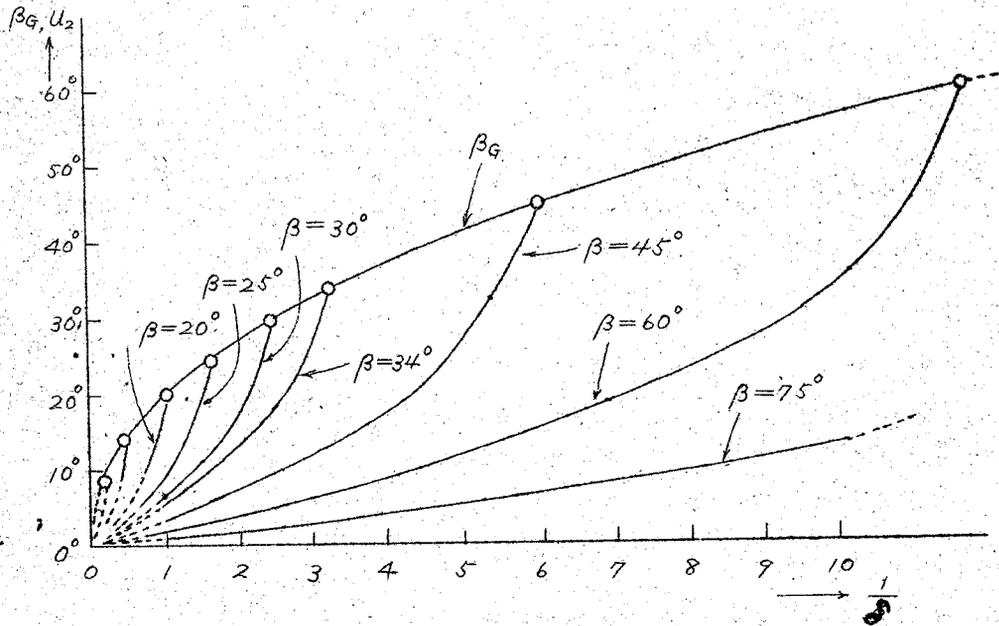
とする。また E_w, I_w, L_w はそれぞれ受電端直流電圧, 直流電流, 逆変換装置側転流変圧器のリーケージインダクタンス等々の基準値であつて, a)の場合と同様, 以下の数値計算に当っては $E_w = 100 \text{ kV}$, $I_w = 250 \text{ A}$, $L_w = 12 \Omega$ と設定する。この場合, C_w は約 34.91 となる。

さて, 才(2.7)式より δ を助変数として, 逆変換装置の制御角 β と重複角 u_2 との関係が求められ, 才2-4図はその数値計算結果である。順変換装置の場合と同様, 逆変換装置の重複角 u_2 は δ が大きいほど, すなわち, 交流電圧が高いほど, 直流電流およびリーケージインダクタンスの値が小さいほど小さくなり, 又同一値の δ に対しては, 制御角 β が大きいほど小さくなる。順変換装置の場合と異なる点は, 逆変換装置の制御角 β には各 δ の値に対してそれぞれある限界値が存在することである。

この限界値よりも小さい制御角 u_2 の値に対しては、逆変換装置は転流失敗を惹き起し、動作不能となる。転流失敗の限界における制御角 β_G と δ との関係は*(2.7)式より直ちに求められ、次式のようになる。すなわち



※2-4 図



※2-5 図

$$\cos \beta_G = \frac{C_w \cdot \delta - 1}{C_w \cdot \delta + 1} \quad \dots \dots \dots (2.8)$$

この(2.8)式より β_G と δ の逆数との関係を求めた計算結果がオ2-5図に示されている。図には各制御角の値に対する重複角 u_2 と $1/\delta$ との関係も附記されているが、これらより、制御角の値が小さいほど、 $1/\delta$ の変化に対し、重複角 u_2 の変化は急峻となる。したがって直流電圧値を一定とした場合、制御角の値が小さいほど、直流電流の変動に対する重複角の増加率が大きくなり、安全性がわるくなる。又、制御角が十分大きい場合には、直流電流の変動に対し、重複角はほぼ電流の変動値に比例して変化することがわかる。

次に(2.4)式より $\cos(\beta - u_2)$ を消去すれば、順変換装置の場合と全く同様にして次の結果がえられる。すなわち

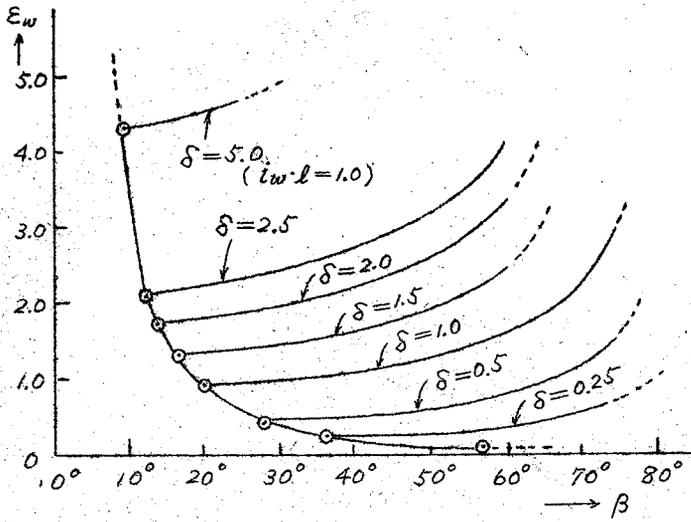
$$e_w \left(\frac{E_w}{E_0} \right) - (i_w \cdot l) \left(\frac{I_w}{I_0} \right) = E_w \cdot \cos \beta \quad \dots \dots \dots (2.9)$$

これより、逆変換装置側の動作条件 E_w および β を一定とした場合の直流電圧 e_w と直流 i_w は a) の場合と同様、直線関係で結ばれ、一般に i_w の変化に対し、 e_w の変化は微小である。又、直流電圧および直流電流を一定とした場合における交流電圧 E_w と制御角 β の余弦 $\cos \beta$ とはそれぞれ反比例の関係にあるが、 $E_w = 100 \text{ kV}$, $E_{wph} = 50 \text{ kV}$, $I_w = 250 \text{ A}$, $L_w = 72 \Omega$ と設定した場合、 $e_w = i_w = E_w = 1.0$ とすべき制御角 β の値はほぼ 34° となる。後章の数値計算例において $\beta = 34^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ を基準値とえらんだのはすべてこの理由によるものである。

オ2-6図はオ(2.9)式において $i_w \cdot l = 1.0$ とした場合における β と E_w との関係を求めた数値計算結果であつて、 $i_w \cdot l$ の値が 1.0 以外の値をとる場合には、その値に応じて図中の各曲線を上、下に平行移動すればよい。

2.2. 直流送電系統の電力制御特性

(i) 順変換装置側における制御



オ 2-6 図

オ (2.1) 式および
(2.2) 式を (2.3) 式
に代入すれば次式
がえられる。

$$\begin{aligned}
 E_w \cdot E_w &= E_g \cdot E_g - (i_g)(I_g \cdot 2R) \\
 &= E_g \cdot \left(\frac{1}{2} E_0\right) \{ \cos \alpha + \cos(\alpha + u_1) \} \\
 &\quad - E_g \cdot \left(\frac{I_0 R}{l}\right) \{ \cos \alpha - \cos(\alpha + u_1) \}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

この式により、順変
換装置側で制御角 α

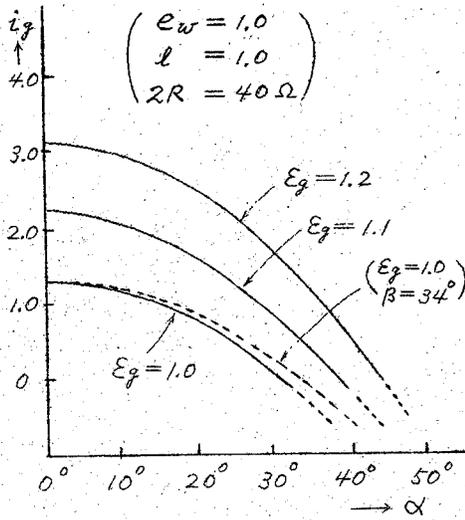
のみを変化させて送電電力を制御する場合、あるいは交流系統電圧 E_g のみを変化させて送電電力を制御する場合等における制御特性が求められる。すなわちこれらの場合、2.1.の結果から明かなように左辺はほぼ一定とみなされ、したがってたとえば右辺の α のみを変化させた場合には、それに対応する u_1 の値が決定され、その結果送電端における直流電圧 e_g および直流電流 i_g が決定され、したがって送電電力ならびに受電電力が求められる。この場合、より厳密な関係式を導入するには (2.10) 式の左辺に (2.4) 式を代入し、更に (2.3) 式の条件を考慮して $\cos(\beta - u_2)$ を消去すればよい。すなわち

$$E_w \cdot \cos \beta = E_g \cdot \left\{ \left(1 + \frac{\pi R}{3l \cdot L_w}\right) \cos(\alpha + u_1) - \left(\frac{\pi R}{3l \cdot L_w}\right) \cos \alpha \right\} \tag{2.11}$$

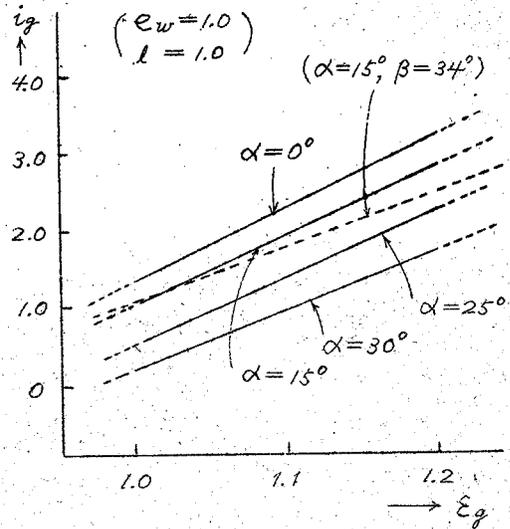
ただし転流インダクタンスは順逆両変換装置を通じて等しいとした。

オ 2-7 図は (2.10) 式の左辺を一定 ($E_w = 1.0$) とし、かつ $2R = 40 \Omega$, $l = 1.0$ とした場合に対し、制御角 α にて電力制御を行った場合の制御特性を与えるものである。図から判かるように、 $E_g = 1.0$ の場合には、約 30% の過負荷電力が制御できるにすぎない。

図中点線で示めた曲線は $E_g = 1.0$ に対し、 $E_w = 1.0$, $\beta = 34^\circ$ として



オ 2-7 図



オ 2-8 図

オ(2.11)式により求めた計算結果である。

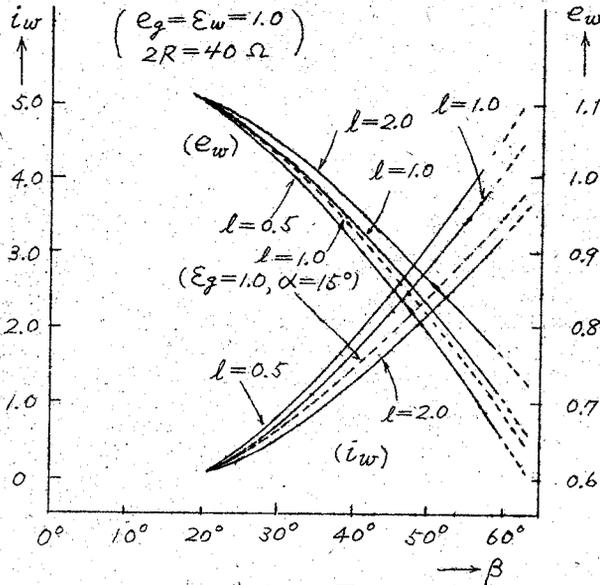
オ 2-8 図は同じくオ(2.10)式の左辺を一定とし、交流系統電圧 E_g にて電力制御を行った場合の制御特性の計算結果であり、図中の点線の曲線は $\alpha = 15^\circ$ に対し、 $E_w = 1.0$ 、 $\beta = 34^\circ$ としてオ(2.11)式より求めた結果である。図より $\alpha = 15^\circ$ の場合には交流系統電圧 E_g を 20% 上昇させることにより約 150% 程度の過負荷電力を制御しうることがわかる。

(ii) 逆変換装置側における制御

(i) の場合と同様にオ(2.4)式を(2.3)式に代入すれば次式がえられる。

$$\begin{aligned}
 e_g E_g &= i_w (I_w \cdot 2R) + e_w \cdot E_w \\
 &= E_w \cdot \left(\frac{I_0 R}{l} \right) \{ \cos(\beta - u_2) - \cos \beta \} + E_w \cdot \left(\frac{1}{2} E_0 \right) \{ \cos(\beta - u_2) + \cos \beta \}
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

上式の左辺を一定 ($e_g = 1.0$) とし、受電端における直流電流 i_w と制御角との関係、すなわち逆変換装置の制御角による電力制御特性を求めるとオ 2-9 図がえられる。図から判かるように一般に転流インダクタンス l の値が小さいほど、制御角 β による電力制御能力はいく分増大する。

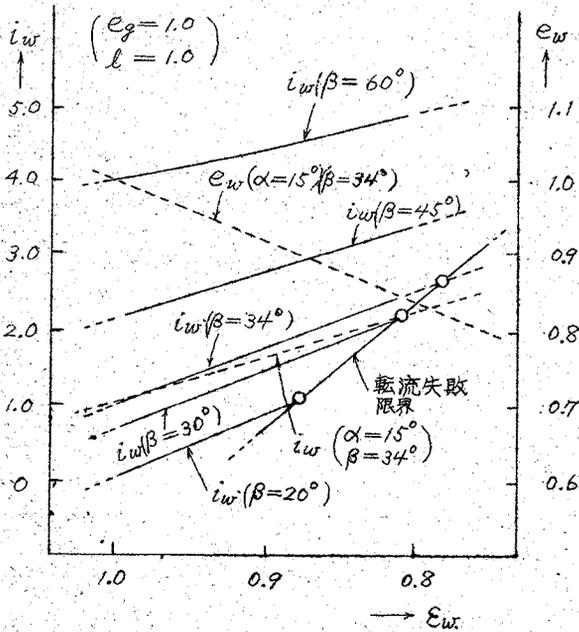


※2-9図

尚この場合も (i) の場合と同様に、(2.12)式により厳密な関係式は左辺に(2.1)式を代入し、(2.3)式の条件を考慮することにより求められる。すなわち

$$E_g \cos \alpha = E_w \left\{ \left(1 + \frac{\pi R}{3l \cdot Lw} \right) \times \cos(\beta - \alpha) - \left(\frac{\pi R}{3l \cdot Lw} \right) \cos \beta \right\} \quad (2.13)$$

図中点線で示めた曲線は $E_g = 1.0, \alpha = 15^\circ, l = 1.0$ として(2.13)式より求めた計算結果である。図から明かなように、 $l = 1.0$ に対し、 $\beta = 34^\circ$ を定常状態とすれば、約 10° の制御角増加により、約 70% 程度の過負荷電力が制御できる。



※2-10図

※2-10図は同じく(2.12)式の左辺を一定とし、受電端交流電圧

E_w にて電力制御を行った場合の制御特性を与えるものである。この場合、後述するように各制御角 β の値に応じて E_w の値にはそれぞれ、ある限界値が存在し、その限界値以下の E_w の値に対しては逆変換装置は

転流失敗を発生し、動作不能となる。図中の転流失敗限界曲線は E_w の限界値をつらねたものである。尚図中に点線で示めた曲線は才(2.13)により求めたもので $E_g=1.0$, $\alpha=15^\circ$, $\beta=34^\circ$ とした。図から明かなように、 $\beta=34^\circ$ の場合、交流系統電圧 E_w を約 20% 低下させることにより約 90% の過負荷電力が制御できる。

以上、順変換装置側ならびに逆変換装置側にて直流送電系統の送電電力制御を行う場合の特性をそれぞれの場合について吟味を行ったが、両者の比較により次の結論がえられる。すなわち制御角のみにより過負荷に対する電力制御を行う場合には、逆変換装置側における制御の方がはるかに有効であり、他方、交流系統電圧にて電力制御を行う場合には、順変換装置側で行う方がはるかに有利である。

2.3. 逆変換装置の転流失敗条件

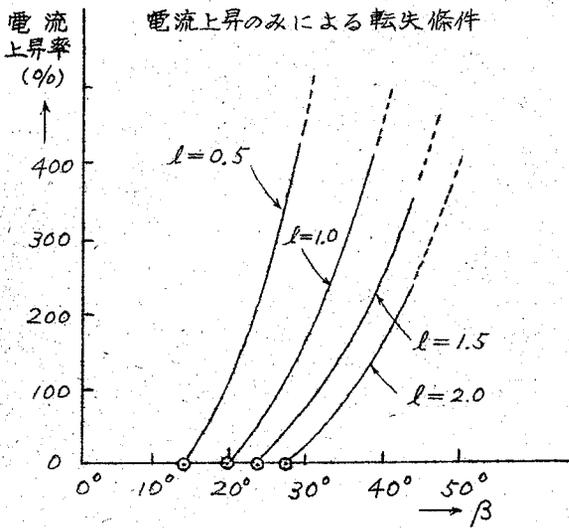
逆変換装置は上にも述べたように、一般に受電端交流系統の電圧降下、直流電流の上昇等の原因により転流失敗を発生するが、以下いろいろの場合について吟味を行う。

さて、転流失敗を発生すべき交流電圧 E_w の限界値あるいは、直流電流 i_w の限界値は才(2.4)式から直ちに求められる。すなわちこの場合 $\beta = \alpha_2$ となるので(2.4)式は次式のようになる。

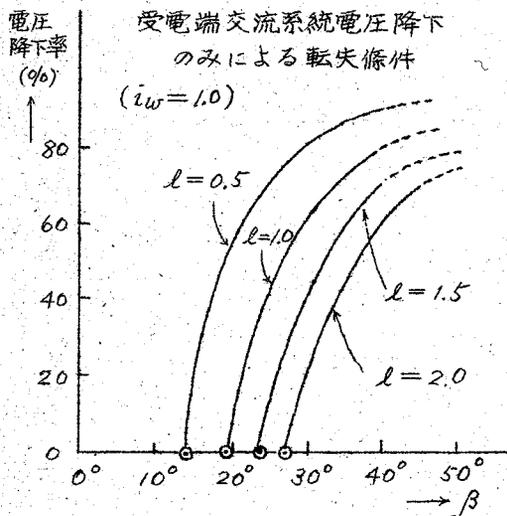
$$i_w \cdot I_w = \left(\frac{I_0}{2l}\right) E_w \cdot (1 - \cos \beta) \dots\dots\dots (2.14)$$

(i) 直流電流の上昇のみによる転流失敗条件

(2.14)式において、各制御角 β の値に対し、定常状態において $i_w=1.0$, $E_w=1.0$ とすべき E_w の値を設定すれば、直流電流の上昇のみにより転流失敗を発生する直流電流の限界値が求められる。才2-11図はこの場合の計算結果であつて、 $i_w=1.0$ を基準にし、上昇率で示めた。図から明かなように、一般に制御角 β の値が小さいほど、転流インダクタンスの値が大きいほど、転流失敗を発生する直流電流の限界値は小さくなる。 $l=1.0$ の場合、 $\beta=34^\circ$ に対しては約 250% の電流上昇が転流失



オ2-11図



オ2-12図

敗の限界値となる。

(ii) 交流系統の電圧降下のみによる転流失敗条件
これは定電流制御方式を採用した系統において受電端交流系統の電圧が降下した際に発生する転流失敗条件である。

オ(2.14)式において左辺を一定 ($i_w=1.0$) とすれば各制御角 β の値に対し、転流失敗を発生すべき E_w の値が決定され、これを定常時において $e_w=i_w=1.0$ とすべき E_w の値と比較すれば、交流系統電圧の降下のみによる転流失敗条件が求められる。オ2-12図はこの場合の計算結果であり、図より $l=1.0$, $\beta=34^\circ$ に対しては約70%の電圧降下により転流失敗を発生することがわかる。

(iii) 受電端交流系統の電圧降下とそれに伴う電流増加とによる

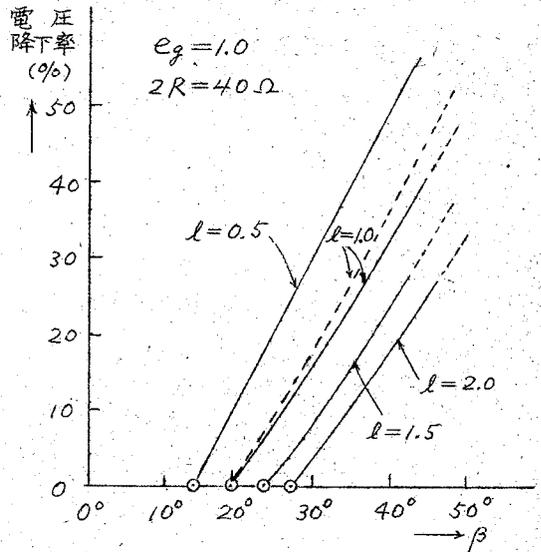
、転流失敗条件

これは受電端交流系統の電圧が降下した場合、直流送電系統の他の動作条件をすべて定常運転時の状態のまま、放置した際に発生する転流失敗条件である。この場合の転流失敗条件はオ(2.12)式において $\cos(\beta-u_2)$

= 1.0 とおくことにより直ちに求められる。すなわち

$$E_g \cdot E_G = \mathcal{E}_w \cdot \left(\frac{E_0}{2} \right) \left[\left(1 + \frac{2\pi}{3l} \cdot \frac{R}{Lw} \right) + \left(1 - \frac{2\pi}{3l} \cdot \frac{R}{Lw} \right) \cos \beta \right] \quad \dots \dots \dots (2.15)$$

2.2.でも述べたように、一般に送電端の直流電圧は直流電流の値にはあまり影響されないの、この場合も亦(2.15)式の左辺を一定 ($E_g = 1.0$) とみなし、各 β の値に対する \mathcal{E}_w の値を決定し、これを定常時における \mathcal{E}_w の値と比較すれば、転流失敗条件が求められる。亦2-13図はこの場合の計算結果を与えるもので、 $l = 1.0$ 、 $\beta = 34^\circ$ に対しては約 22% の電圧降下が転流失敗の限界となる。



亦2-13図

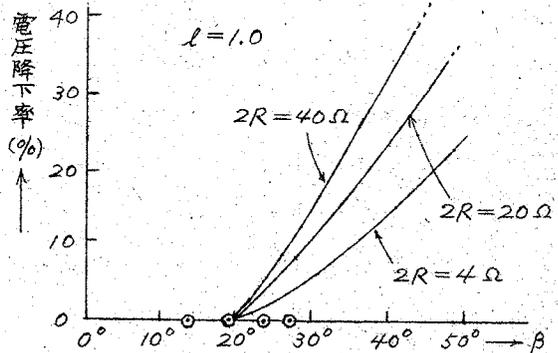
尚亦(2.15)式のより厳密な関係式は(2.13)式から直ちに求められ、次のようになる。すなわち

$$E_g \cdot \cos \alpha = \mathcal{E}_w \left[\left(1 + \frac{\pi R}{3l \cdot Lw} \right) - \left(\frac{\pi R}{3l \cdot Lw} \right) \cos \beta \right] \quad (2.16)$$

図中の点線で示めした曲線は $E_g = 1.0$ 、 $\alpha = 15^\circ$ 、 $l = 1.0$ に対し、(2.16)式より求めた計算結果である。

・亦2-14図は同じく

(2.15)式により、 $2R$ の影響について吟味したものである。ただしこの場合、左辺の E_g は $2R = 20 \Omega$ に対しては 105 kV、 $2R = 4 \Omega$ に対しては 101 kV とし、定常状態における \mathcal{E}_w の



亦2-14図

値を $\varepsilon_w = l_w = 1.0$ となるように設定した。図より明かなように、一般に送電線の抵抗値が小さいほど転流失敗が発生しやすい。

(IV) 直流送電系統の動作可能領域

上述のように直流送電系統の受電端交流電圧がある値以下に降下した場合には、逆変換装置は転流失敗を発生し動作不能となるが、又逆に受電端交流電圧が上昇しすぎると送電不能となる。これは受電端交流電圧がある値以上に達すると、受電端の直流電圧が送電端の直流電圧よりも高くなり、電流が逆流するからである。したがって送電端側の動作条件が一定の場合にはそれに対応して、受電端の交流電圧には動作可能な変動領域が存在する。送電端の交流系統電圧についても全く同様の原理で、受電端側の動作条件が一定の場合には、送電端交流電圧が上昇しすぎると逆変換装置の転流失敗を惹起し、又降下しすぎると送電不能となり、これらの限界の中間領域が送電端交流電圧の動作可能領域となる。以下各々の場合について吟味を行う。

(a) 受電端交流系統電圧の動作可能領域

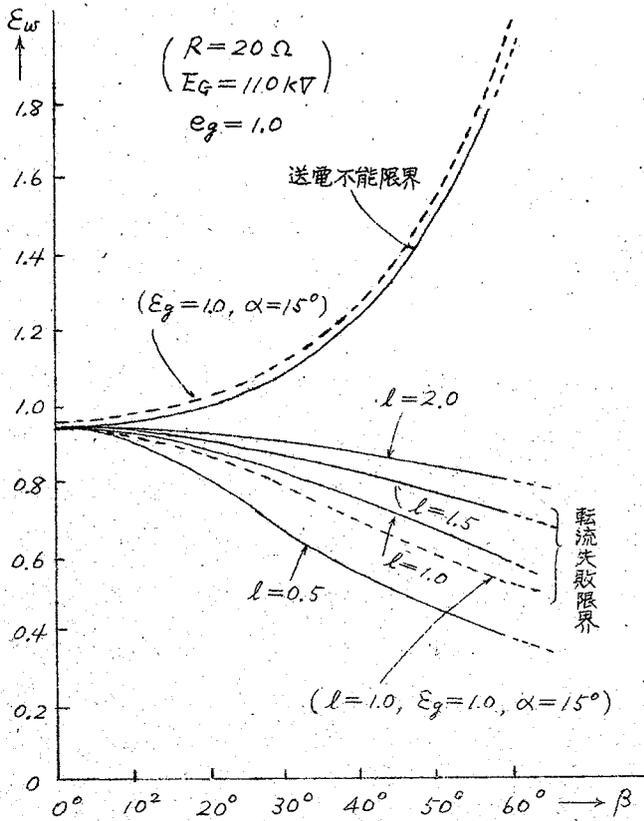
まず送電端の動作条件を一定とした場合における受電端交流電圧の転流失敗限界は(2.15)式又は(2.16)式で与えられる。他方、送電不能限界は(2.12)式あるいは(2.13)式において $U_2 = 0$ とおくことにより求められる。すなわち

$$E_g \cdot E_G = \varepsilon_w E_o \cos \beta \quad (2.17)$$

あるいは

$$E_g \cdot \cos \alpha = \varepsilon_w \cdot \cos \beta \quad (2.18)$$

第2-15図はこの場合の計算結果であり、図中の実線で示めた曲線は(2.15)式および(2.17)式により求めた結果である。又点線で示めた曲線は $E_g = 1.0$, $\alpha = 15^\circ$, $l = 1.0$ として(2.16)式および(2.18)式により求めた結果である。図中の送電不能限界曲線と転流失敗限界曲線で、はさまれた領域が交流電圧 ε_w の動作可能領域となる。図から明かなように、一般に転流インダクタンス l の値が小さいほど動作可能領域は広



オ 2-15 図

$$E_g E_o \cos \alpha = E_w \cdot E_w \quad (2.19)$$

オ 2-16 図はこの場合の計算結果を示すもので、図中の実線で示めた曲線はオ(2.16)式および(2.18)式により求めたものである。同じく点線はオ(2.19)式による結果である。図から明かなように、送電端交流電圧 E_g の動作可能領域は制御角 α にあまり影響されない。

(V) 結 論

以上、近似解法により直流送電系統の動作特性全般の解析を試みたが、これより一般に次の結論がえられる。すなわち

- 1) 順変換装置および逆変換装置の重複角は制御角、交流系統電圧の値が大きいほど、又転流インダクタンス、直流電流の値が小さいほど、小さくなる。

くなり、又制御角 β の値が大きいほど、この領域が広がることがわかる。

(b) 送電端交流系統電圧の動作可能領域

次に受電端側の動作条件を一定にした場合における送電端交流系統電圧の転流失敗限界はオ(2.16)式で与えられる。又、送電不能限界は(2.18)式あるいは次式で与えられる。すなわち

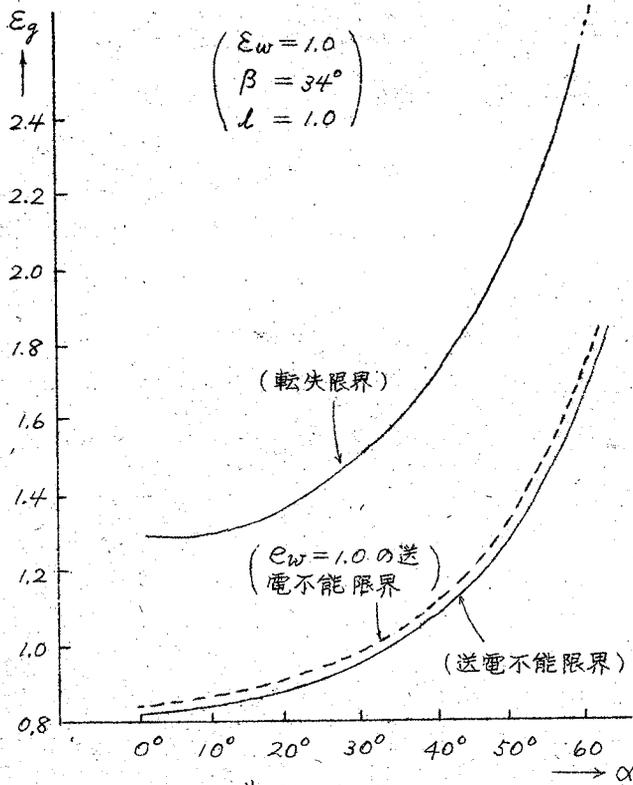


図 2-16

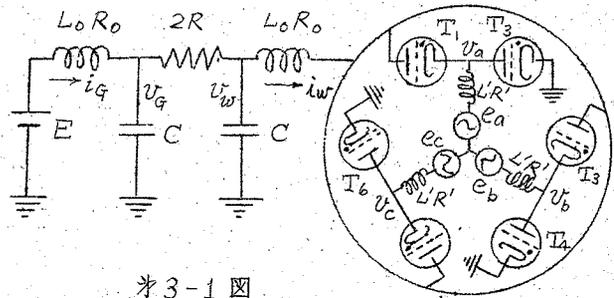
- 2) 直流電圧は直流電流の値には殆ど影響されない。
- 3) 直流送電系統における電力制御に際し、交流電圧にて制御を行う場合には順変換装置側で制御する方が有利であり、制御角で制御する場合には逆変換装置側の方がより有効である。
- 4) 送受電端の交流電圧には動作可能領域が存在し、受電

端側では制御角 β が大きくなるほど、交流電圧の動作可能領域が広がるが、送電端側では制御角 α には殆ど影響されない。又一般に転流インダクタンスが小さいほど交流電圧の動作可能領域は広がる。

第3章 「林の解析法」による直流送電系統の定常現象の解析

第2章においては近似解法により、直流送電系統の定常状態における動作特性の大略について吟味を行ったが、この章では近似解法では取扱うことのできない、回路常数 L_0 、 C 等の定常動作特性に及ぼす影響を「林の解析法」により吟味する。その際、第2章の解析結果から明かなように、一般に送電端の直流電圧は直流電流の変動には殆ど影響されないのので、第1-1図の回路において、順変換装置の出力直流電圧を第3-1

図に示めすように、直流電源 E でおきかえ、受電端の逆変換装置のみを一種の断続回路とみなし、断続回路に対する「林の解析法」を適用した。



第3-1図

第3-1表

勿論、実際には順変換装置も断続回路となっており、それについてはこの章の終りに別に吟味を行うが、一般に順変換装置の制御角 α は逆変換装置の制御角 β よ

回路状態	点弧放電管	回路状態	点弧放電管
1	T_1, T_4	7	T_2, T_3
2	T_6, T_1, T_4	8	T_5, T_2, T_3
3	T_6, T_1	9	T_5, T_2
4	T_3, T_6, T_1	10	T_4, T_5, T_2
5	T_3, T_6	11	T_4, T_5
6	T_2, T_3, T_6	12	T_1, T_4, T_5

りも小さく設定するのが普通であり、送電端側の電源電圧の脈動分による影響は受電端側電源電圧のそれよりも僅少であり、さらにここでは解析の目的が主として逆変換装置の動作特性を解明することであるので、このような仮定を導入した。

3.1. 回路方程式の導入

さて、いま第3-1図の回路において、逆変換装置の点弧放電管が第3-1表の第1番目回路状態に対応するものとするれば、次の回路方程式がえられる。すなわち

$$\begin{pmatrix} L_0 p + R_0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\{L_0 p + R_0 + 2(L' p + R')\} & 0 & 1 \\ -1 & 0 & (\frac{1}{2R} + Cp) & -\frac{1}{2R} \\ 0 & -1 & \frac{1}{2R} & -(\frac{1}{2R} + Cp) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}_1 I_G(p) \\ {}_1 I_W(p) \\ {}_1 V_G(p) \\ {}_1 V_W(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ {}_1 E_a(p) - {}_1 E_b(p) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$+ p \begin{pmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(L_0 + 2L') & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}_1 i_G^{-0} \\ {}_1 i_W^{-0} \\ {}_1 v_G^{-0} \\ {}_1 v_W^{-0} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

ここに ${}_1 i_G^{-0}$, ${}_1 i_W^{-0}$, ${}_1 v_G^{-0}$, ${}_1 v_W^{-0}$ * 等々は第1番目回路状態の開始直前における直流電流および直流電圧の値を与えるものであり、 ${}_1 E_a(p)$ および ${}_1 E_b(p)$ は受電端におけるa相およびb相の相電圧を演算子関数で表わしたものである。ここで ${}_1 I_G + {}_1 I_W \equiv {}_1 I_1$, ${}_1 I_G - {}_1 I_W \equiv {}_1 I_2$, ${}_1 V_G - {}_1 V_W \equiv {}_1 V_1$, ${}_1 V_G + {}_1 V_W \equiv {}_1 V_2$, $L_0 + 2L' \equiv L$, $R_0 + R' \equiv R_0^*$ とおき、さらに送電端側の平滑用コイル L_0 に順変換装置の転流インダクタンスを含ませれば第(3.1)式は次の2つの式に分離される。

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} Lp + R_0' \\ -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}_1 I_1(p) \\ {}_1 V_1(p) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E - ({}_1 E_a - {}_1 E_b) \\ 0 \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}_1 i_1^{-0} \\ {}_1 v_1^{-0} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} Lp + R_0' & 1 \\ -1 & Cp \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}_1 I_2(p) \\ {}_1 V_2(p) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E + ({}_1 E_a - {}_1 E_b) \\ 0 \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}_1 i_2^{-0} \\ {}_1 v_2^{-0} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} (3.2)$$

全く同様にして一般に第r番目の回路状態に対しては、回路方程式は次のようになる。

* (註) 左下の添字1はいずれも回路状態の番号を指す。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} Lp+R'_0 & 1 \\ -1 & \frac{1}{R}+Cp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} rI_1(p) \\ rV_1(p) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E-rE_w(p) \\ 0 \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ri_1^{-0} \\ rV_1^{-0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Lp+R'_0 & 1 \\ -1 & Cp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} rI_2(p) \\ rV_2(p) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E+rE_w(p) \\ 0 \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ri_2^{-0} \\ rV_2^{-0} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.3)$$

ここに右辺第1項の $rE_w(p)$ は各奇数番目回路状態については回路番号に無関係に同じ関数で与えられ、各偶数番目回路状態についても同様である。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \text{奇数番目回路状態においては} \\ r_o E_w(p) &= \int_0^{-1} \varepsilon_w \cdot \sqrt{6} E_{wph} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \beta + \omega t\right) \\ \text{偶数番目回路状態においては}^{**} \\ r_e E_w(p) &= \int_0^{-1} \varepsilon_w \cdot \sqrt{6} E_{wph} \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \omega t\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.3)'$$

又、偶数番目回路状態の継続期間中における転流方程式は次式で与えられる。

$$2 \times I_d(p) = I_w(p) + (i_w^{-0}) \frac{L'p}{L'p+R'} - \frac{1}{L'p+R'} \{E_c(p)\} \quad (3.4)$$

ただし $I_d(p)$ は消弧しつつある放電管を流れる電流であり、転流期間は $i_d(t) = 0$ の条件により求められる。又 $E_c(p)$ は転流時における短絡相間の線間電圧であつて次式のようなになる。すなわち

$$E_c(p) = \int_0^{-1} \varepsilon_w \cdot \sqrt{6} E_{wph} \sin(\beta - \omega t) \quad (3.4)'$$

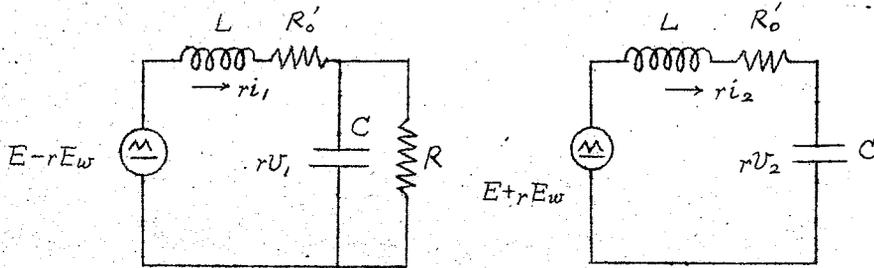
以上の解析結果から明かなように、我々の取扱つてゐる断続回路は2種類の回路状態、すなわち奇数番目回路状態と偶数番目回路状態とが交互に繰返されるものとなる。したがつて2種類の回路状態のみが繰返さ

* (註) \int_0^{-1} は Heaviside の逆変換演算子で所謂 Laplace 変換演算子に相当し、 $t \rightarrow p$ 変換を意味する。

** (註) 偶数番目回路状態に対しては (3.3) 式が正確には成立せず、受電端側の L および R'_0 はそれぞれ $L = L_0 + \frac{3}{2} L'$ 、 $R'_0 = R_0 + \frac{3}{2} R'$ となるが一般に $L_0 \gg L'$ 、 $L'\omega > R'$ であるので、この影響は無視して差しつかえない。

れる断続回路の解法が適用でき、その際式(3.4)式は偶数番目回路状態の継続期間を決定する補助方程式となる。以下においては奇数番目回路状態を回路番号の添字1で表わし、偶数番目のそれを2で表わすことにする。

尚、才3-1図の回路方程式を才(3.3)式で表示せうるといふことは、物理的には才3-1図の回路が、次の才3-2図a), b)の回路の合成されたものであると考えることに相当する。すなわち才(3.3)式の上側の方程式に対応する回路a)は起電力($E-rE_w$)が印加されており、直流電流を通すが、下側の方程式に対応する回路b)は起電力($E+rE_w$)が印加され、直流は流れない。



a) 上側の式に対応する回路

b) 下側の式に対応する回路

才3-2図

さて2種類の回路状態が繰返えされる断続回路の公式により、奇数番目ならびに偶数番目回路状態の定常解は、それぞれ次のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} {}_1\dot{I}_k(t) \\ {}_1V_k(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} {}_1\varphi_k(t) \\ {}_1\chi_k(t) \end{bmatrix} \left\{ [U] - [{}_1B_k] \right\}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} {}_2\varphi_k(\tau_2) \\ {}_2\chi_k(\tau_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}_1\varphi_k(\tau_1) \\ {}_1\chi_k(\tau_1) \end{bmatrix} \right\} \\ \begin{bmatrix} {}_2\dot{I}_k(t) \\ {}_2V_k(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} {}_2\varphi_k(t) \\ {}_2\chi_k(t) \end{bmatrix} \left\{ [U] - [{}_2B_k] \right\}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} {}_1\varphi_k(\tau_1) \\ {}_1\chi_k(\tau_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}_2\varphi_k(\tau_2) \\ {}_2\chi_k(\tau_2) \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

$k=1, 2, \text{ ただし } \lim_{n \rightarrow \infty} [{}_nB_k]^n = 0$

ここに $[{}_r\varphi_k(t)]$, $[{}_r\chi_k(t)]$, $[{}_rB_k]$ 等々はそれぞれ次式で与えられる。

* (註) 文献1) 参照。

$$\left. \begin{aligned}
 [r\varphi_1(t)] &= \mathcal{H} \cdot \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & \frac{1}{R}+Cp \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E-rE_w \\ 0 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \frac{E}{2R} \{r\varphi_{11}'(t)\} \\ E \{r\varphi_{12}'(t)\} \end{bmatrix} \\
 [r\varphi_2(t)] &= \mathcal{H} \cdot \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & Cp \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E+rE_w \\ 0 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \frac{E}{2R} \{r\varphi_{21}'(t)\} \\ E \{r\varphi_{22}'(t)\} \end{bmatrix} \\
 [r\chi_1(t)] &= \mathcal{H} \cdot p \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & \frac{1}{R}+Cp \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} r_1\chi_{11}'(t) & r_1\chi_{12}'(t) \\ r_1\chi_{21}'(t) & r_1\chi_{22}'(t) \end{bmatrix} \\
 [r\chi_2(t)] &= \mathcal{H} \cdot p \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & Cp \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} r_2\chi_{11}'(t) & r_2\chi_{12}'(t) \\ r_2\chi_{21}'(t) & r_2\chi_{22}'(t) \end{bmatrix} \\
 [{}_1B_K] &= [{}_2\chi_K(\tau_2)] [{}_1\chi_K(\tau_1)] \quad , \quad \tau_1+\tau_2 = \tau = \frac{1}{6f_0} \\
 [{}_2B_K] &= [{}_1\chi_K(\tau_1)] [{}_2\chi_K(\tau_2)] \quad , \quad r=1,2
 \end{aligned} \right\} (3.6)$$

*(3.6) 式中, $[r\chi_K(t)]$ は容易に推察されるように r には無関係となる。又後述の数値計算結果によれば, 一般に $[{}_1B_K] = [{}_2B_K]$ となる。更に $\{r\varphi_{ki}'(t)\}$, $\{r_k\chi_{ij}(t)\}$, $i, j=1, 2$ 等々の計算結果はそれぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned}
 \{r\varphi_{11}'(t)\} &= \left(\frac{1}{1+K}\right) \cdot 2 \{1-(T+S')\} + \left(\frac{1}{1+\mu}\right) a^2 S' \\
 &\quad - \frac{rE_w d}{E} (a^2) \{rA_1' \cos \omega t + rB_1' \sin \omega t + rC_1' \cdot \bar{E}^{-(\beta-\gamma)t} + rD_1' \cdot \bar{E}^{-(\beta+\gamma)t}\} \\
 \{r\varphi_{12}'(t)\} &= \left(\frac{1}{1+K}\right) \{1-(T+S')\} \\
 &\quad - \frac{rE_w d}{E} \{rA_2' \cos \omega t + rB_2' \sin \omega t + rC_2' \cdot \bar{E}^{-(\beta-\gamma)t} + rD_2' \cdot \bar{E}^{-(\beta+\gamma)t}\} \\
 \{r\varphi_{21}'(t)\} &= a \cdot \left(\frac{\alpha}{8}\right) \cdot \bar{E}^{-\beta \mu t} \cdot \sin \delta t \\
 &\quad + \frac{rE_w d}{E} \cdot a \left(\frac{\alpha}{8}\right) \{ (rI_1' \cos \omega t + rJ_1' \sin \omega t) - (rI_1' \cos \delta t + rK_1' \sin \delta t) \cdot \bar{E}^{-\beta \mu t} \}
 \end{aligned} \right\}$$

*(註) \mathcal{H} は所謂 Heaviside 演算子 $p \rightarrow t$ 変換を行うことを意味する。文献 1) 参照

$$\begin{aligned}
 \{r\varphi'_{22}(t)\} &= \left\{ 1 - \bar{E}^{-\beta\mu t} \left(\cos \delta t + \frac{\beta\mu}{\delta} \sin \delta t \right) \right\} \\
 &+ \frac{rE_{wd}}{E} \left\{ (rI'_2 \cos \omega t + rJ'_2 s \cdot \omega t) - (rI'_2 \cos \delta t + rK'_2 s \cdot \delta t) \cdot \bar{E}^{-\beta\mu t} \right\} \\
 r_1 \chi'_{11}(t) &= T' + \left(\frac{1-\mu}{1+\mu} \right) S', \quad r_1 \chi'_{12}(t) = -\frac{1}{2R} \cdot a^2 \left(\frac{1}{1+\mu} \right) S' \\
 r_1 \chi'_{21}(t) &= 2R \cdot \left(\frac{1}{1+\mu} \right) S', \quad r_1 \chi'_{22}(t) = T' - \left(\frac{1-\mu}{1+\mu} \right) S' \\
 r_2 \chi'_{11}(t) &= \bar{E}^{-\beta\mu t} \left(\cos \delta t - \frac{\beta\mu}{\delta} \sin \delta t \right), \quad r_2 \chi'_{12}(t) = -\frac{1}{2R} \cdot a \cdot \left(\frac{\alpha}{\delta} \right) \bar{E}^{-\beta\mu t} \cdot \sin \delta t \\
 r_2 \chi'_{21}(t) &= 2R \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \bar{E}^{-\beta\mu t} \cdot \sin \delta t, \quad r_2 \chi'_{22}(t) = \bar{E}^{-\beta\mu t} \left(\cos \delta t + \frac{\beta\mu}{\delta} s \cdot \delta t \right)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

ただし上式中の各常数および関数はそれぞれ次のように定義したものである。

$$\begin{aligned}
 K &\equiv \frac{R'_0}{R}, \quad \mu \equiv \frac{RR'_0 C}{L}, \quad \alpha \equiv \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \beta \equiv \frac{1}{2RC}, \quad a \equiv \frac{\alpha}{\beta}, \\
 \beta' &\equiv (1+\mu)\beta, \quad \gamma' \equiv \sqrt{\beta'^2 - \alpha'^2}, \quad \alpha'^2 \equiv (1+K)\alpha^2, \quad \delta \equiv \sqrt{\alpha'^2 - (\beta\mu)^2} \\
 1E_{wd} &\equiv \varepsilon_w \sqrt{6} E_{wph}, \quad 2E_{wd} \equiv \frac{\sqrt{3}}{2} 1E_{wd}, \\
 T' &\equiv \bar{E}^{-\beta't} \cdot \cosh \gamma't, \quad S' \equiv \frac{\beta'}{\gamma'} \cdot \bar{E}^{-\beta't} \sinh \gamma't
 \end{aligned} \tag{3.7}'$$

又 $rA'_k, rB'_k, rC'_k, rD'_k, rI'_k, rJ'_k, rK'_k$ 等々はすべて $rE_w(p)$ の初期位相角 θ_r^* に関する常数で、たとえば $2A'_k$ は $1A'_k$ 中の θ_r を θ_2 にあらためることによりえられる**

次に*(3.4)式、すなわち転流方程式の時間関数表示は次のようになる。

$$2 \times 2i_d(t) = 2i_w(t) + (2i_w^0) \cdot \bar{E}^{-bt} \frac{1E_{wd}}{L\omega} \cdot \cos \theta_0 \left\{ \cos(\beta - \theta_0 - \omega t) - \cos(\beta - \theta_0) \cdot \bar{E}^{-bt} \right\}$$

ただし $b \equiv R'/L, \theta_0 \equiv \tan^{-1} \frac{b}{\omega}$ (3.8)

前述のように $2i_d(\tau_2) = 0$ なる条件により、転流期間 τ_2 が決定される。

* (註) *(3.3)'式参照 $\theta_1 = \frac{\pi}{3} - \beta + u_2, \theta_2 = \frac{\pi}{2} - \beta$ である。

** 附録参照のこと。

3.2. 安定問題

(i) 過渡応答

この系統の各回路状態継続期間中における過渡応答は、まず図3-2図a)の回路については、式(3.6)式から明かなように、次の行列式の根を吟味すればよい。すなわち

$$\begin{vmatrix} Lp+R_0' & \\ -1 & \frac{1}{R}+Cp \end{vmatrix} = 0, \text{ あるいは } p^2+2\beta'p+\alpha'^2=0 \quad (3.9)$$

この式の根は、すでに式(3.7)式の結果をみれば明かであるが、 $p = -\beta' \pm \sqrt{\beta'^2 - \alpha'^2} = -\beta' \pm \gamma'$ となる。式(3.7)式の定義から明かなように、一般に $\beta'^2 > \alpha'^2$ となり、上の2根は共に負の実数となる。したがって図3-2図a)の回路の過渡応答は一般に非振動減衰となる。その際の減衰率は α'^2 が大きいほど、したがってLの値が小さいほど大きくなる。

次に同じく図3-2図b)の回路については、全く同様に次の行列式の根を吟味すればよい。すなわち

$$\begin{vmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & Cp \end{vmatrix} = 0, \text{ あるいは } p^2+2\beta\mu p+\alpha^2=0 \quad (3.10)$$

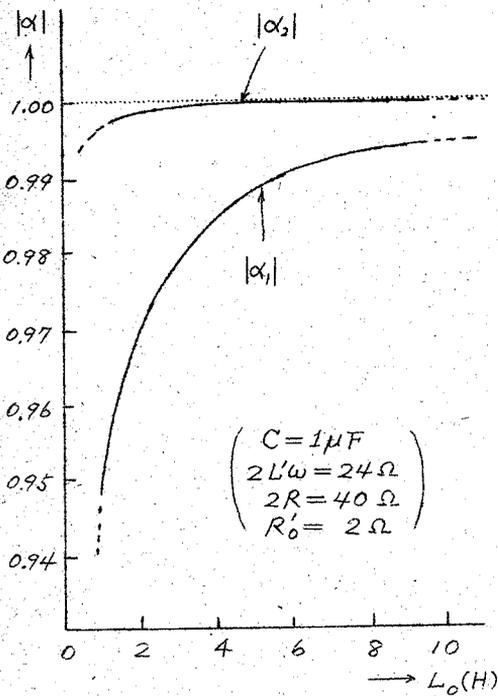
この式の根は $p = -\beta\mu \pm \sqrt{(\beta\mu)^2 - \alpha^2} = -\beta\mu \pm j\delta$ となる。すなわち $\beta\mu = \frac{R_0'}{2L}$ であるからこれは一般に α よりも、ずっと微小であり、したがってこの回路の過渡応答は、角周波数 δ で振巾減衰率の非常にゆるやかな振動応答となる。この場合も減衰率はLの値が小さいほど大きくなる。以上よりこの系統の過渡応答に関するかぎり、一般に平滑コイルLの値を小さく設定する方が安定となると考えられる。

(ii) 断続回路の安定問題

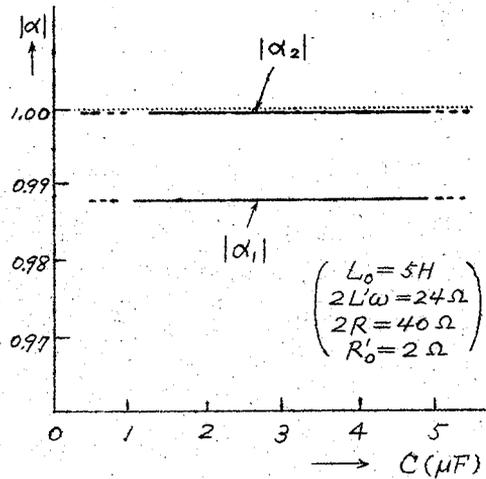
断続回路の安定問題は、周知のように、式(3.5)式右辺第2項中の $[rB_k]$ の特有根を求めることにより解明される。すなわち行列式 $|\alpha[U] - [rB_k]| = 0$ の根中、絶対値最大根の絶対値が1より小であれば断続回路は安定である。^{*} 尚我々の場合、数値計算結果によれば、一般に

* (註) 文献1)参照。

$[1B_k]=[2B_k]$ となるので、 $k=1$ に対応する $|\alpha|$ の最大値を $|\alpha_1|$ とし、 $k=2$ に対応する $|\alpha|$ の最大値を $|\alpha_2|$ とすれば、数値計算結果はオ3-3図、オ3-4図のようになる。



オ3-3図



オ3-4図

オ3-3図は L_0 の値と固有根の最大値との関係を求めたもので、この場合 α_1 は一般に正の実数となり、 α_2 は複素数となる。図から明かなように、 $|\alpha_1|, |\alpha_2|$ は共に L_0 の値が小さいほど減小し、したがって安定性をますが、 $|\alpha_2|$ すなわちオ3-2図b)の回路に対応する固有根は絶対値が殆ど1に近い値をとるので、過渡現象の収斂性は非常にわるいと考えられる。

オ3-4図は同じく C の値の固有根に及ぼす影響を吟味したものであるが、この場合は $|\alpha_1|, |\alpha_2|$ 共に殆ど一定となり、この系統の過渡現象の収斂性は C の値には殆ど無関係となる。

尚この他、 R'_0 の値が大きいほど、 L' の値が小さいほど $|\alpha_1|, |\alpha_2|$ は共に減小し、安定性をますがこれらは、いずれも通常 L_0 の影響に比し微

である。更に $2R$ のみは α 3-2 図の回路から明かなようにその値が大きくなると $|\alpha_1|$ のみ減小し、 $|\alpha_2|$ は $2R$ には無関係となる。

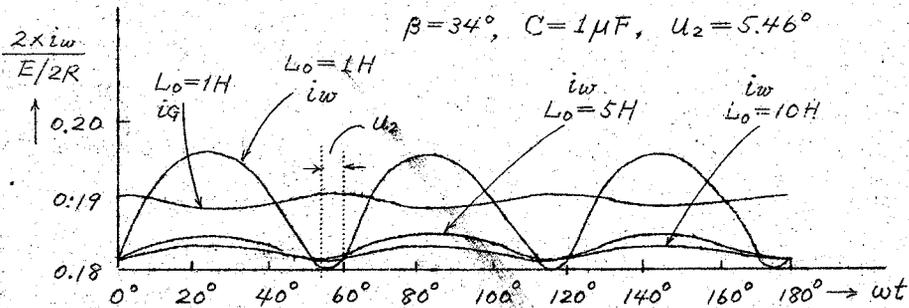
3.3. 数値計算例

以下の数値計算は、さきにも述べたように、すべて α 2 章における解析結果を考慮して、 $E=110\text{KV}$ 、 $E_{wph}=50\text{KV}$ 、 $I_g=I_w=250\text{A}$ を目標とし、 $2R=40\Omega$ 、 $2L'w=24\Omega$ 、 $R'_o=2\Omega$ 、 $\beta=34^\circ$ を基準とした。

さて、ここで取扱っている断続回路は、所謂 α 一類断続回路と α 三類断続回路の組合せになっているので、厳密な解析を行うには、 α (3.5) 式を α (3.8) 式に代入し、 $2i_d(\tau_2)=0$ となるような τ_2 の値を決定しなければならない。しかし、この方法により、 τ_2 の値を算出することは實際上非常に困難であるので、ここでは α 2 章でえられた τ_2 の値をあらかじめ与え、動作条件中、交流電圧 E_w を未知数として α (3.5) 式を算出し、これを α (3.8) 式に代入して、 $2i_d(\tau_2)=0$ の条件より E_w の値を決定することにした。その際、 α 2 章の計算結果から $\beta=34^\circ$ に対しては $u_2=5.46^\circ$ とした。

(i) L_o の影響

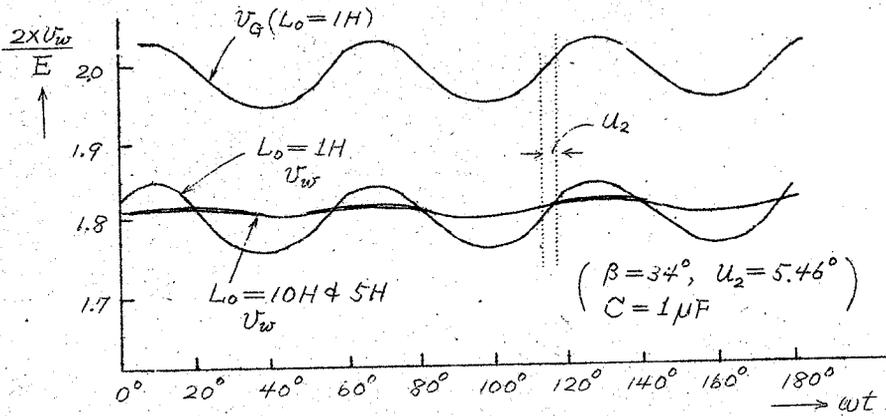
$\beta=34^\circ$ 、 $u_2=5.46^\circ$ と設定し、 $C=1\mu\text{F}$ 、 $2L'w=24\Omega$ 、 $2R=40\Omega$ 、



α 3-5 図

* (註) 偶数番目回路状態の継続期間すなわち転流期間は、電圧、電流の値によって変化するので、一種の α 三類断続回路と考えられる。

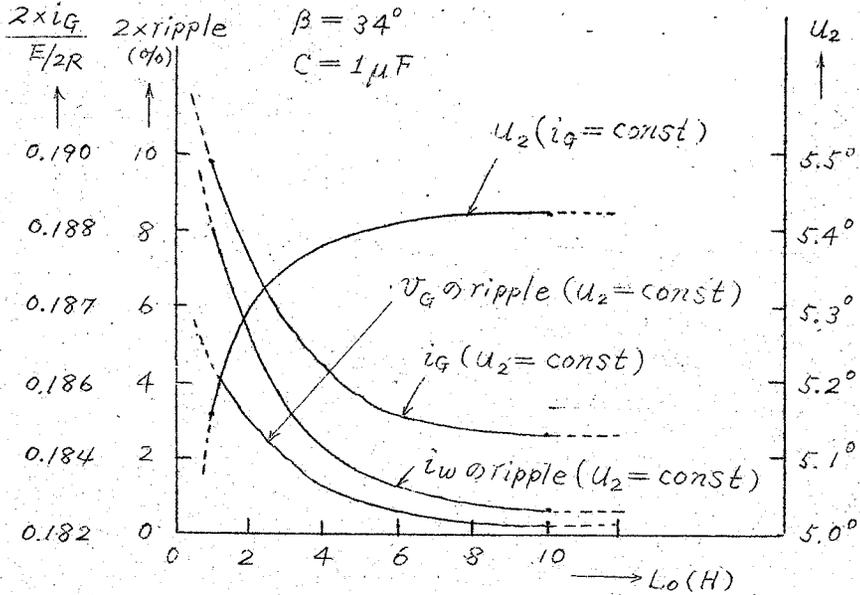
$R_0' = 2 \Omega$ とした場合における定常状態の計算結果はオ3-5図およびオ3-6図のようになる。オ3-5図は直流電流 i_w の定常波形を半サイクルに亘って図示したもので、この場合 L_0 の値として $1H$, $5H$, $10H$ と選定した。転流期間 u_2 は図示のように、いずれも電流の最低値近傍に位置



オ3-6図

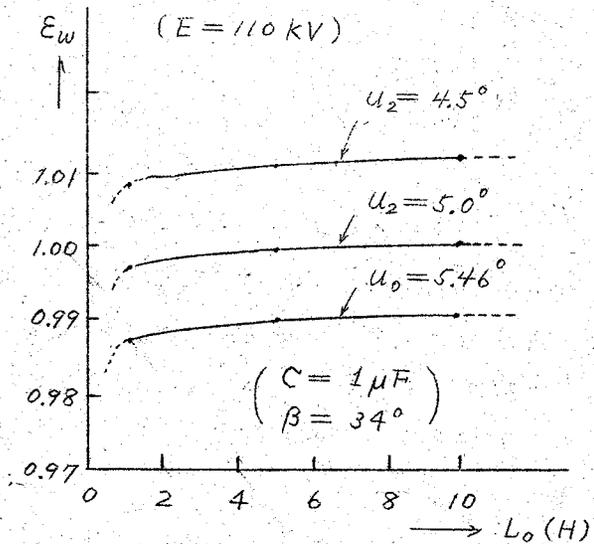
している。直流電流 i_G の波形については $L_0 = 1H$ のもののみを図示したが $L_0 = 5H, 10H$ の場合には殆んど脈動分を含まない直線波形となる。したがって、送電端側の直流電流 i_G は、受電端側電源電圧の脈動には殆ど影響されないと考えられる。オ3-6図は同じく直流電圧波形を半サイクルに亘って図示したもので、これらの図から明らかなように、電流波形、電圧波形とも主としてオ6高調波を含み、脈動の大きさは L_0 の値が小さいほど大きくなる。尚オ3-5図から明らかなように、直流電流の値は、上の計算例のように重複角を一定とした場合には、 L_0 の値が小さいほど大きくなる。これは、上にも述べたように、転流期間が直流電流 i_w の最低値近傍に位置するため、転流電流の終末値が、実際の直流電流（平均値）よりもいくらか低い値となることに起因する。したがって、もし送電端側の条件を一定として、更に直流電流の値を一定に整定する場合には、 L_0 の値が小さいほど、受電端側の交流電圧を u_2 を一定とした場合の値よりも高くしなければならず、その結果 L_0 の値が小さいほど、同一値の直流電流に対してはいくぶん重複角が小さくなる。

以上の計算結果より、重複角を一定とした場合における直流電流 i_G の値および i_w の脈動率、直流電圧の脈動率、および直流電流を一定とした場合における重複角、等々と L_0 との関係を図示すればオ3-7図がえられ



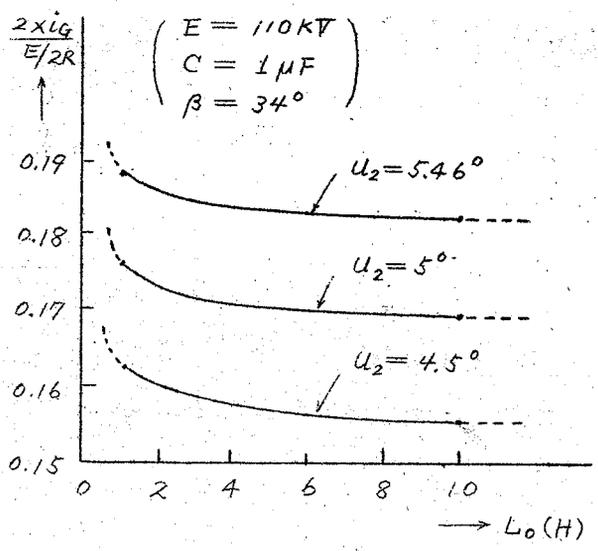
オ3-7 図

る。又、これらの計算例における交流電圧 E_w および直流電流 i_G の値を重複角 U_2 を助変数として図示すれば、オ3-8図およびオ3-9図のようになる。この場合、近似計算で求めた $U_2 = 5.46^\circ$ に対し、 E_w の値が1よりいく分小さくなっているが、これは近似計算の際に考慮しなかった R_0



オ3-8 図

の影響によるものである。直流電流 i_G の値については、 L_0 の値が充分大きい場合には、 u_2 のこの値に対しほぼ 250A、すなわち図示の単位で 0.182 となっている。

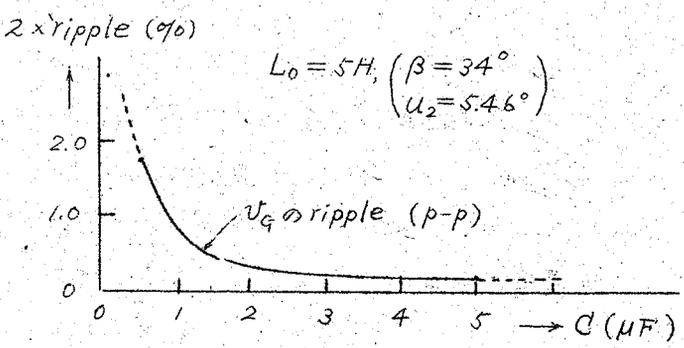


※ 3-9 図

(ii) C の影響

(i) では、いずれも $C = 1\mu F$ と選定して L_0 の影響について吟味した

が、ここでは $L_0 = 5H$, $\beta = 34^\circ$, $u_2 = 5.46^\circ$ とえらんで C の影響につき吟味する。数値計算によれば、この場合、直流電流は波形ならびに波高値とも C には殆ど無関係となるが、直流電圧は C の値が小さいほど脈動分がふえる。直流電圧の脈動率におよぼす C の影響を図示すれば※3-10 図がえられる。このように C の値が十分大きい場合には C による影響は L_0 による影響に比し殆ど無視しうる。



※ 3.10 図

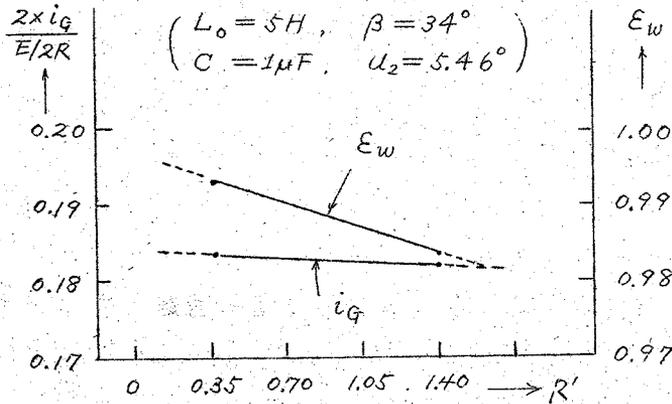
(iii) L' の影響

L' すなわち、転流インダクタンスの影響については、すでに※2章の

解析結果から明らかなように L' の値が大きくなると重複角が大きくなるが、さらにオ3-2図の回路から明らかなように、 L の中に L' が含まれているので、直流電圧、直流電流の脈動率も L' の値が大きくなるといく分小さくなる。

(iv) R' の影響

送電端の電圧 E を一定とし、 R' の影響について吟味すると、オ3-11図の結果がえられる。これは重複角を一定とした場合における計算結果



オ3.11図

を示すものであるが、図からわかるように、一般に R' の値が大きくなるにしたがって、重複角を一定とすべき交流電圧 E_w の値はいくらか小さくなるが、その際、直流電流の値もわずかに減少する。したがって直流電流の値を同一値に整定するには、 R' の値が大きいほど E_w の値を、尚一層低くとらねばならない。それ故 R' の値が大きいほど直流電流の値を同一にすべき重複角の値はかえって大きくなると考えられる*。

(v) $2R$ の影響

$2R$ は送電線損失を与えるもので、以上の計算例においては、すべて

* (註) 勿論受^電端側の条件を一定に設定した場合には R' の値が大きいほど u_2 は小となり、従来より指摘された通りであるが、この場合、電流の平均値(直流)は小さくなる。

これを $2R=40\Omega$ と設定したが、もし $2R$ の値がこれより小さい場合、すなわち、送電線電圧降下が 10% 以下の場合には、送電端直流電圧 E を一定とすれば、上の R' の場合と全く同じ傾向があらわれる。しかしもし受電端の条件を一定とし、送電電圧 E を $2R$ の値に応じて変化させるものとすれば $2R$ の影響は全然現れない。これは R_0 についても全く同じことがいえる。

(vi) 制御角 β の影響

制御角 β の値が大きくなれば、重複角が小さくなることはすでに 2 章より明らかである。その他に、直流電圧および直流電流の脈動率も β の値により、いくらか変化する。これは β の値が大きいくほど、図 3-2 図における電源電圧の脈動分が増加するためである。

(vii) 順変換装置側の影響

以上における解析例は、いずれも図 3-1 図の回路、すなわち順変換装置の出力電圧を直流電源 E でおきかえた回路について解析を行ったもので、受電端側の逆変換装置の動作により誘発される電源電圧脈動は、図 3-5 図から明らかなように、送電端側の直流電流 i_G には殆ど影響していない。しかし実際には送電端側の直流電圧 E も順変換装置の動作により脈動電圧となるので、ここでは特にこの脈動電圧の直流電流 i_G に

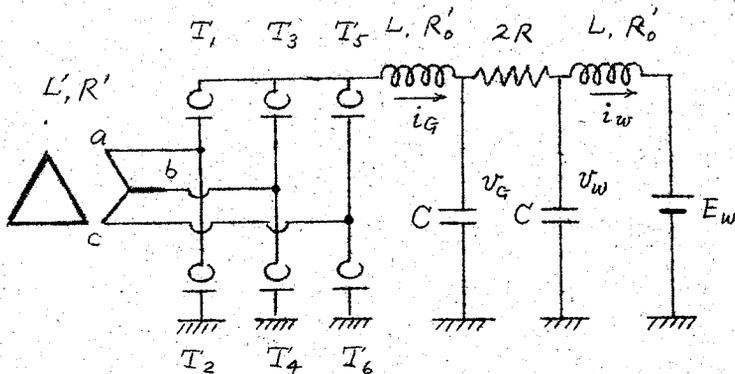


図 3-12 図

及ぼす影響について吟味を行う。

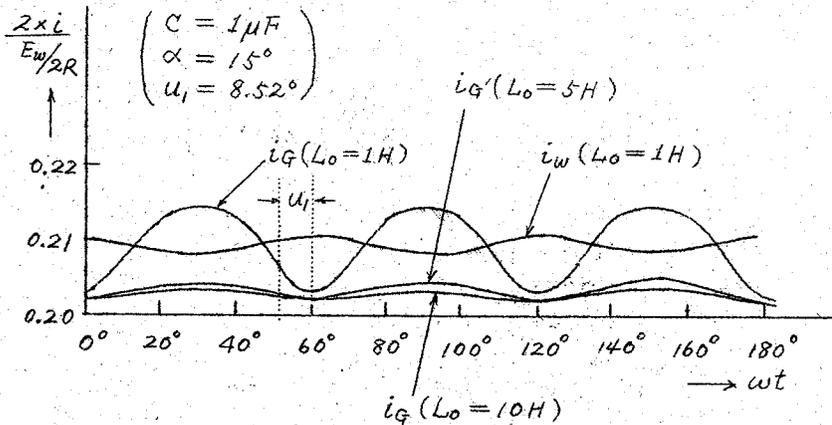
その際回路としては、才3-1図と逆に才3-12図に示すような逆変換装置の入力電圧を直流電源電圧 E_w でおきた回路を考える。この回路の定常運転時における回路方程式は才(3.3)式と全く同様にして次のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & Cp+\frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} rI_1(p) \\ rV_1(p) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} rE_G(p)-E_w \\ 0 \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ri_1^- \\ rV_1^- \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & Cp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} rI_2(p) \\ rV_2(p) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} rE_G(p)+E_w \\ 0 \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ri_2^- \\ rV_2^- \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} (3.11)$$

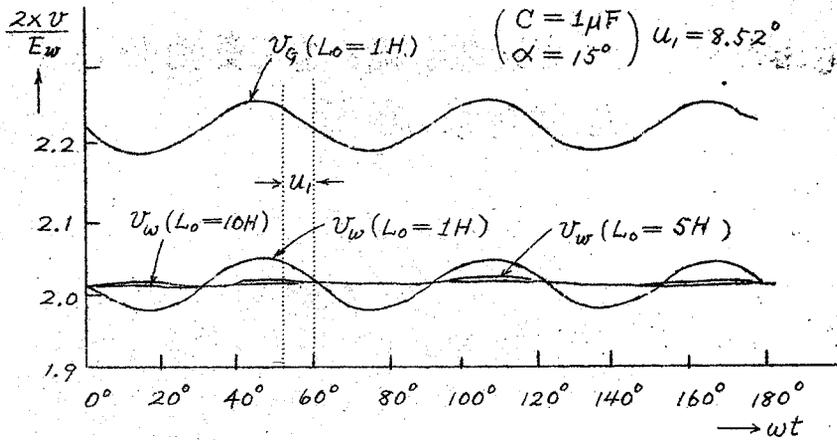
$$\left. \begin{aligned} \text{奇数番目回路状態においては} \quad r_0 E_G(p) &= h^{-1} \varepsilon_g \sqrt{6} E_{gph} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha + u_1 + \omega t\right) \\ \text{偶数番目回路状態においては} \quad r_e E_G(p) &= h^{-1} \varepsilon_g \sqrt{6} E_{gph} \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + \omega t\right) \end{aligned} \right\} (3.11)'$$

上式より定常解を算出する手順は、さきの3.1と全く同様に進めることができ、結果も殆ど同じ式となるが、ただ、 $[r\varphi_i(t)]$ の項の符号が逆になり、且つ初期位相 θ_1 および θ_2 が異った値になる。

さて、数値計算に当っては、各常数を(i)の場合と全く同様に設定し、定常時においては制御角 α を才2章の解析結果から $\alpha=15^\circ$ と選定した。さらに、直流電源 $E_w=100\text{KV}$ 、 $u_1=8.52^\circ$ として(i)と全く同様の



才3-13図



※3-14 図

計算法に従った。※3-13 図および 3-14 図は $C=1\mu F$ として L_o のみを (i) の場合と同様 $1H, 5H, 10H$ について計算したものである。

(i) の場合と全く同様に、一般に L_o の値が小さいほど直流電圧、直流電流の脈動分は大きくなっており、又、転流期間 u_1 はやはりほぼ電流最低値の近傍に位置している。

したがって、受電端側の直流電圧 E_w を一定とし、さらに直流電流を一定に整定するには L_o の値が小さいほど送電端側の交流電圧 E_g を下げねばならず、それ故、この場合は L_o の値が小さいほど重複角 u_1 は大きくなる。

尚、直流電流 i_w は図から明らかのように殆ど脈動分を含まないが、これを (i) の結果と考え合わせると、一般に平滑用コイル L_o の値が十分大きい場合には、送電端側の直流電流 I_G の脈動分は順変換装置の動作条件のみによって影響され、又、逆に受電端側の直流電流 i_w の脈動分は逆変換装置の動作条件のみによって影響されると考えて差しつかえない。

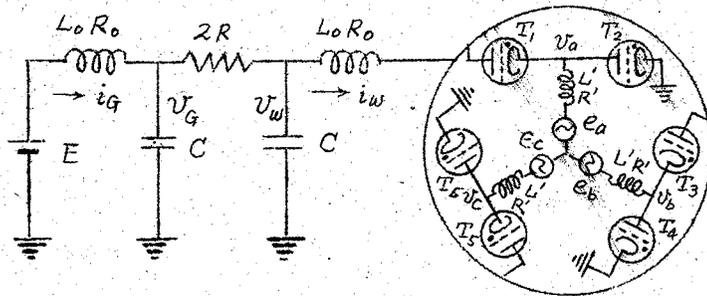
以上、直流送電システムの定常特性、特に直流電圧ならびに直流電流の脈動分に及ぼす各回路常数の影響を詳細に亘って吟味したが、これらの結果より一般に定常時においては、平滑用コイル L_o の影響が最も顕著であると結論される。

第4章 直流送電系統の電圧変動時における過渡現象の解析

この章においては、直流送電系統の電源電圧変動時における過渡現象の解析結果について述べる。その際、電源電圧の変動としては、送電端側の交流系統電圧が変動する場合と受電端側の交流系統電圧が変動する場合の2通りが考えられるが、第2章の解析結果から明かなように、この系統の運転安全性、とくに逆変換装置の動作条件の点から考察すれば、受電端側の交流系統電圧が降下する場合が最も重要な影響を与える。したがってここでは電源電圧の変動として、過負荷変動中とくに受電端側の交流系統電圧が降下する場合のみに注目し、その際、直流送電系統としては、第3章におけると全く同様の理由で、第4-1図の回路をとりあげ、この回路の受電端側交流系統電圧

第4-1表

回路状態	点弧放電管	回路状態	点弧放電管
1	T_1, T_4	7	T_2, T_3
2	T_6, T_1, T_4	8	T_5, T_2, T_3
3	T_6, T_1	9	T_5, T_2
4	T_3, T_6, T_1	10	T_4, T_5, T_2
5	T_3, T_6	11	T_4, T_5
6	T_2, T_3, T_6	12	T_1, T_4, T_5



第4-1図

e_a, e_b, e_c がそれぞれ三相对称に降下する場合と、三相非対称に降下する場合の2通りにつき吟味を行うことにする。

4.1. 回路方程式の導入

(i) 三相对称降下の場合

定常運転状態において受電端交流電圧が三相对称に急激に降下するものとすれば、電圧降下発生直後における回路方程式は電圧降下発生時点により異なる。たとえば、定常運転時における奇数番目回路状態の継続期間中に電圧降下が発生した場合には、その直後の回路方程式は次式で与えられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \left[\begin{array}{cc} Lp+R'_0 & 1 \\ -1 & \frac{1}{R}+C_p \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} {}_1I_1(p) \\ {}_1V_1(p) \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{c} E-{}_1E'_w(p) \\ 0 \end{array} \right] + p \left[\begin{array}{cc} L & 0 \\ 0 & C \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} {}_1i_1^- \\ {}_1v_1^- \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{cc} Lp+R'_0 & 1 \\ -1 & C_p \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} {}_1I_2(p) \\ {}_1V_2(p) \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{c} E+{}_1E'_w(p) \\ 0 \end{array} \right] + p \left[\begin{array}{cc} L & 0 \\ 0 & C \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} {}_1i_2^- \\ {}_1v_2^- \end{array} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

ここに ${}_1i_k^-, {}_1v_k^-$ 等々は電圧降下発生直前におけるそれぞれの値を与えるものであり、 ${}_1E'_w(p)$ は次式のようなになる。

$${}_1E'_w(p) = \mathcal{L}^{-1} \mathcal{E}'_w \sqrt{6} E_{wph} \sin \left(\frac{\pi}{3} - \beta + u_2 + \omega t_1 + \omega t \right) \quad (4.1')$$

ただし、上式右辺の t_1 は定常運転時における奇数番目回路状態の始端から、電圧降下発生時点までの時間を表わし、又 \mathcal{E}'_w は電圧降下後における交流電圧の変動係数である。

さて、才(4.1)式で与えられる回路状態は $(t_2 - t_1)$ 時間の期間だけ継続し、次に定常運転時と全く同様に転流期間へと移行する。この場合における転流期間は交流電圧が降下しているので定常運転時よりも長くなる。そしてもし転流失敗が発生しなければ更に次の奇数番目回路状態に移行し、以下定常時と同様の点弧経過をたどるが、直流電流も急激に上昇するので、転流期間は時間と共に増大する。この場合、電圧降下率が才2章でのべた転流失敗条件の値よりも微小であれば、この系統は電

圧変動後も一応安全に動作する。

全く同様にして、もし電圧降下が定常運転時における偶数番目回路状態の継続期間中に発生したとすれば、その直後における回路方程式は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & \frac{1}{R}+Cp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2I_1(p) \\ 2V_1(p) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E-2E_w'(p) \\ 0 \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2i_1^{-0} \\ 2v_1^{-0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & Cp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2I_2(p) \\ 2V_2(p) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E+2E_w'(p) \\ 0 \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2i_2^{-0} \\ 2v_2^{-0} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

ここに $2E_w'(p)$ は次式で与えられる。

$$2E_w'(p) = h^{-1} \varepsilon_w' \sqrt{6} E_{wph} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \omega t_2 + \omega t\right) \quad (4.2)'$$

ただし、上式右辺の t_2 は定常時における偶数番目回路状態の始端から電圧降下発生時点までの時間を示す。

又、この場合における転流方程式は次のようになる。

$$2 \times I_d(p) = I_w(p) - \frac{L'p}{L'p+R'} (i_w^{-0} - 2i_d^{-0}) - \frac{1}{L'p+R'} \{E_w'(p)\} \quad (4.3)$$

ここに i_w^{-0} , i_d^{-0} 等はそれぞれ電圧降下直前におけるそれらの値を与るものであり、又 $E_w'(p)$ は次式で与えられる。すなわち

$$E_w'(p) = h^{-1} \varepsilon_w' \sqrt{6} E_{wph} \sin(\beta - \omega t_2 - \omega t) \quad (4.3)'$$

才(4.2)式および才(4.3)式によつて、この場合における転流期間が決定され、もしその際、転流失敗が発生しなければ、上の奇数番目回路状態にて電圧降下が発生した場合と全く同様にして、次の回路状態へと移行し、以後、転流失敗が発生しなければ定常時と全く同様の点弧経過をたどる。

さて、才(4.1)式又は才(4.2)式の時間関数表示式は才3章才(3.5)式と同様に次のようになる。

すなわち

$$\begin{bmatrix} r i_k(t) \\ r i_k(t) \end{bmatrix} = [r \varphi_k(t)] + [r \mathcal{X}_k(t)] \begin{bmatrix} r i_k^{-0} \\ r v_k^{-0} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

上式中 $[r \varphi_k(t)]$ は式(3.6)式において $r E_w(p)$ を $r E_w'(p)$ に置換したものであり、 $[r \mathcal{X}_k(t)]$ は式(3.6)式のものと同じである。三相對称な電圧降下時における過渡現象は上の式(4.4)式を逐次計算し、各回路状態における終末値を次の回路状態の初期値とする計算操作を順次繰返すことによつて求められる。

(ii) 三相非対称降下の場合

この場合、一相のみが降下する場合と二相のみが降下する場合の2通りが考えられるが、ここでは簡単のため前者の場合のみに注目する。

回路方程式はこの場合も式(4.1)式および式(4.2)式と全く同様となるが、ただ式中の $r E_w'(p)$ が電圧降下発生後、時間の経過と共に変化する。すなわち、定常状態ならびに三相對称降下の場合には、常に2種類の回路状態すなわち、奇数番目回路状態と偶数番目回路状態の繰返しに過ぎなかつたが、この場合には6種類の回路状態の繰返しとなる。これを例により説明すると、たとえば、三相中b相の電圧のみが降下したとして、定常も2番目回路状態に対応する期間、すなわち、点弧放電管が T_1, T_6, T_4 、である場合につき考察すれば、この場合における各相の電圧は次式で与えられる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} 2E_a(t) &= \varepsilon_w \sqrt{2} E_{wph} \cdot \varepsilon^{j(\frac{\pi}{2}-\beta+\omega t)} \\ 2E_b(t) &= \varepsilon_w (1-\delta) \sqrt{2} E_{wph} \cdot \varepsilon^{j(\frac{\pi}{2}-\beta+\omega t-\frac{2}{3}\pi)} \\ 2E_c(t) &= \varepsilon_w \sqrt{2} E_{wph} \cdot \varepsilon^{j(\frac{\pi}{2}-\beta+\omega t-\frac{4}{3}\pi)} \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

ただし、 $2E_a(t)$ は $2e_a(t)$ を複素数表示で与えたものである。又、 δ は

* (註) 勿論、過渡状態においては三相對称降下の場合といえども各回路状態の継続期間はすべてお互に異つたものとなるが、しかし、電源電圧の振巾および初期位相は2種類のみの繰返しである。

電圧降下率を与えるもので、たとえば、20%電圧降下の場合には $\delta = 0.2$ とし、 $E_w' = E_w(1-\delta)$ とすべきものである。

さて、この場合、式(4.2)'式に対応する受電端起電力は次のようになる。すなわち

$${}_2E_w'(t) = {}_2E_a(t) - \frac{{}_2E_b(t) + {}_2E_c(t)}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_w \sqrt{6} E_{wph} \cdot \delta_2'' \cdot \epsilon^{j(\frac{\pi}{2} - \beta - \theta_2'' + \omega t)}$$

ここに

$$\delta_2'' = \frac{2}{3} \sqrt{1 + \left(\frac{X}{2}\right)^2 + 2\left(\frac{X}{2}\right) \cos(\theta' - \frac{\pi}{3})}, \quad \theta_2'' = \tan^{-1} \frac{\frac{X}{2} \sin(\theta' - \frac{\pi}{3})}{1 + \frac{X}{2} \cos(\theta' - \frac{\pi}{3})}$$

ただし

$$X \equiv 1 - \delta + \delta^2, \quad \theta' \equiv \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{1 - 2\delta} \right)$$

(4.6)

同様に式(4.3)'式の $E_w'(p)$ に対応する転流回路の起電力は、この場合次のようになる。すなわち

表4-2

定常時 回路状態	$\beta_r' = \beta + \theta_r'$	転流電圧 δ_r'	$\beta_r'' = \beta + \theta_r''$	直流電圧 δ_r''
	θ_r'		θ_r''	
1			$\oplus 3.67^\circ$	0.90185
2	$\ominus 3.67^\circ$	0.90185	$\oplus 3.42^\circ$	0.9684
3			0°	1.0000
4	$\oplus 3.67^\circ$	0.90185	$\ominus 3.42^\circ$	0.9684
5			$\ominus 3.67^\circ$	0.90815
6	0°	1.0000	0°	0.86667
7			$\oplus 3.67^\circ$	0.90815
8	$\ominus 3.67^\circ$	0.90185	$\oplus 3.42^\circ$	0.9684
9			0°	1.0000
10	$\oplus 3.67^\circ$	0.90185	$\ominus 3.42^\circ$	0.9684
11			$\ominus 3.67^\circ$	0.90185
12	0°	1.0000	0°	0.86667

$$E_w'(t) = {}_2E_b(t) - {}_2E_c(t) = \varepsilon_w \sqrt{6} E_{wph} \delta_2' \cdot \varepsilon^{j(-\beta_2' + \omega t)}$$

ここに

$$\delta_2' = \sqrt{1 - \delta - \frac{\delta^2}{3}}, \quad \beta_2' = \beta + \theta_2', \quad \theta_2' = \frac{\pi}{6} - \theta$$

$$\theta \equiv \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{3 - 2\delta} \right)$$
(4.7)

以上のように δ_r' , δ_r'' および θ_r' , θ_r'' はそれぞれ定常状態の場合に対する偏差の目安を与えるもので、他の回路状態に対しても全く同様の方法により算出することができる。表4-2表はb相のみが20%の電圧降下を発生した場合に対する計算例である。

この表から明らかなように、この場合6種類の回路状態が繰返され、等価的制御角 β_r' の値は定常時に比して大きくなったり小さくなったりすることがわかる。

4.2. 数値計算例

数値計算に当っては第3章と同様、定常時においては $E = 110 \text{ kV}$, $E_{wph} = 50 \text{ kV}$, $I_G = I_W = 250 \text{ A}$ を目標とし、 $2R = 40 \Omega$, $2L'_W = 24 \Omega$, $R'_0 = 2 \Omega$, $\beta = 34^\circ$ を基準とした。

尚、簡単のために、三相对称降下ならびに非対称降下とも、それぞれ電圧降下が定常第2番目回路状態の始端附近で発生するものとし、電圧降下率を20%に選定した。

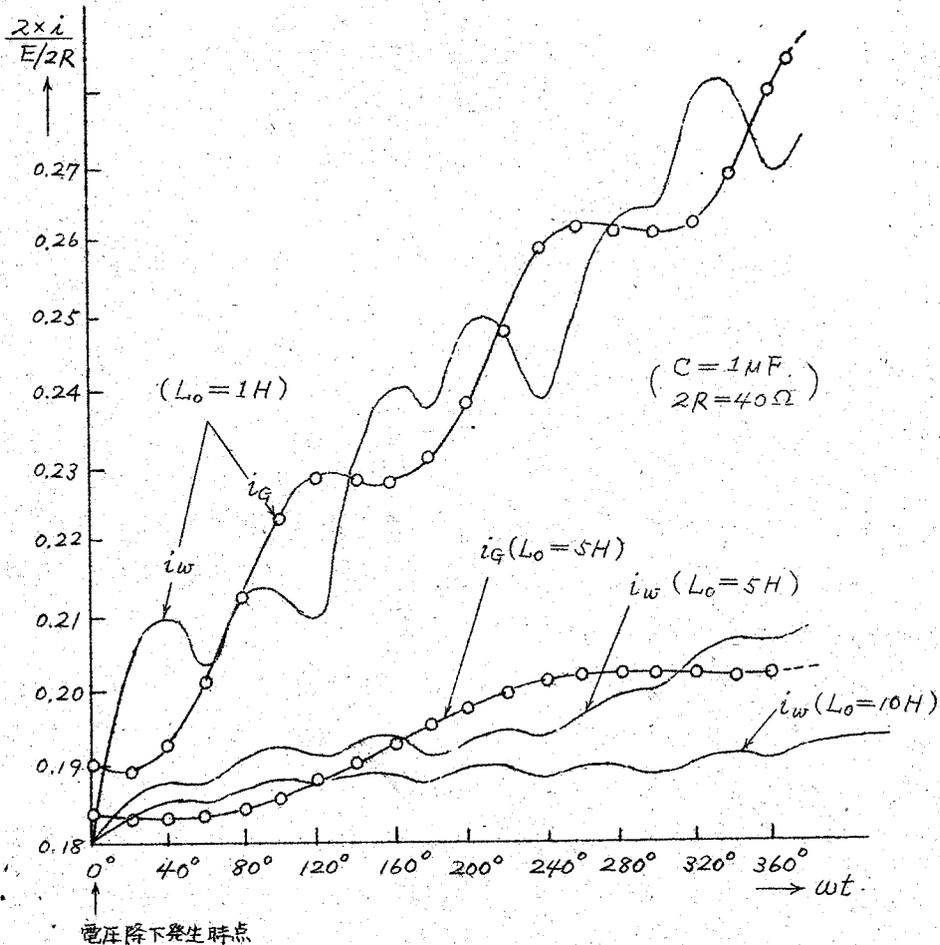
また、第3章においては直流送電系統の各回路常数が定常特性に及ぼす影響を詳細に吟味したが、ここでも、同様に各回路常数の過渡特性に及ぼす影響を主として吟味する。

(i) L_0 の影響

定常運転時においては、この系統の特性に対する L_0 の影響は主として直流電流および直流電圧の脈動分に対するもののみと考えてよかつたが、過渡時においては後述するようになりに重要な影響を及ぼすので、

ここではこれを電圧変動時における過渡現象について考察する。

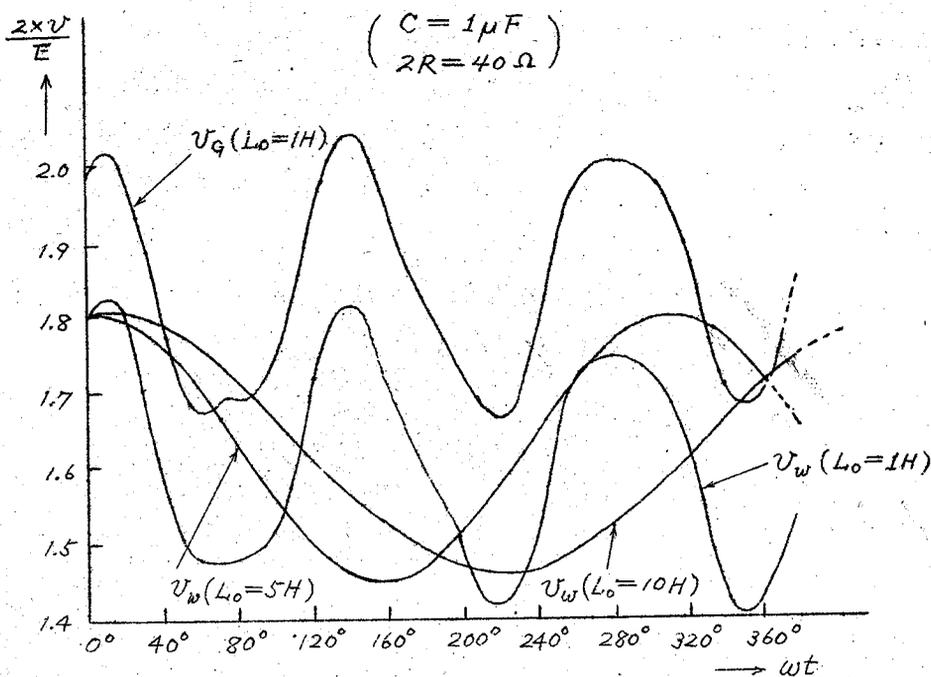
オ4-1図の回路が定常運転状態にあるとき、定常偶数番目回路状態の始端において、三相對称に20%の電圧降下が発生した直後における直流電流ならびに直流電圧の過渡経過はそれぞれオ4-2図およびオ4-3図



オ4-2図

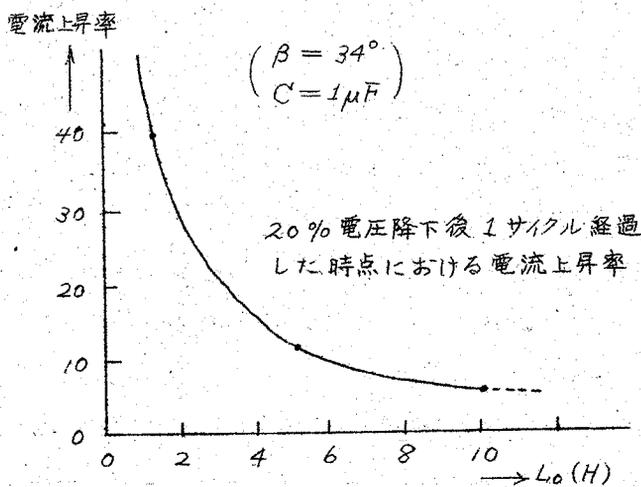
のようになる。図は $C = 1\mu F$ とした場合における計算結果で、いずれも電圧降下後1サイクルに亘る過渡経過を图示したものである。

オ4-2図から明らかなように L_o の値が小さいほど直流電流の上昇速度が急峻になっており、又 L_o の値が1H程度以上の場合には、過渡経



※4-3 図

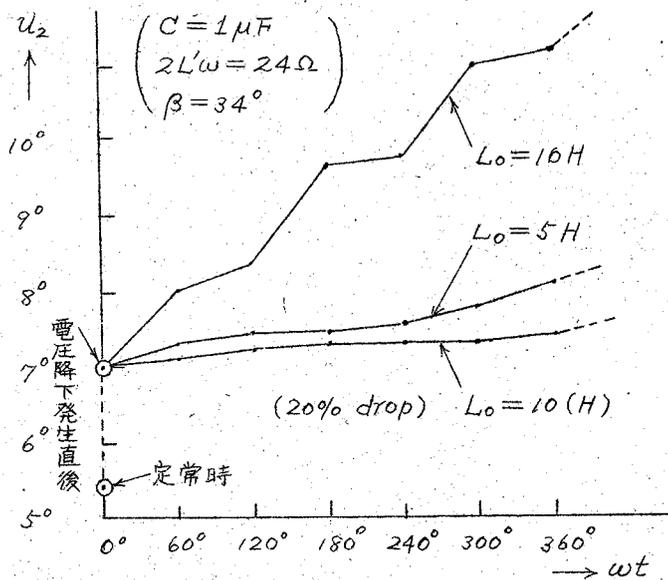
過1サイクル前後の期間に亘つては殆ど直線的に電流値が増大していく。電圧降下後1サイクル経過した時点における電流上昇率と L_0 との関係を図示すれば※4-4 図のようになる。



※4-4 図

オ4-3図は直流電圧の過渡経過を示したものであるが、図から明らかのようにこの場合、ほぼ $\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{L_0 C}} \right)$ で与えられる共振周波数を有し、約20%の振巾をもつ振動電圧を発生することがわかる。又、オ3章でも述べたように、過渡状態の収斂性は L_0 の値が小さいほど早くなっている。

尚、これらの場合における重複角変化の時間的経過を图示すればオ4-5図のようになるが、この場合、 $\beta = 34^\circ$ は20%の電圧降下に対し、

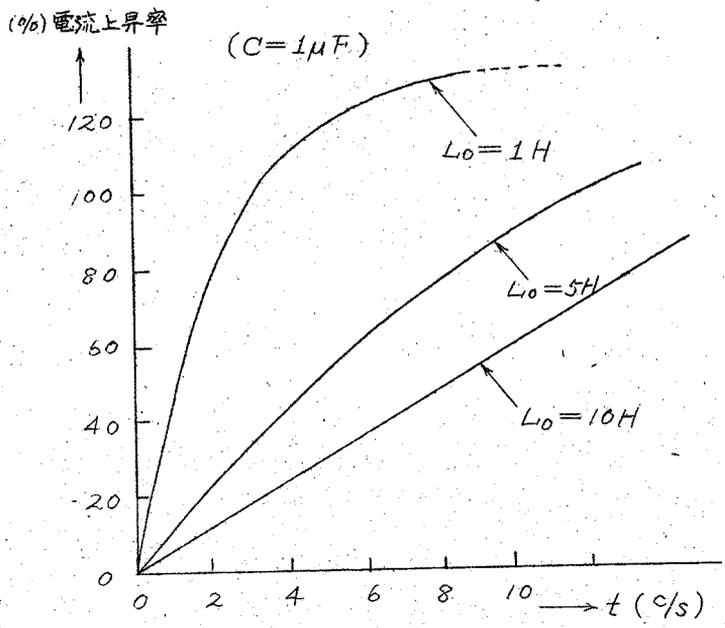


オ4-5図

L_0 の値が大きい場合には十分安全側にあることが知れる。 L_0 の値が $1H$ の場合でも電圧降下後、1サイクル経過した時点における逆変換装置の余裕角^{*}は未だ 23° 程度となっている。

電流上昇の時間的経過を上記の計算例から更に延長して約10サイクルに亘って求めると、近似的にオ4-6図がえられる。これは上の1サイクルの過渡経過中 $\frac{i\omega + i\sigma}{2} = i_R$ についていえば、各 $1/6$ サイクル毎の i_R の上昇率がほぼ一定の割合で減少していくので、この減少率をそのまま

* (註) 制御角 β から重複角 u_2 を引いたものを指す。

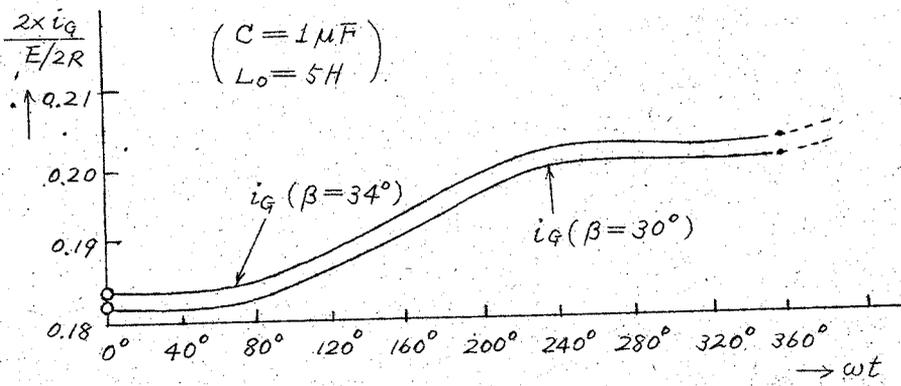


※4-6 図

10 サイクルに亘って延長し計算したものである。

(ii) 制御角 β の影響

回路常数をすべて同一値に設定した場合における制御角 β の定常状態における影響については、すでに第3章で述べたように、重複角 u_2 お



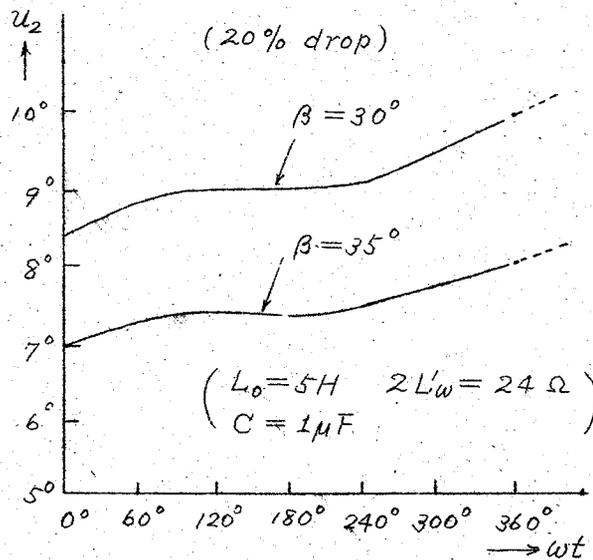
※4-7 図

よび直流電圧、電流の脈動率に変化をもたらすことを指摘したが、ここではこれを更に過渡現象について吟味してみる。

才4-7図は $L_0=5H$, $C=1\mu F$, $2L'\omega=24\Omega$, とした場合, $\beta=30^\circ$ および $\beta=34^\circ$ の2通りの場合について, それぞれ受電端交流電圧が(i)と同様三相对称に20%の電圧降下を発生した直後における過渡経過の計算結果である。

ただし, 初期電流値が $\beta=30^\circ$ と 34° で互に異った値になっているのは, 定常状態の数値計算結果を用いたためで, 図から明らかなように直流電流 i_g の過渡経過は制御角には殆ど無関係となる。このことは図には割愛したが, 直流電流 i_w , 直流電圧 v_g および v_w についても全く同様のことがいえる。

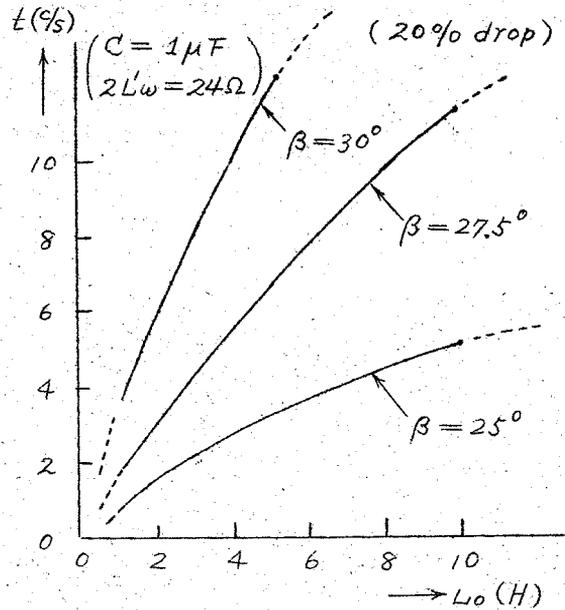
又, これらの場合における重複角変化の過渡経過を図示すれば才4-8図のようになるが, 一般に制御角 β の値が小さいほど, 時間の経過につ



才4-8図

れて重複角の増加分が大きくなる。図から明らかなように, L_0 の値を十分大きく選定しておけば $\beta=30^\circ$ の場合でも20%の電圧降下に対し, 十分安全側にあることが知れる。

さて、*2章で算出した転流失敗条件と、(i)の最後に与えた電流上昇率の過渡経過とを組合せ、さらに、この(ii)で吟味したように電流上昇率が制御角に全く無関係であることより、受電端交流電圧が20%降下した場合における転流失敗発生時点と L_0 と関係が求められる。*4-9図はその結果を図示したものである。ただし $\beta=34^\circ$ に対しては*2章



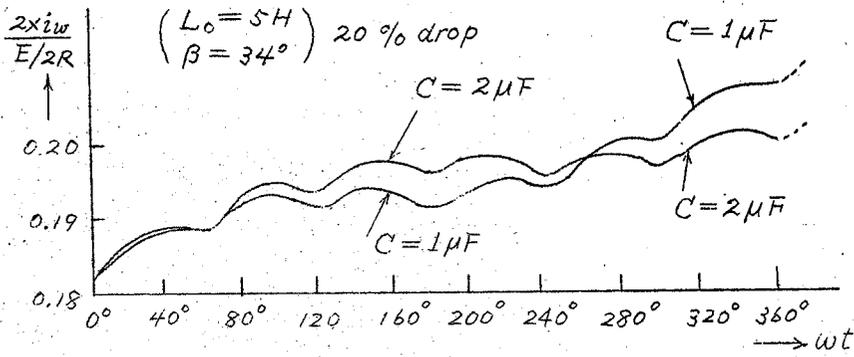
*4-9 図

に述べたように、20%の電圧降下に際し、転流失敗を発生しない。

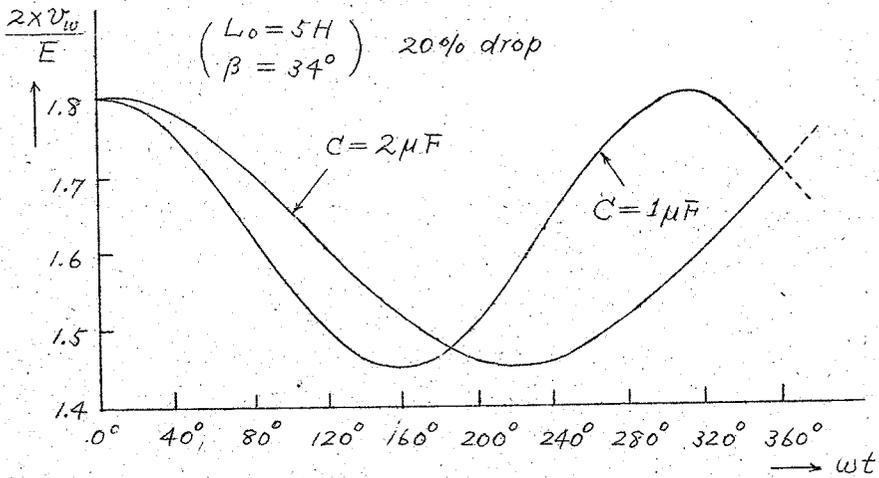
(註) 以上の数値計算においては、いずれも平滑用コイル L_0 を理想的なものとし、飽和は考えていない。この章以後における計算例もすべてこれにならっている。

(ii) Cの影響

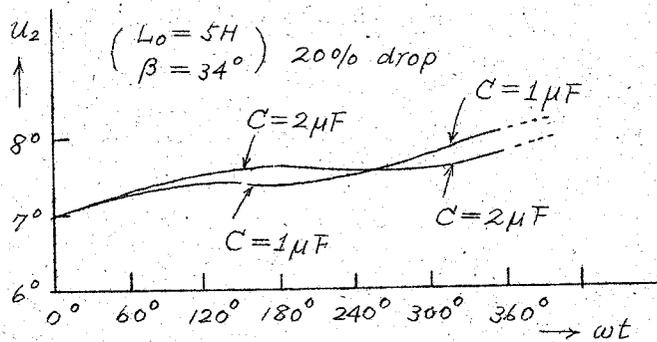
*4-10図、*4-11図、*4-12図は(i)、(ii)と同様、受電端交流電圧が三相对称に20%の電圧降下を発生した際における過渡現象に対し、送電線容量Cの影響について吟味したものである。これらはいずれも $L_0=5H$ 、 $2L'w=24\Omega$ 、 $\beta=34^\circ$ と設定し、 $C=1\mu F$ および $C=2\mu F$



※4-10 図



※4-11 図



※4-12 図

の2通りについて計算を行ったもので、※4-10 図はその際の直流電流 i_w の波形、※4-11 図は直流電圧 U_w の波形、※4-12 図は重複角変

化等々の過渡経過を示す。

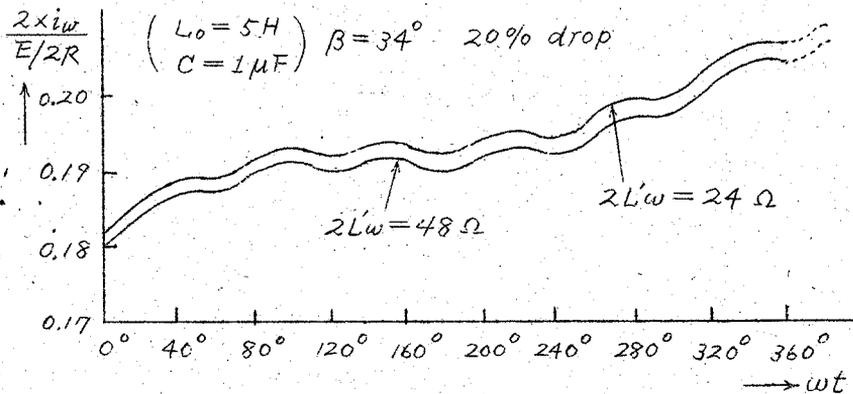
直流電流 i_w は定常時と同様オ6高調波を含むが、さらに共振周波数成分の振動が附加され、図のように L_0 の値が十分大きい場合には漸次上昇していく。図には割愛したが直流電流 i_g も全く同様の経過をたどり、 C の値に応じて共振周波数が異なるのみで、直流電流の上昇速度は殆ど C に無関係となる。

直流電圧波形はこの場合もほぼ $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$ を共振周波数とする振動電圧を発生し、その振巾は電圧降下率のみによって決定される。又、重複角 u_2 の変化模様は直流電流 i_w の波形から容易に推察されるように、 C の値が異れば多少途中経過が異なるが、長時間に亘る経過について考察すれば、殆ど同じ割合で増加して行く。

以上のように、容量 C の過渡現象に及ぼす影響は共振周波数が異なるのみで、直流電流の上昇速度、重複角の増加速度等々には殆ど無関係となる。

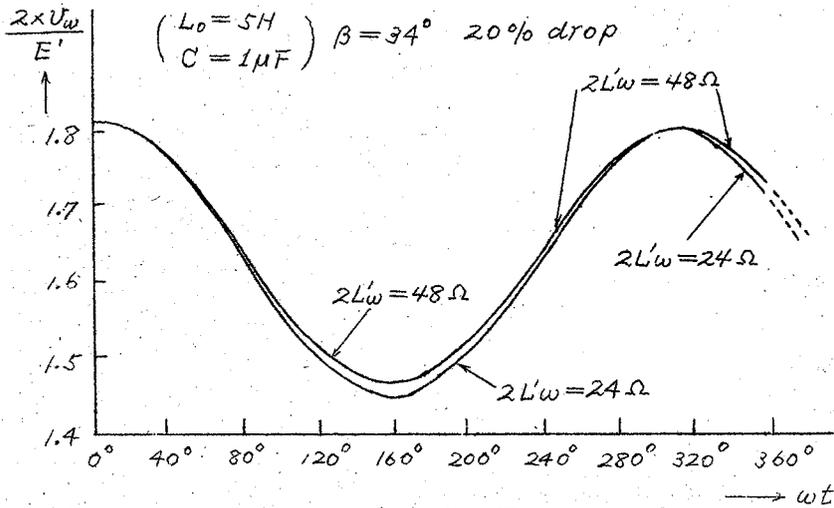
(iv) 転流インダクタンス L' の影響

オ4-13 図 およびオ4-14 図は上の諸例と同様、受電端交流電圧が三相对称に20% 降下した場合に対し、 L' の影響について吟味した結果で



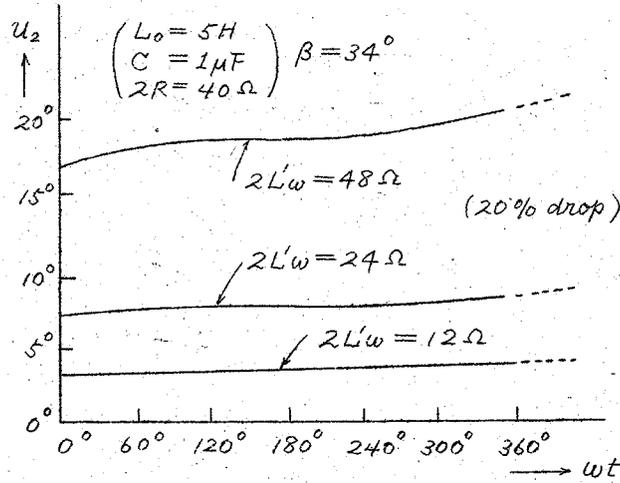
オ4-13 図

* (註) $i_R = \frac{i_g + i_w}{2}$ の上昇速度は C に殆ど無関係となる。



※4-14 図

ある。これらはいずれも $L_0 = 5H$, $C = 1\mu F$ として計算したものである

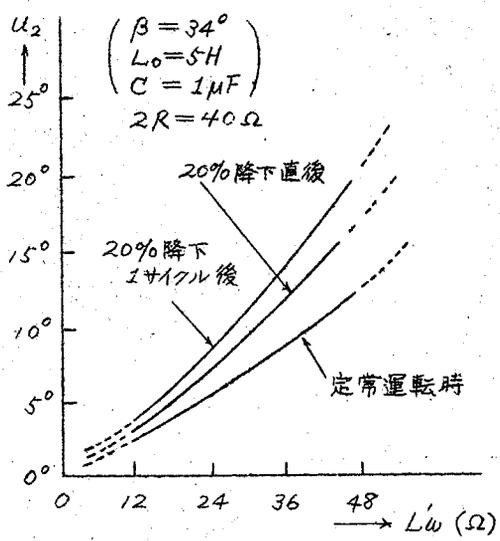


※4-15 図

が、図から明らかなように L_0 の値が十分大きい場合には、直流電流および直流電圧の過渡経過は L' に殆ど影響されない。尚、※4-13 図における電流初期値の不一致は (ii) の場合と同様、定常現象の計算結果をそのまま用いたためである。

※4-15図はこれらの場合における重複角の過渡経過を四示したもので、これから定常時、20%電圧降下直後、電圧降下後1サイクル経過時、等々における重複角と L' との関連性に注目して四示すれば※4-16図がえられる。

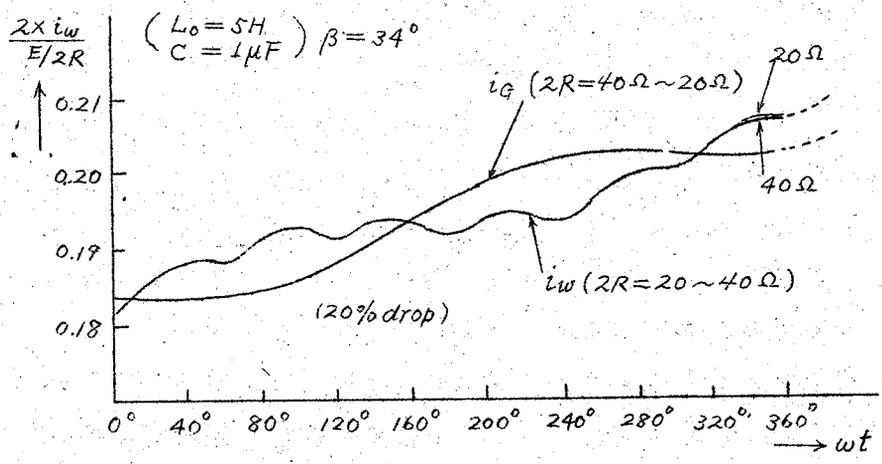
これらの図から明らかなように、一般に L' の値が大きいほど重複角増加の割合が大きくなる。以上のように L' の影響は※3章に述べたと同様、重複角には重要な効果をもつが、直流系統の電圧、電流には殆ど無関係となる。



※4-16図

(V) 送電線抵抗分 $2R$ の影響

※2章において転流失敗条件が $2R$ の値によりかなり大きな影響をうけたことは前述の通りであるが、ここではこれを電圧変動時における過渡経過について吟味した。ただしその際※2章で述べたように、受電端



※4-17図

側の動作条件を同一にし、送電端の直流電圧 E を $2R$ の値に応じて変化させることにした。すなわち $2R=40\Omega$ の場合には $E=110\text{kV}$ と設定し、又、 $2R=20\Omega$ の場合には $E=105\text{kV}$ と設定することにした。才4-17図は $2R$ の値を $40\Omega\sim 20\Omega$ の間に選定し、 $L_0=5H$ 、 $C=1\mu F$ 、 $2L'w=24\Omega$ 、 $R'_0=2\Omega$ として、受電端交流電圧がやはり三相對称に20% 降下した際の過渡経過を図示したものである。ただし図の縦軸の単位 $E/2R$ はいずれも $2R=40\Omega$ に対するものに統一した。すなわち $E/2R=2.75\times 10^3 A$ である。

図から明かなように過渡現象開始後±サイクル程度の期間においては、 $2R$ の影響は全然みられない。すなわち過渡状態の開始直後においては、もし受電端側の条件が同一ならば、送電線の抵抗分の影響は殆ど無視しても差支えない。これは過渡時における直流送電システムのインピーダンスが殆ど L_0 の値のみによつて支配され、 $2R$ はこれに比して通常非常に微小であるためと解される。

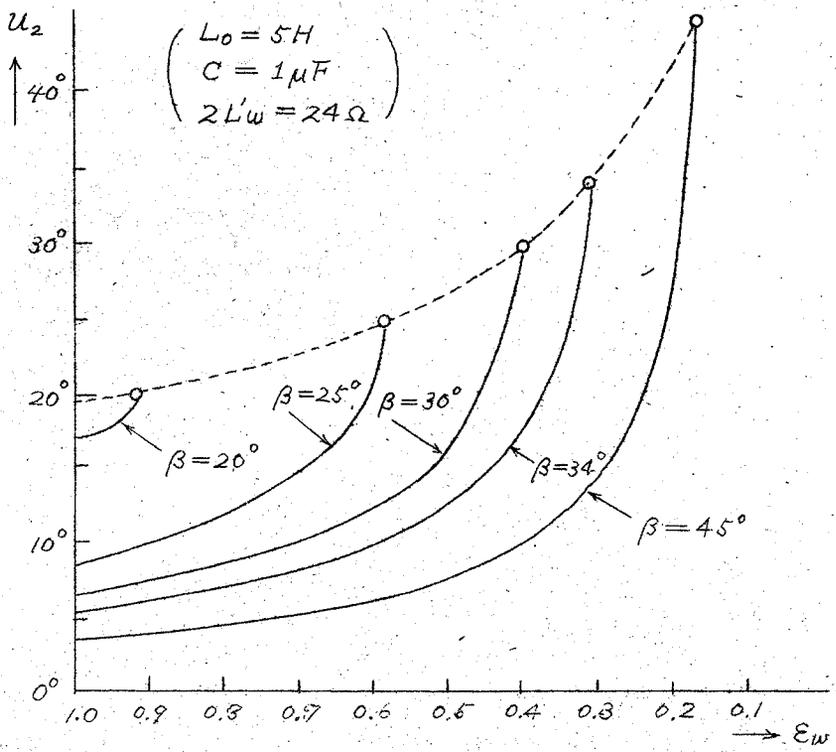
尚、この他 R_0 、 R' 等の影響も、 $2R$ と全く同様の効果をもつことはすでに才3章で指摘したところであるが、これらはいずれも $2R$ に比し、通常微小であるので、ここでは省略する。

(Vi) 電圧降下率の影響

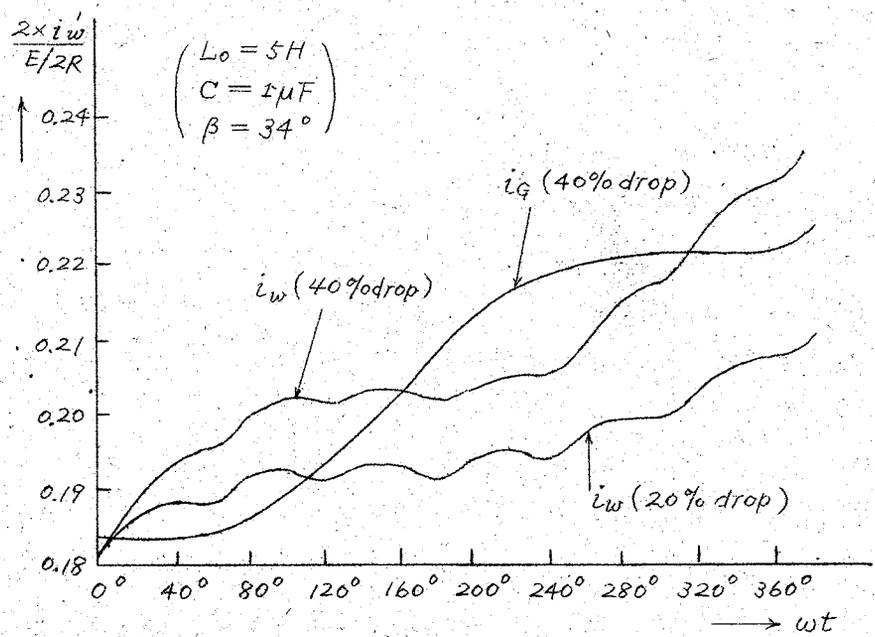
逆変換装置の重複角は受電端交流電圧の値によつて変化することは、すでに才2章で述べたとおりであるが、 L_0 の値が十分大きい場合には、電圧降下直後における電流の上昇率は微小であるので、電圧降下直後の逆変換装置重複角は殆どこの電圧降下率のみによつて決定される。

才4-18図は電圧変動係数 E_w と重複角との関係を与えるもので、これより、定常時における E_w の値が既知であれば任意の電圧降下率に対し、電圧降下発生直後における重複角の値が決定しうる。

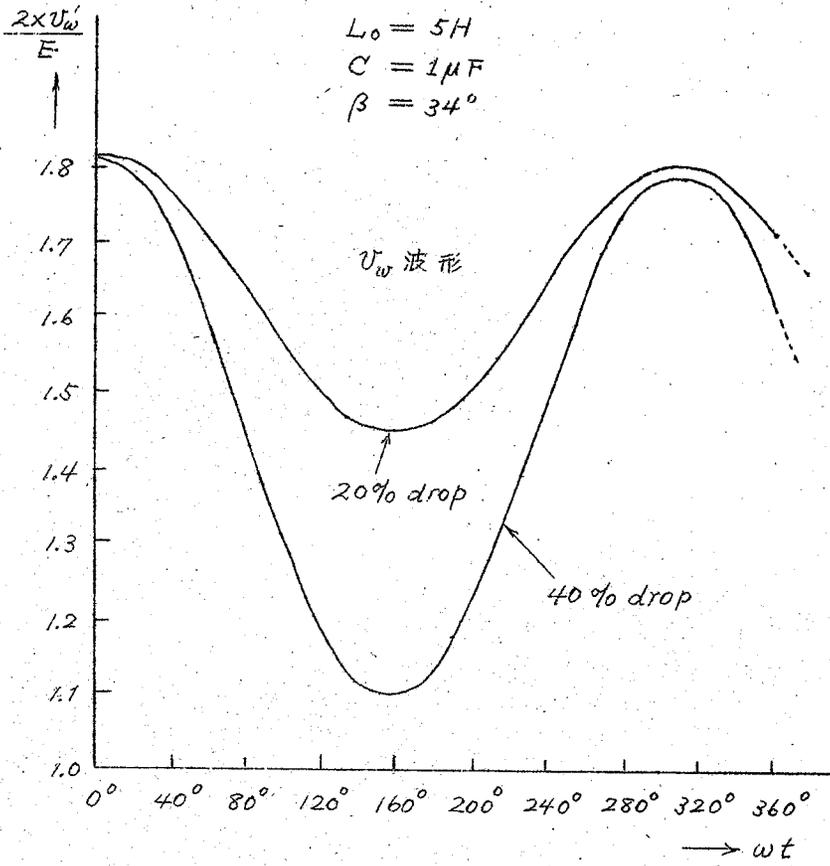
才4-19図および才4-20図はそれぞれ電圧降下率20% および40% の場合における直流電流ならびに直流電圧の過渡経過を図示したもので、いずれも $L_0=5H$ 、 $C=1\mu F$ 、 $2R=40\Omega$ とした場合の計算結果で



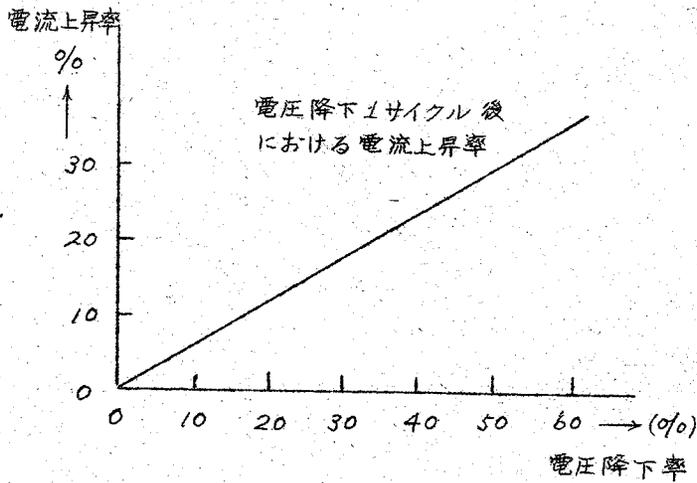
*4-18 图



*4-19 图



※4-20 図



※4-21 図

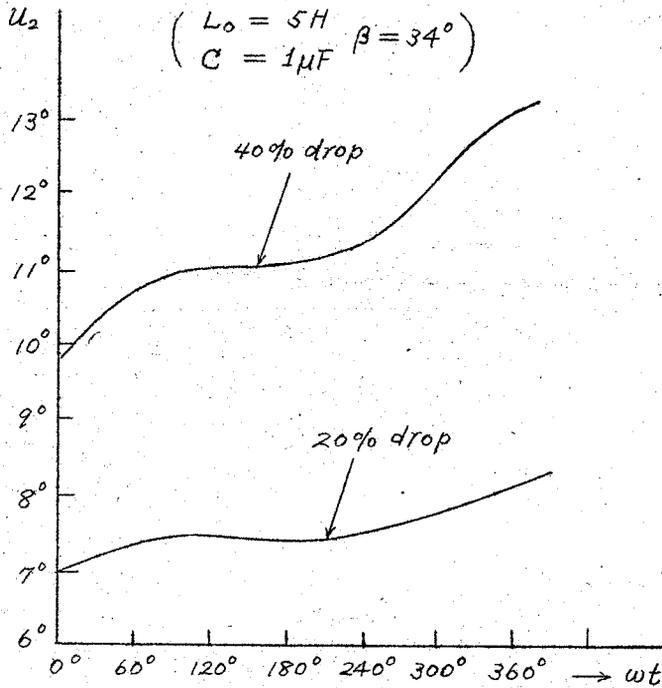


図 4-22

ある。

図から明らかなように、直流電流の上昇速度はほぼ電圧降下率に比例しており、又、直流電圧の振動成分の振巾も殆ど電圧降下率に比例する。

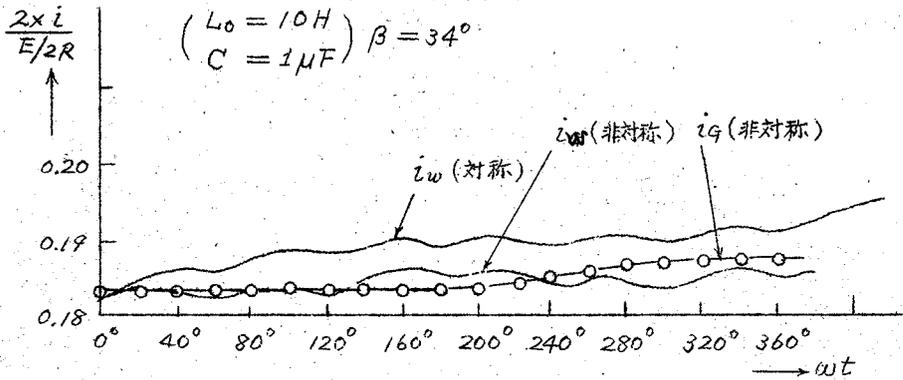
図示の電流のかわりに直流電流として $i_R = \frac{i_w + i_g}{2}$ * をとり、電圧降下発生後 1 サイクル経過した時点におけるこの電流値の上昇率と電圧降下率との関係を求めると図 4-21 図のようになる。

尚、図 4-22 図はこれらの場合における重複角増加の過渡経過を図示したもので、これより、重複角の増加率も電圧降下率が大きいほど大きくなることわかる。

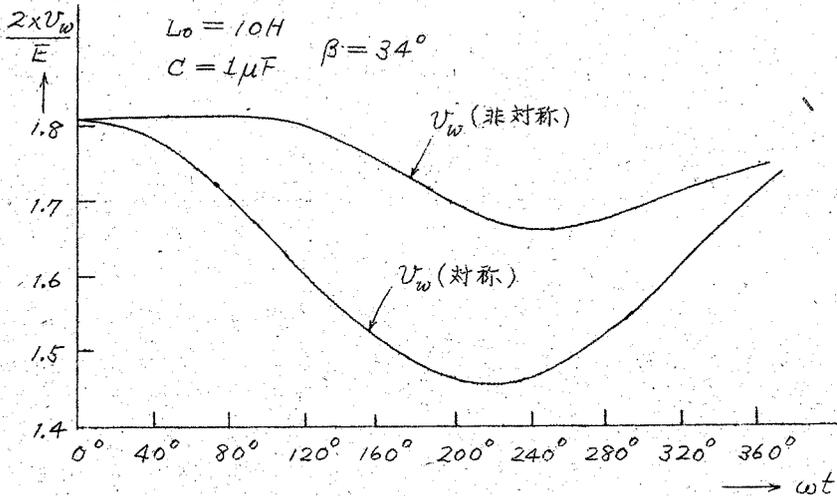
(vii) 非対称電圧降下の場合

以上 (i) ~ (vi) の諸例はいずれも受電端交流系統電圧が三相對称に電圧降下を発生した場合における過渡時の動作特性に対し、各動作条件の影

* (註) i_R は殆ど厳密に送電線抵抗分 $2R$ を流れる電流値に一致する。



オ4-23 図



オ4-24 図

響について吟味したものであるが、ここでは4.1.で述べた三相非対称な電圧降下の際の過渡現象について吟味する。

オ4-23 図およびオ4-24 図は $L_0 = 10H$, $C = 1\mu F$, $2R = 40 \Omega$, の場合の相のみ20%の電圧降下を発生した直後における直流電流および直流電圧の過渡経過の計算結果である。図には比較のために、同じ回路常数の下に、三相對称に20%の電圧降下を発生した場合のものも附記した。

図から明らかなように、この場合における直流電流の上昇率、および直流電圧の振動成分の振巾は共に三相對称降下の場合より小さくなつて

オ4-3表

$$L_0 = 10H, C = 1\mu F, \beta = 34^\circ$$

定常時 回路状態	非対称降下の場合			対称降下 余裕角
	等価制御角	重複角	余裕角	
2	30.33°	6.97°	23.36°	27.01°
4	37.67°	5.49°	32.18°	26.85°
6	34°	5.51°	28.49°	26.75°
8	30.33°	7.11°	23.22°	26.71°
10	37.67°	5.55°	32.12°	26.71°
12	34°	5.52°	28.48°	26.68°
14	30.33°	7.12°	23.21°	26.60°

いる。すなわち、一般に三相非対称な電圧降下が発生した場合における直流電流ならびに直流電圧の変化分は、三相中最大の電圧降下率に等しい降下率で三相對称に降下した場合の変化分より小さいといえる。

尚、この場合における重複角変化の過渡経過はオ4-3表のようになる。非対称電圧降下の場合には4.1.でものべたように、等価的な制御角 β_r' が回路状態によって変化し、対称降下の場合よりかえって小さくなる回路状態が発生し、したがって余裕角変動の過渡経過も、表から明らかのように、対称降下の場合よりも、かえって余裕角が小さくなる場合が出現する。それ故 L_0 の値が十分大きい場合には、たとえ電流上昇率が三相對称な電圧降下の場合より小さくとも、最大の電圧降下率を同一とした場合、三相非対称降下の方が、かえって転流失敗を発生しやすいといえる。

(VIII) 結論

以上、三相他励式インバータ回路すなわち逆変換装置を含む直流送電システムにおいて受電端交流電圧が降下した直後の過渡現象に対し、各動作条件の影響について吟味を行ったが、これより一般に次の結論がえられる。すなわち

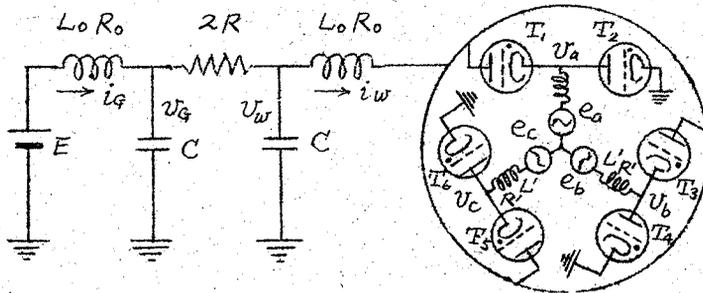
- 1) 電圧降下が発生した直後から、直流電圧はほぼその電圧降下率を振巾とし、 $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$ を共振周波数とする振動成分を発生するが、過渡時における直流電圧の波高値は、定常時における値以上にはならない。
- 2) 直流電流は定常時と同様才ら高調波成分を含むが、この他更に上記の電圧の場合と同様の共振周波数成分が附加されながら急激に上昇する。その際の上昇率はほとんど平滑用コイル L_0 の値のみによって決定され、 $L_0=5H$ 程度の場合には20%の電圧降下に対し、電圧降下発生後1サイクル経過した時点における電流上昇率は約12%程度となる。
- 3) 電圧降下発生直後における重複角の値は L_0 の値が十分大きい場合には、ほぼ電圧降下率のみによって決定される。
- 4) L' の値が小さいほど過渡時における重複角の変化が少なく、したがって L' の値は可及的に小さいほうが安全である。
- 5) 送電線抵抗 $2R$ やその他の抵抗分の影響は殆ど無視してもよく、又制御角 β の影響も直流電流および直流電圧の過渡経過に関する限り無視してもよい。
- 6) 三相對称な電圧降下よりも非對称な電圧降下の方がかえって過渡時における安全性が低くなる。等々である。

第5章 直流送電系統の起動時における過渡現象の解析

この章においては、直流送電系統の起動時における過渡現象の解析結果について述べるが、その際、直流送電系統としては、やはり第3、4章におけると同様、第5-1図の回路をとりあげ、又、起動開始以前には、送電線の各容量素子Cには初期電価が含まれないものと仮定する。

第5-1表

回路状態	点弧放電管	回路状態	点弧放電管
1	T_1, T_4	7	T_2, T_3
2	T_6, T_1, T_4	8	T_5, T_2, T_3
3	T_6, T_1	9	T_5, T_2
4	T_3, T_6, T_1	10	T_4, T_5, T_2
5	T_3, T_6	11	T_4, T_5
6	T_2, T_3, T_6	12	T_1, T_4, T_5



第5-1図

5-1. 起動方式について

直流送電系統の起動方式としては、まず次の2通りの場合が考えられる。すなわち

- (i) 順変換装置を最初に投入し、しかる後、適当な時点で逆変換装置

を投入する方式

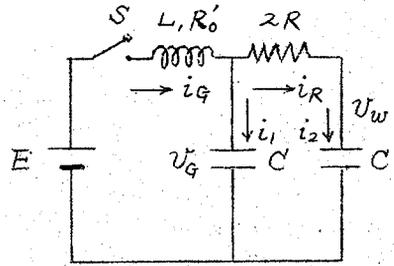
(ii) 逆変換装置を最初に投入し、しかる後、適当な時点で順変換装置を投入する方式

である。

まず (i) の方式について吟味を行うと、才 5-1 図の回路において順変換装置のみを投入するということは、

逆変換装置側が開放の状態、順変換装置を投入するのであるから、これは、

才 5-2 図の回路においてスイッチ S を投入することと全く等価となる。しかしこの場合、起電力 E は実際は順変換装置の出力直流電圧であり、更に順変換装置各放電管の癖作用を考慮すれば、



才 5-2 図

順変換装置の出力直流電圧であり、更に順変換装置各放電管の癖作用を考慮すれば、

順変換装置が投入可能であるためには、次の条件がみたされねばならぬ。

すなわち

$$E \doteq E_g \sqrt{6} E_{gph} \sin \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) > U_G \quad (5.1)$$

ここに α は順変換装置の初期投入時における制御角である。

ここで上述のように、送電線の各容量素子 C には初期電価が含まれていないと仮定すれば、上式の右辺は 0 となり、したがって順変換装置の初期投入可能条件は次式のようになる。すなわち

$$-\frac{\pi}{3} < \alpha < \frac{2}{3}\pi \quad (5.1)'$$

さて、順変換装置の初期制御角が上の条件をみたすとして、投入開始された後、ただちに逆変換装置も投入しなければならないが、この場合も上と全く同様の理由で逆変換装置が投入可能であるためには次の条件

がみたされねばならぬ。すなわち

$$U_w > E_w \sqrt{6} E_{wph} \sin \left(\frac{\pi}{3} - \beta \right) \quad (5.2)$$

ここに β は逆変換装置の初期投入時における制御角である。

上式より明らかなように、もし逆変換装置の投入を順変換装置の投入と全く同期させるためには、初期電価がない場合には $\beta > \frac{\pi}{3}$ と選定しなければならぬ。又、もし β を定常時における値に選ぶ場合には、後述するように、順変換装置投入後、ある一定の時間経過した後でないとい一般に才(5.2)式の条件がみたされない。

次に(ii)の方式について吟味すれば、これは本質的に(i)と全く同様で、まず逆変換装置を投入するには、才(5.2)式の条件が必要であり、もし容量素子Cに初期電価がない場合には、 $\beta > \frac{\pi}{3}$ と選定しなければならない。逆変換装置投入後、順変換装置を投入する場合にも、やはり才(5.1)式の条件が必要であり、この場合には一般に才(5.1)'式の条件とは異つたものとなる。

尚、以上の吟味は、各変換装置の初期制御角に対する条件のみに注目したが、実際問題としてはこの他種々の技術的な条件が附加され、たとえば才5-1図の回路において、逆変換装置を投入する場合について説明すると、投入開始以前においては、各変圧器の端子が大地に対して浮いているので、たとえば、放電管 T_1 と T_4 から点弧開始して逆変換装置を投入しようとする場合には、低圧側の放電管 T_4 の陽極端子をあらかじめ T_4 の放電開始電圧だけ大地電圧より高く設定しておき、 T_4 の点弧が開始されれば、ただちに、この設定電圧を大地から開放するようにしなければならず、又、この場合のみ T_1 と T_4 に同時に点弧パルスを印加しなければならない。

しかし、ここではこういう技術的な諸条件は、すべてあらかじめみたされているものとし、更に以下の解析においては簡単のため、上の起動方式の分類中、(i)の方式のみに注目して解析を進めることにする。

5.2 順変換装置のみを投入した直後における過渡現象の解析

(i) 回路方程式の導入

* (註) 才5頁才1-1図参照

この場合上述のように、図5-2の回路においてスイッチ S をとどる
ことと等価であり、したがって次の回路方程式がえられる。すなわち

$$\begin{pmatrix} Lp+R'_0 & Lp+R'_0 & 1 & 0 \\ 0 & 2R & -1 & 1 \\ -1 & 0 & Cp & 0 \\ 0 & -1 & 0 & Cp \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(p) \\ I_2(p) \\ V_G(p) \\ V_w(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} L & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1^{-0} \\ i_2^{-0} \\ v_G^{-0} \\ v_w^{-0} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

ただし、上式中 i_1 は送電端側の容量素子への充電電流であり、 i_2 は同
じく受電端側の容量素子への充電電流である。回路図から明かなように
この場合、 $i_G = i_1 + i_2$ 、 $i_R = i_2$ となる。又、上にも述べたように順変換
装置の投入以前には、送電線の各容量素子に初期電価がないものとすれ
ば、上式の右辺第2項は脱落する。

さて、上式の特性式は次のように3次式となる。すなわち

$$\begin{vmatrix} Lp+R'_0 & Lp+R'_0 & 1 & 0 \\ 0 & 2R & -1 & 1 \\ -1 & 0 & Cp & 0 \\ 0 & -1 & 0 & Cp \end{vmatrix} = 2RC^2L \left\{ p^3 + \left(\frac{R'_0}{L} + \frac{1}{RC} \right) p^2 + \left(\frac{1}{LC} + \frac{R'_0}{LCR} \right) p + \frac{1}{2RC^2L} \right\} = 0 \quad (5.4)$$

ここで $\frac{R'_0}{L} \equiv K$ 、 $\frac{1}{2RC} \equiv \beta$ 、 $\frac{1}{LC} \equiv \alpha^2$ と定義すれば、上式は次のようにな
る。すなわち

$$p^3 + (K+2\beta)p^2 + (\alpha^2+2\beta K)p + \alpha^2\beta = 0 \quad (5.4')$$

この3次式は一般に1つの実根と2つの共軛根を有し、それをそれぞれ
 P_1, P_2, P_3 として次のように定義する。すなわち

$$\left. \begin{aligned} P_1 &\equiv -(K+2\beta-2\gamma) \equiv -a \\ P_2 &\equiv -\gamma + j\delta \\ P_3 &\equiv -\gamma - j\delta \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

ここに δ はほぼ $\frac{1}{\sqrt{2LC}}$ で与えられ、又 γ は通常非常に微小であり、 a は
ほぼ 2β で与えられる。

さて、これらの値を用いて、式(5.3)の時間関数表示式を求めると
次の結果がえられる。すなわち

$$\begin{pmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ U_G(t) \\ U_W(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{E}{2R} [\varphi_1(t)] \\ \frac{E}{2R} [\varphi_2(t)] \\ E [\varphi_3(t)] \\ E [\varphi_4(t)] \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \chi_{11}(t) & \chi_{12}(t) & \frac{1}{2R}\chi_{13}(t) & \frac{1}{2R}\chi_{14}(t) \\ \chi_{21}(t) & \chi_{22}(t) & \frac{1}{2R}\chi_{23}(t) & \frac{1}{2R}\chi_{24}(t) \\ 2R\chi_{31}(t) & 2R\chi_{32}(t) & \chi_{33}(t) & \chi_{34}(t) \\ 2R\chi_{41}(t) & 2R\chi_{42}(t) & \chi_{43}(t) & \chi_{44}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1^{\circ} \\ i_2^{\circ} \\ U_G^{\circ} \\ U_W^{\circ} \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

ここに $\varphi_k(t)$, $\chi_{ik}(t)$ 等々はそれぞれ次のようになる。すなわち、

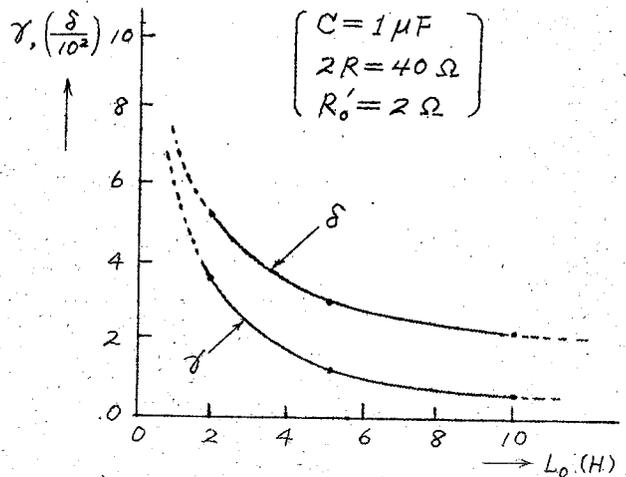
$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= A_{I1}(\bar{E}^{-at} - \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t) + B_{I1} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t \\ \varphi_2(t) &= A_{I2}(\bar{E}^{-at} - \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t) + B_{I2} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t \\ \varphi_3(t) &= 1 + A_G \cdot \bar{E}^{-at} + B_G \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t + C_G \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t \\ \varphi_4(t) &= 1 + A_W \cdot \bar{E}^{-at} + B_W \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t + C_W \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t \\ \chi_{11}(t) &= \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t + {}_1A_{11}(\bar{E}^{-at} - \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t) + {}_2A_{11} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t = \chi_{12}(t) \\ \chi_{21}(t) &= {}_1A_{21}(\bar{E}^{-at} - \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t) + {}_2A_{21} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t = \chi_{22}(t) \\ \chi_{31}(t) &= {}_1A_{31}(\bar{E}^{-at} - \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t) + {}_2A_{31} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t = \chi_{32}(t) \\ \chi_{41}(t) &= {}_1A_{41}(\bar{E}^{-at} - \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t) + {}_2A_{41} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t = \chi_{42}(t) \\ \chi_{13}(t) &= {}_1A_{13} \cdot \bar{E}^{-at} + {}_2A_{13} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t + {}_3A_{13} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t \\ \chi_{23}(t) &= {}_1A_{23} \cdot \bar{E}^{-at} + {}_2A_{23} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t + {}_3A_{23} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t \\ \chi_{33}(t) &= {}_1A_{33} \cdot \bar{E}^{-at} + {}_2A_{33} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \cos \delta t + {}_3A_{33} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t \\ \chi_{43}(t) &= \chi_{33}(t) - \chi_{23}(t) \\ \chi_{14}(t) &= \chi_{23}(t) \\ \chi_{24}(t) &= {}_1A_{24} \cdot \bar{E}^{-at} + {}_2A_{24} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \cdot \cos \delta t + {}_3A_{24} \cdot \bar{E}^{-\gamma t} \sin \delta t \\ \chi_{34}(t) &= \chi_{43}(t) \\ \chi_{44}(t) &= \chi_{43}(t) - \chi_{24}(t) \end{aligned} \quad (5.7)$$

ただし、 A_{I1} , B_{I1} , A_G , B_G , ${}_kA_{ij}$ 等々はすべて常数である。^{*}

上式から明かなように、この回路の過渡特性は γ および δ によって決定され、 γ の値が大きいほど振動の減衰率が大きくなり、 δ の値は振動周波数を与える。尚 α は上にものべたように通常、非常に大きな値とな

* (註) 附録参照のこと。

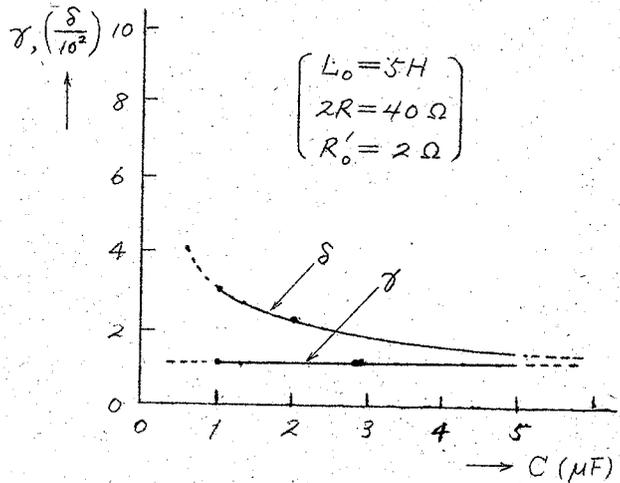
るので、 ε^{-at} の項は他の項に比し急激に減衰する。 γ および δ と L_0 および C の関連性を求めると、*5-3図および*5-4図の結果がえられる。これらの結果により、やはりこの場合も L_0 の値が小さいほど減衰率が大きくなることとがしられる。



*5-3 図

(ii) 数値計算例

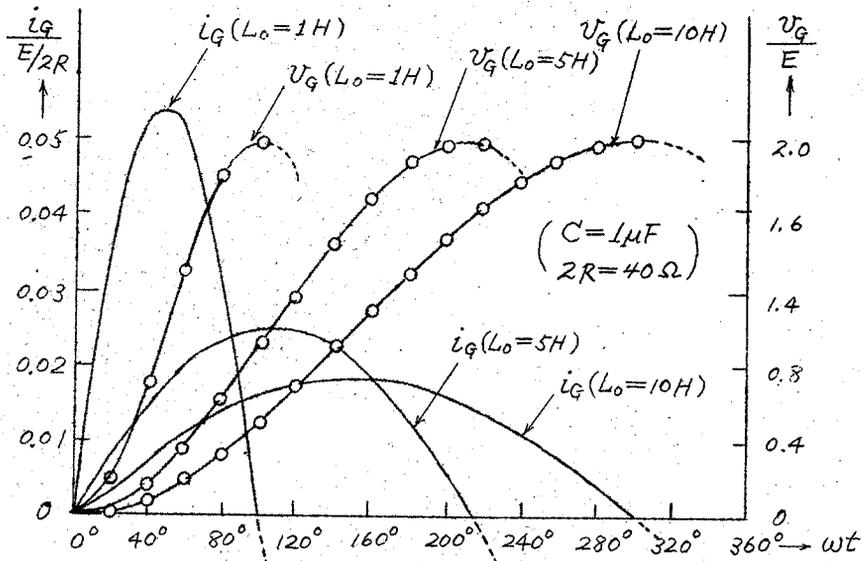
ここでは、順変換装置の投入以前には、送電線の各容量素子に初期電価が含まれない場合にのみ注目して数値計算を行った。その際、各回路常数は前章と同様 $2R=40\Omega$, $R_0'=2\Omega$, $2L\omega=24\Omega$ を基準とした。



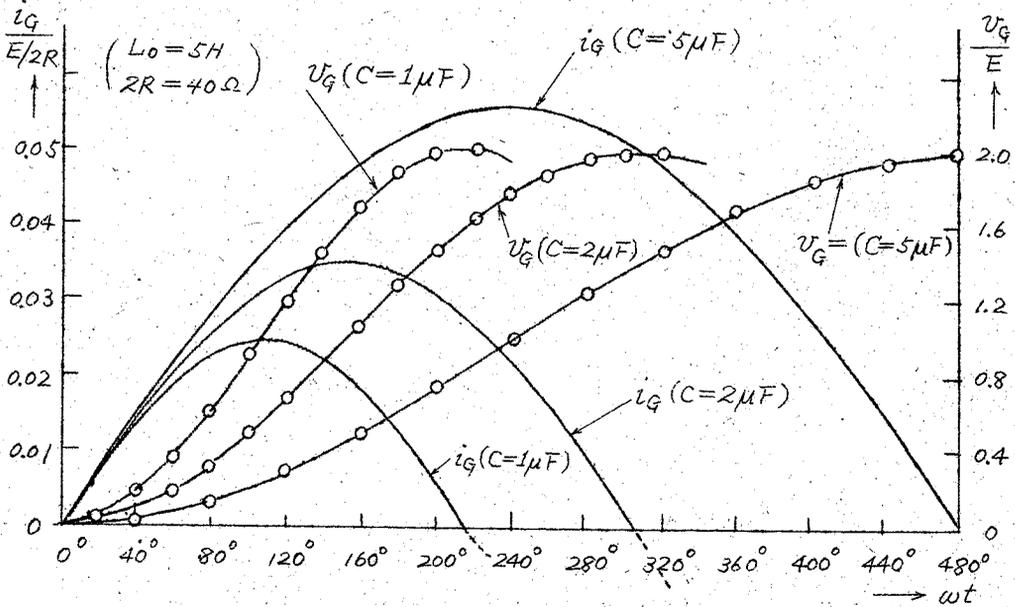
*5-4 図

*5-5図は $C=1\mu F$ とし、 $L_0=1H, 5H, 10H$ とした場合の計算結果であり、*5-6図は $L_0=5H$ とし $C=1\mu F, 2\mu F, 5\mu F$ とした場合の計算結果を示す。図には割愛したが、電圧 v_w の過渡経過も v_G のそれと殆ど一致し、又、 i_R の過渡経過も i_G のそれと同じ傾向を示すが、その振巾は i_G の振巾の約半分位となる。

これらの図から明かなように、電流 i_G および電圧 v_G とも、ほぼ $\frac{1}{2\pi\sqrt{2L_0C}}$ で与えられる共振周波数をもつ振動波形となり、電圧波形の振巾はいずれもほぼ電源電圧の値に等しく、したがって送電線には印加電



※ 5-5 図



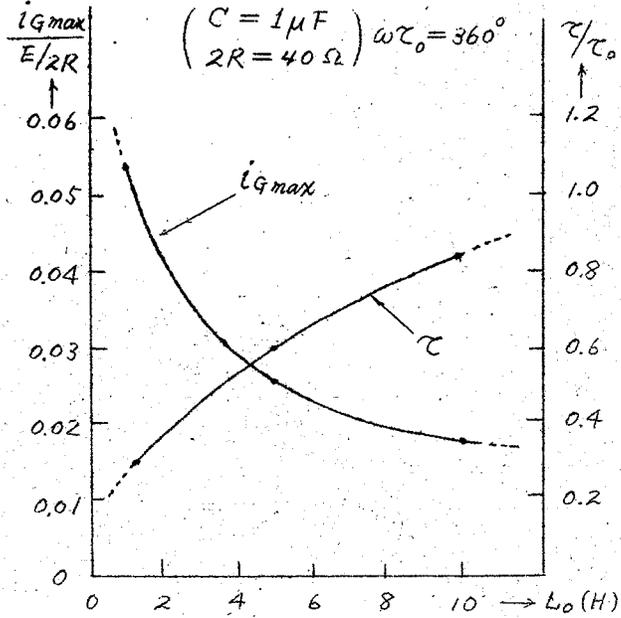
※ 5-6 図

源電圧の2倍の電圧波高値が発生することとなる。他方電流 i_G の振巾は L_0 の値が小さいほど、 C の値が大きいくほど大きくなるが、これらの電流の波高値と L_0 および C との関連性を求め、図示すれば※5-7図および※5-8図のようになる。図には順変換装置投入直後から電流 i_G が

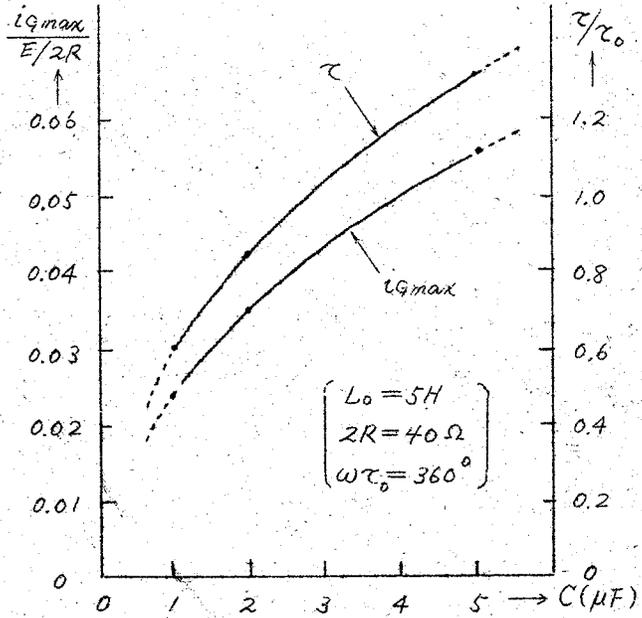
0となるまでの時間で
すなわち、振動周期の
 $\frac{1}{2}$ と L_0 および C の関
連性も併記されている。

さて、このては技術
的に重要な意味をもつ。
すなわち電流 i_G が 0
となるということは、
順変換装置の点弧放電
管の陽極電流が 0 とな
ることであり、放電管
の辨作用を考慮すれば、
この時点以後では順変

換装置がその機能を停
止してしまうことを意
味する。それ故、この
システムを起動させるた
めには、順変換装置投入
後、 τ 時間の期間内に
逆変換装置を投入しな
ければならない*。もし
この期間経過後に逆変
換装置を投入する場合
には、順変換装置を再
投入しないと起動不可
能となる。次にこの両



※5-7図



※5-8図

* (註) 実際には後述するよりに、 τ 時間の終末近くでは逆変換装置を投入し
てもやはり i_G が 0 となってしまう。

者の場合につき、それぞれ吟味を行ってみよう。

まず前者の場合、すなわち順変換装置投入後、 t 期間以内に投入する場合について考察すると、すでに 5.1. で述べたように、まず式 (5.2) の条件がみたされねばならぬ。さらに、逆変換装置投入後も、やはり電流 i_G が 0 となつてはならないので、逆変換装置を投入しても i_G が 0 にはならないような最終の時点が存在する。したがつてこの場合 (5.2) 式の条件と、この最終時点により決定される期間内で逆変換装置を投入しなければならない。

他方、後者の場合、すなわち順変換装置投入後、 t 期間以上経過した任意の時点で逆変換装置を投入する場合について考察すると、これは送電線の各容量素子に約 $2E$ の初期電圧を与えて逆変換装置のみを投入することであり、図 5-2 図の回路と同様、次の図 5-9 図の回路においてスイッチ S をとちることと等価となる。

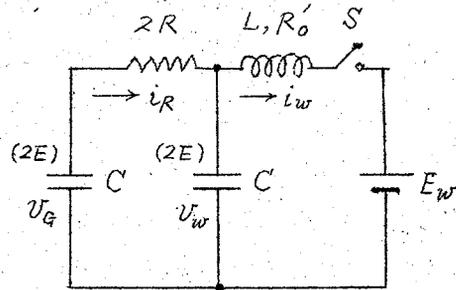


図 5-9

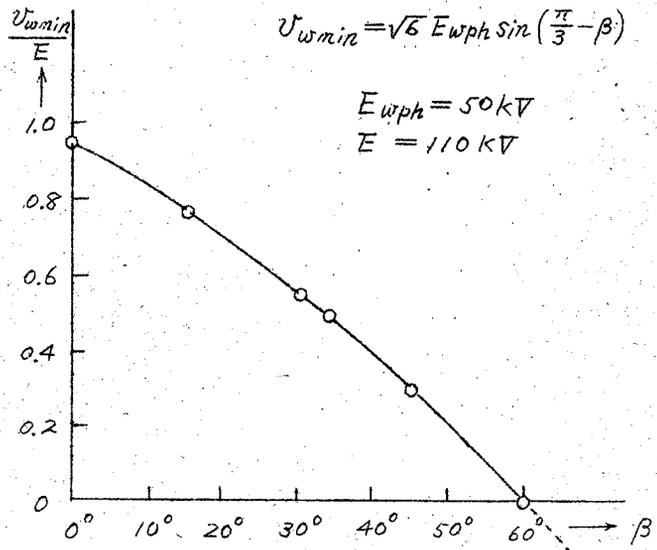
したがつて、上述の初期電圧なしに順変換装置のみを投入する場合と全く同様の状態が発生する。すなわち、逆変換装置投入後、やはり時間後に電流 i_w が 0 となつてしまうので、順変換装置は逆変換装置投入後、この時間以内の期間内で再投入しなければならず、これは上の前者の場合と全く同様である。それ故、以下においては前者の場合すなわち、順変換装置投入後 t 期間内に逆変換装置を投入する場合のみに注目し、解析を行うことにする。

5.3 順変換装置投入後 t 期間内の時点で逆変換装置を投入した場合の過渡現象の解析

* (註) 第 8 章 参照

(i) 逆変換装置の
投入可能条件

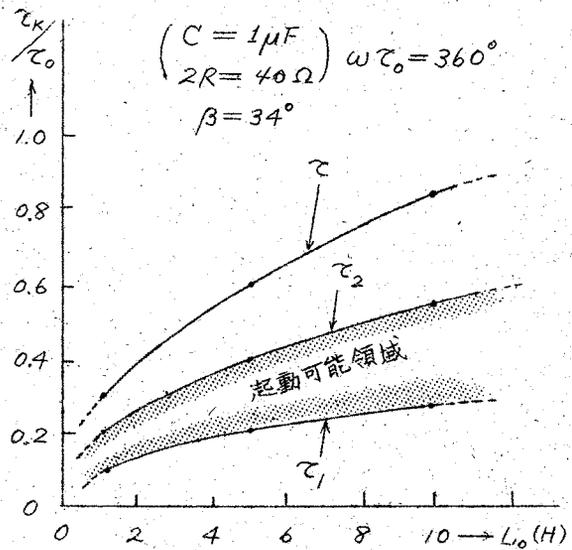
この場合、逆変換装置を投入するには、上述のように、まず式(5.2)の条件がみたされねばならないが、これを $E = 110 \text{ kV}$, $E_w E_{wph} = 50 \text{ kV}$ として、逆変換装置の制御角 β と式(5.2)の条件をみたすべき最小の



※5-10 図

U_w の値との関係を求め、図示すれば※5-10図がえられる。これより、 $\beta = 34^\circ$ に対しては $\frac{U_w}{E}$ の値が約 0.49 以上の値に達しないと逆変換装置は投入不可能であることがわかる。

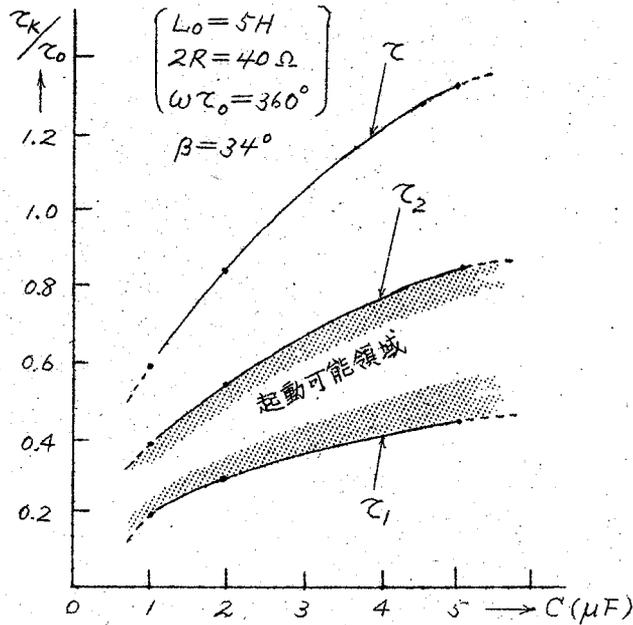
したがって、逆変換装置を投入するには、順変換装置投入後、ある一定の時間 τ_1 を経過した後でないとは不可能であり、この τ_1 は式(5.2)の条件によって与えられるのである。 $\beta = 34^\circ$ として、各



※5-11 図

回路常数の値に対して、 τ_1 の値を求めて図示すれば※5-11図および※5-12図がえられる。図から明かなように τ_1 は上述の τ_0 のほぼ $\frac{1}{3}$ となっている。

さて、逆変換装置の投入に際し、上記の条件がみたされて、投入開始



※5-12図

されたとすれば、その直後における直流送電システムの回路は定常時と同様、
 ※5-1図の回路となり、回路方程式は※4章におけると全く同様にして
 次式のようになる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & Cp+\frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(p) \\ V_1(p) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E-E_w(p) \\ 0 \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1^{-0} \\ v_1^{-0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & Cp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2(p) \\ V_2(p) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E+E_w(p) \\ 0 \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_2^{-0} \\ v_2^{-0} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

ここに $i_1, i_2, v_1, v_2, E_w(p)$, 等々は※3章、※4章と全く同様に、次
 のように定義される。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} i_1 &\equiv i_G + i_w, \quad v_1 \equiv v_G - v_w, \quad i_2 \equiv i_G - i_w, \quad v_2 \equiv v_G + v_w \\ E_w(p) &\equiv \int_0^{-1} \epsilon_w \sqrt{6} E_{wph} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \beta + \omega t\right) \end{aligned} \right\} \quad (5.8)'$$

この(5.8)式で与えられる回路状態が $\frac{\pi}{3}$ の期間継続し、その後は定
 常運転時と全く同様の点弧順序で各回路状態が進行し、漸次定常状態に
 収斂する。

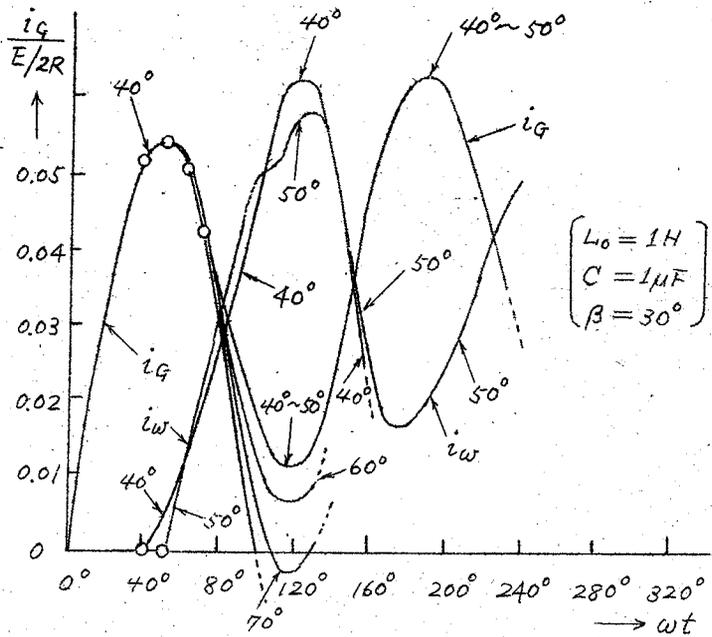
(ii) 数値計算例

※5-13図および
 ※5-14図は $L_0=1H$,
 $C=1\mu F$, $2R=40\Omega$
 とした場合に対し、
 逆変換装置投入後
 における過渡現象
 の計算結果を図示
 したものである。
 図中に 40° , 50° ,
 60° 等々と記し
 た曲線はそれぞれ、
 順変換装置投入後、

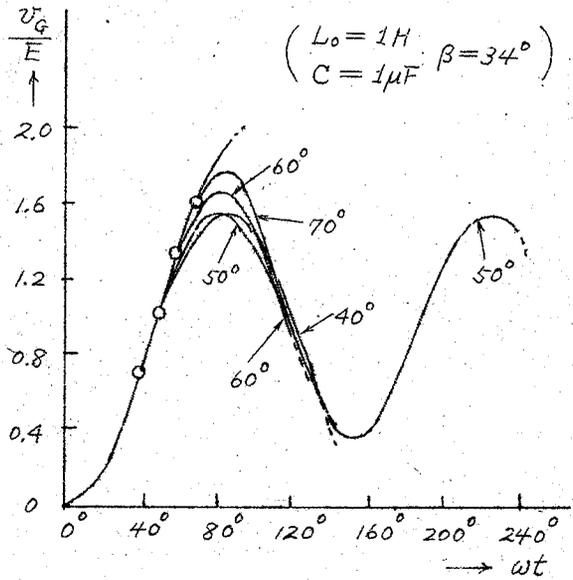
40° , 50° , 60° 経過した時点
 で逆変換装置を投入した場
 合の過渡経過を与えるもの
 である。図から明かなよう
 に順変換装置投入後、 70°
 の時点で逆変換装置を投入
 した場合には、電流 i_G が
 負の値になる期間が現れ、
 この場合にはやはり順変換
 装置がその機能をこの期間
 以後停止してしまふので系
 統の起動は不可能となる。

したがって逆変換装置を投

入して、系統を起動可能ならしめるためには、順変換装置投入後、ある
 一定の期間 t_2 以内に逆変換装置を投入しなければならない。上の計算
 例では t_2 は約 68° となり、この t_2 と上述の t_1 で囲まれた領域が系



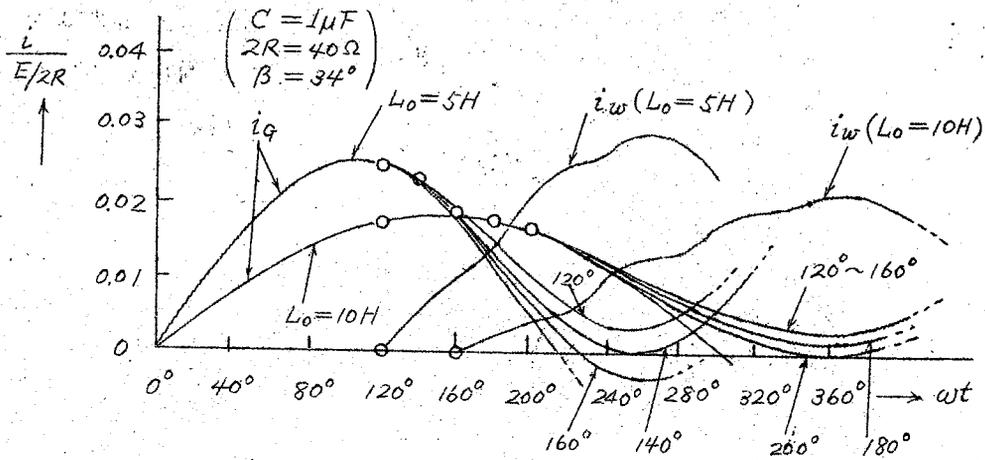
※5-13 図



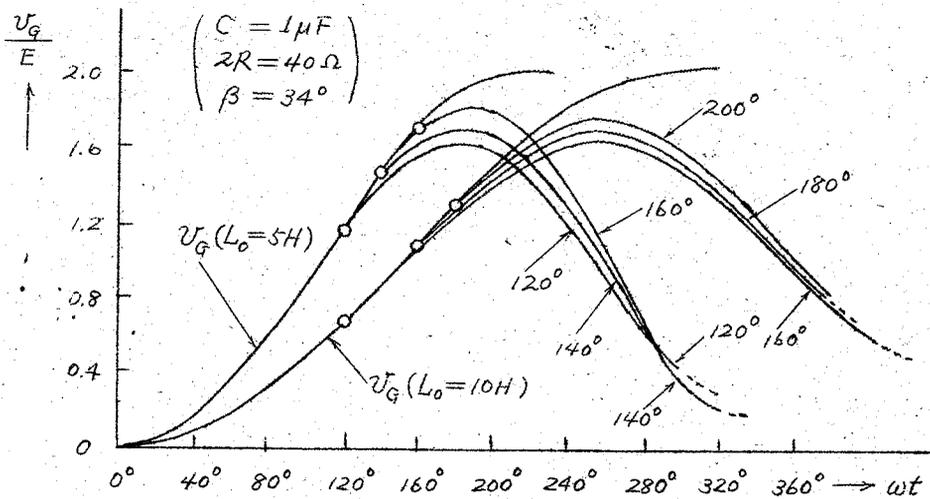
※5-14 図

統を起動可能ならしめる逆変換装置の投入期間であり、これが前記のオ
5-11図およびオ5-12図に示されている。

又、電流 i_G の最初の極大点^{*}、すなわち図の横座標が 50° となる時点
以前の時点で逆変換装置を投入しても電流 i_G および電圧 V_G の過渡経
過には殆ど差異が現れない。尚、電圧 V_G の波高値も逆変換装置の投入
時点が早くなるほど低くなるが、 50° 以前の時点ではやはり殆ど差異が



オ5-15図



オ5-16図

* (註) これは順変換装置投入後 $\pi/2$ の時点に相当する

なくなる。したがって、逆変換装置を投入すべき最適の時点は順変換装置投入後、 τ_1 と $\tau_2/2$ で囲まれた期間で与えられるといえよう。

自明のことであるが、逆変換装置投入後における回路の振動周波数は

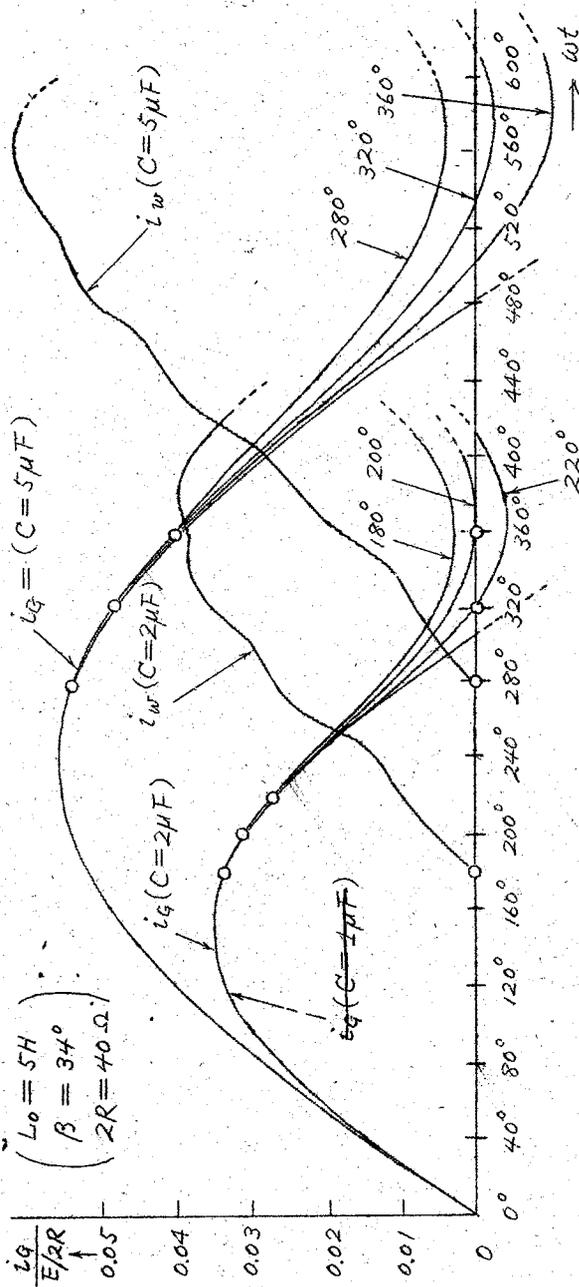
$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ となり、順変換装置のみを投入した場合のその $\sqrt{2}$ 倍となる。

※5-15図および※5-16図は同じく $C=1\mu F$, $2R=40\Omega$, $\beta=34^\circ$ とした場合に対し、 $L_0=5H$, $10H$ の2通りについて逆変換装置投入後の過渡現象の計算結果を图示したものである。

これらの場合においても、一般的傾向は上述の場合と全く同様であり、逆変換装置投入の最適時点はやはり $\tau_1 \sim \tau_2/2$ の期間で与えられる。

尚、 $L_0=5H$ に対しては $\tau_2 \doteq 142^\circ$ であり、 $L_0=10H$ に対しては $\tau_2 \doteq 198^\circ$ となる。したがって一般に逆変換装置の投入可能領域は L_0 の値が大きいほど大きくなる。

※5-17図および※5-18図は同じく $L_0=5H$,



※5-17図

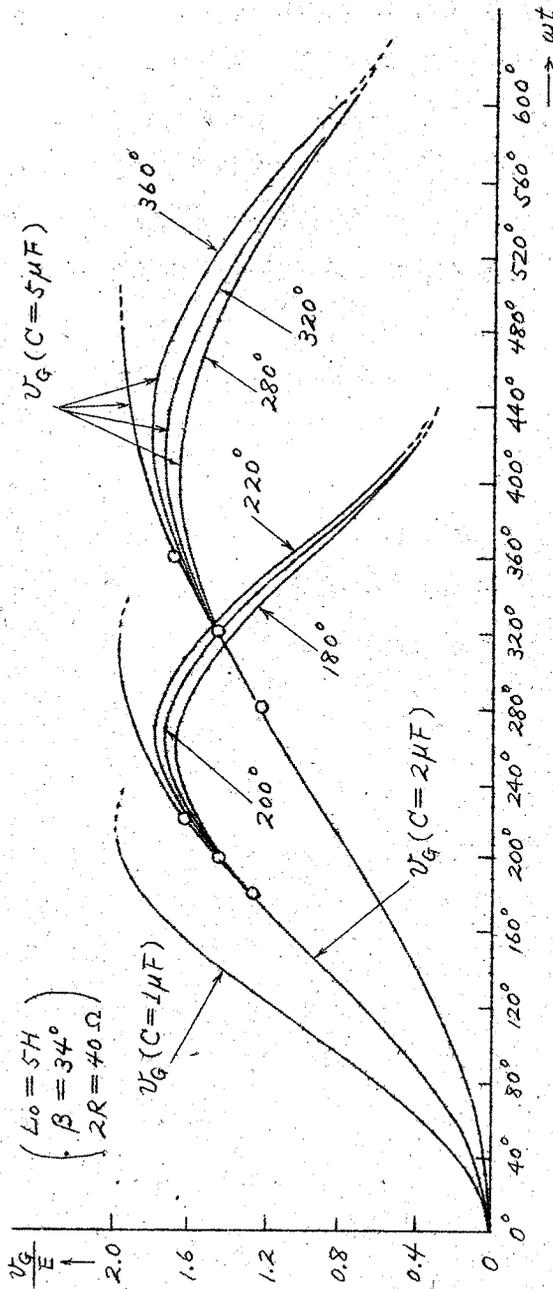


図 18-5-1

$2R=40\Omega$, $\beta=34^\circ$ とした場合に対し, $C=2\mu F, 5\mu F$ の 2通りの場合について計算した結果である。この場合, $C=2\mu F$ に対しては $\tau_2 \doteq 197^\circ$, $C=5\mu F$ に対しては $\tau_2 \doteq 304^\circ$ となっている。以上より一般に τ_2 はほぼ $2\pi/3$ となることがしられ, したがって系統の起動を可能ならしめる逆変換装置の投入期間は $\beta \doteq 34^\circ$ の場合, ほぼ $\tau_2 - \tau_1 \doteq \tau/3$ で与えられる。

(iii) 結論

以上, 直流送電系統の起動時における過渡現象について 2, 3の解析を試みたが, これを要約すると次の結論がえられる。

(i) まず, 順変換装置のみを投入した場合には, 直流送電線に発生する電圧および電流はともに

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$$

で与えられる共振周波数をもつ振動となるが, 順変換装置の弁作用により投入後 $\frac{1}{2}$ 周期以後の時点では変化しない。この際, 電圧の波高値は印加直流電源電圧のほぼ倍電圧に達し, 電流の波高値は L_0 の値が小さいほど, 又 C の値が大きいほど大きくなる。

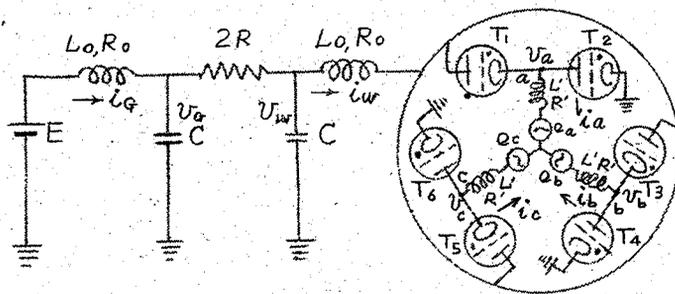
- (ii) 逆変換装置を投入してこの系統を起動可能ならしめるためには、順変換装置投入後、ある一定の期間内で逆変換装置を投入しなければならず、この期間は回路常数ならびに動作条件によって決定され、 $\beta=34^\circ$ に対しほぼ $\frac{1}{3}\pi\sqrt{2L_0C}$ で与えられる。この場合逆変換装置を投入する際の最適時点は順変換装置投入後ほぼ $\frac{1}{3}\pi\sqrt{2L_0C} \sim \frac{\pi}{2}\sqrt{2L_0C}$ の期間で与えられる。したがって起動可能な逆変換装置投入期間は L_0 および C の値が大きいかほど長くなる。
- (iii) 起動可能な投入期間以後の時点で逆変換装置を投入した場合には、直ちに順変換装置を再投入しなければならないが、この場合における順変換装置の投入期間も (ii) の場合に準ずる。
- (iv) 上の計算例においては、起動開始直後における各電流値は、定常状態における値よりも微小であるので、一般に逆変換装置の重複角は微小であり、その影響は殆ど無視して差つかえない。

第6章 直流送電系統の逆変換装置 放電管故障時における過渡現象 の解析

この章では直流送電系統としてやはり前述の定常現象の場合と同様、
オ6-1図の回路をとりあげ、この回路が、定常運転状態にある場合に、
逆変換装置の放電管が急に故障を発生した場合の過渡現象の解析結果に
ついて述べる。

オ6-1表

回路状態	点弧放電管	回路状態	点弧放電管
1	T ₁ T ₄	7	T ₂ T ₃
2	T ₆ T ₁ T ₄	8	T ₅ T ₂ T ₃
3	T ₆ T ₁	9	T ₅ T ₂
4	T ₃ T ₆ T ₁	10	T ₄ T ₅ T ₂
5	T ₃ T ₆	11	T ₄ T ₅
6	T ₂ T ₃ T ₆	12	T ₁ T ₄ T ₅



オ6-1図

6.1 放電管の故障について

まず放電管の故障としては、通常次の場合が考えられる。すなわち、

(1) 放電管が消弧直後に陽陰極間に印加される逆電圧によって逆弧事故を発生する場合。

(2) 放電管がその点弧子に点弧パルスが印加される時点において点弧しない場合、すなわち失弧事故を発生する場合。

(3) 消弧期間中の放電管の点弧子に異常パルスが印加されたり、あるいはその他の原因で放電管が異常点弧し、いきなり通弧事故を発生する場合。

(4) 受電端交流電圧の降下、その他の原因により、重複角が過大になって転流失敗事故を発生する場合。

等々である。

これらの中(4)についてはすでに第2章および第4章で述べたので、こゝではふれないことにする。たゞこれらの(1)~(4)の事故は(3)は自明であるが、いずれもその直後に放電管を通して直流側が短絡され、通弧事故を発生する。それ故、こゝではまず(3)の場合について解析を行い、しかる後(1)、(2)の場合について吟味し、(3)の場合と比較検討することにする。

6.2 通弧事故時における過渡現象の解析

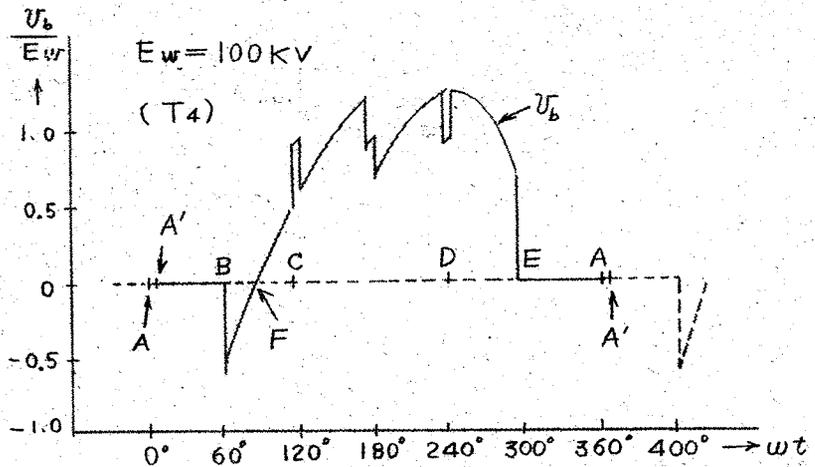


図 6-2

いま、 α 6-1 図の回路が定常運転状態にある場合について考えると、逆変換装置の各放電管に印加される陽極-陰極間の電圧は α 6-2 図のようになる。ただし図は定常 α 12 番目回路状態の始端を時間の原点にえらび、放電管 T_4 についての陽極-陰極間電圧を求めたものであるが、他の放電管についても位相の差こそあれ、全く同様の曲線がえられる。

図中 \overline{AB} および \overline{EA} の期間はそれぞれ放電管 T_4 が点弧している期間を示し、 \overline{CD} の期間は放電管 T_3 が点弧している期間を示す。定常運転中の逆変換装置において、通弧事故を惹き起す放電管は確率的に全く任意であるから、ここでは簡単のため、放電管 T_3 の点弧子に異常パルスが印加されて、通弧事故を発生するものとする。この場合 α 6-2 図から明かなように、放電管 T_3 が異常点弧して直ちに通弧事故を発生しうる期間は放電管 T_4 が点弧している期間中であり、これは上述のように \overline{EA} および \overline{AB} の期間となる。これらの期間を α 6-1 表の回路状態により表現すれば、 α 10 番目回路状態から α 14 番目 (α 2 番目) 回路状態までの期間に相当し、約 $\frac{1}{2}$ サイクルの期間となる。それ故通弧事故発生時点として、定常 α 10 番目回路状態の始端附近で放電管 T_3 が異常点弧する場合は、以後における過渡現象に対し、最も苛酷な条件となると考えられるので、以下においては、まず定常 α 10 番目回路状態の始端~~附近~~で放電管 T_3 が異常点弧する場合につき解析を試みる。

(1) 定常 α 10 番目回路状態の始端~~附近~~で放電管 T_3 が異常点弧した場

合における過渡現象の解析

定常 α 10 番目回路状態における点弧放電管は T_2, T_4, T_5 であり、ここで更に放電管 T_3 が点弧するのであるから、この場合の点弧放電管は4個となり、直流側は T_3, T_4 を通じて短絡される。したがって直流送電系統の回路方程式は次式のようになる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} L_0 P + R_0 & 1 \\ -1 & CP + \frac{1}{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(P) \\ V_1(P) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E \\ 0 \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} L_0 & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1^{-0} \\ v_1^{-0} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} L_0 P + R_0 & 1 \\ -1 & CP \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_2(P) \\ V_2(P) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E \\ 0 \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} L_0 & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_2^{-0} \\ v_2^{-0} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

これも定常時における回路方程式と比較すれば、右辺第1項中の $E_w(P)$ が脱落しており、又左辺の L および R_0' がそれぞれ L_0 および R_0 となっている。*

次に受電端側の交流系統に対しては、一般に次の回路方程式が成り立つ。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} V_r &= \left(L' \frac{d}{dt} + R' \right) i_r + e_r + V_0 \\ r &= a, b, c \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

ここに V_a, V_b, V_c は第6-1図に示すように各節点 a, b, c における対地電圧を表わし、又 i_a, i_b, i_c は中性点に流れこむ各相の電流、 V_0 は中性点の対地電圧、 e_a, e_b, e_c は各相の相電圧とする。この場合上式中の V_r, i_r, e_r 等々には次の条件が附加される。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \sum i_r &= 0, \quad \sum e_r = 0, \quad V_a = V_b = V_c = 0, \\ i_a^{-0} &= -i_w^{-0}, \quad i_c^{-0} = i_w^{-0}, \quad i_b^{-0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

この(6.3)式の条件を(6.2)式に代入し、 i_a, i_b, i_c について解くと次の結果がえられる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} I_a(P) &= -\frac{E_a(P)}{L'P + R'} - \frac{L'P}{L'P + R'} (i_w^{-0}) \\ I_b(P) &= -\frac{E_b(P)}{L'P + R'} \\ I_c(P) &= -\frac{E_c(P)}{L'P + R'} + \frac{L'P}{L'P + R'} (i_w^{-0}) \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

この(6.4)式を各相電圧の位相条件を考慮して時間関数に変換すれば次の結果がえられる。すなわち、

* (註) 勿論 L を L_0 とおくのは、受電端側については正しいが、送電端側は L とすべきである。しかし一般に $L_0 \gg L'$ であり、計算を簡単にするためにこのように置いた。 R_0' についても全く同様である。

$$\begin{aligned}
 i_a(t) &= -(i_w^{-0})e^{-bt} + \frac{\varepsilon_w \sqrt{2} E_{wph}}{L' \omega} \cdot \cos \theta_0 \left\{ \sin \left(\frac{2\pi}{3} + \beta - \theta_0 - \omega t \right) \right. \\
 &\quad \left. - \sin \left(\frac{2\pi}{3} + \beta - \theta_0 \right) \cdot e^{-bt} \right\} \\
 i_b(t) &= -\frac{\varepsilon_w \sqrt{2} E_{wph}}{L' \omega} \cdot \cos \theta_0 \left\{ \sin \left(\frac{\pi}{3} + \beta - \theta_0 - \omega t \right) - \right. \\
 &\quad \left. \sin \left(\frac{\pi}{3} + \beta - \theta_0 \right) \cdot e^{-bt} \right\} \\
 i_c(t) &= (i_w^{-0})e^{-bt} + \frac{\varepsilon_w \sqrt{2} E_{wph}}{L' \omega} \cdot \cos \theta_0 \left\{ \sin \left(\beta - \theta_0 - \omega t \right) \right. \\
 &\quad \left. - \sin \left(\beta - \theta_0 \right) \cdot e^{-bt} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\text{ただし } b \equiv R'/L', \quad \theta_0 \equiv \tan^{-1} \frac{b}{\omega}$$

----- (6.5)

これらの結果から明かなように、 $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 、 $i_c(t)$ はそれぞれともに急速に0となり、交流回路には全然電流が流れ込まなくなる。 $\beta = 34^\circ$ 、 $L'\omega = 12 \Omega$ 、 $R' = 0.7 \Omega$ 、 $\varepsilon_w E_{wph} \doteq 50 \text{KV}$ とした場合における数値計算結果によれば、通弧事故発生後約 2.8° 経過してまず $i_a(t)$ が0となる。したがってこの時点で放電管 T_2 が最初に消弧し、しかる後約 0.3° 経過して $i_b(t)$ および $i_c(t)$ がともに0となり、放電管 T_5 が消弧して、点弧放電管は T_3 および T_4 のみとなる。

尚 T_2 が消弧した直後においては、交流回路^{*}の回路方程式は次式のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned}
 i_c(P) &= \frac{L'P}{L'P+R'} (i_c^{-0}) + \frac{E_b(P) - E_c(P)}{2(L'P+R')} \\
 i_a(t) &= \cancel{0}, \quad i_b(t) = -i_c(t)
 \end{aligned} \right\} \quad (6.6)$$

これを時間関数に変換した結果は次式で与えられ、この $i_c(t)$ が約 0.3° 経過して0となるのである。

* (註) 以後簡単のために交流系統電流に対する回路を交流回路、直流電流に対する回路を直流回路とよぶことにする。

$$i_c(t) = (i_c^{-0}) e^{-bt} + \frac{E_w \sqrt{6} E_{wpk}}{2 L' \omega} \cdot \cos \theta_0 \left\{ \sin \left(\frac{\pi}{6} + \beta - \theta_0 - \omega t \right) - \sin \left(\frac{\pi}{6} + \beta - \theta_0 - \omega \right) \cdot e^{-bt} \right\} \quad (6.6)$$

ただし右辺 { } 内の ω は通弧事故発生後 T_2 が消弧するまでの期間を表す。

以上より一般に通弧事故が発生した場合には、その直後から点弧放電管は通弧放電管のみとなり、他の放電管はすべて直ちに消弧してしまうことがわかる。

さて、通弧事故発生後においても、各放電管に印加される点弧パルス

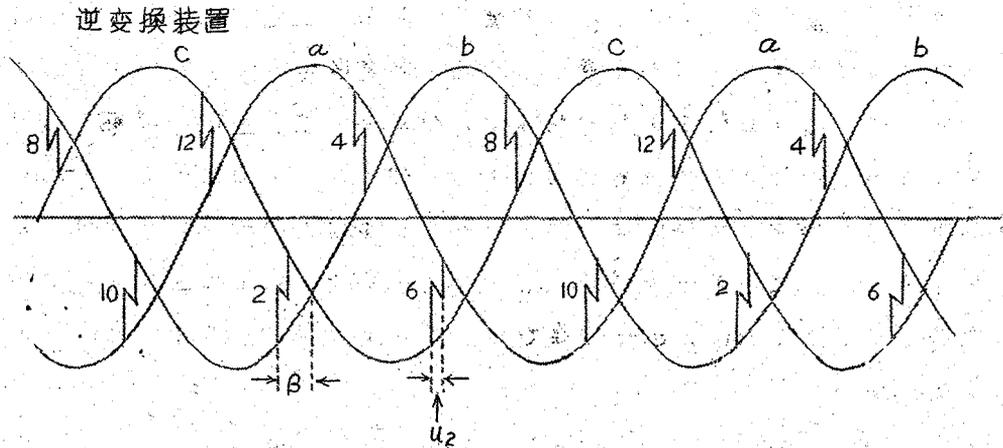
表 6-2

定 常 時		通 弧 時
回路状態	点弧放電管	点弧放電管
10	T_2, T_5, T_4	T_2, T_5, T_4, T_3
11	T_5, T_4	T_3, T_4
12	T_5, T_4, T_1	T_3, T_4
1	T_4, T_1	T_3, T_4
2	T_4, T_1, T_6	T_3, T_4, T_6
3	T_1, T_6	T_3, T_6
4	T_1, T_6, T_3	T_3, T_6
5	T_6, T_3	T_3, T_6
6	T_6, T_3, T_2	T_3, T_6, T_2
7	T_3, T_2	T_3, T_2
8	T_3, T_2, T_5	T_3, T_2, T_5
9	T_2, T_5	T_2, T_5
10	T_2, T_5, T_4	T_2, T_5, T_4

は定常状態における全く同じ経過をたどるものとするれば、通弧事故発生後における各放電管の点弧推移は第6-2表のようになる。

すなわち定常オ10番目回路状態の始端近傍で放電管T3の異常点弧により、通弧事故を発生したとすれば、約3°程度の時間後に放電管T2, T5が消弧し、以後はT3, T4のみが点弧状態となる。それ故定常オ10番目回路状態の後半に対応する期間および定常オ11番目回路状態に対応する期間における点弧放電管はT3, T4のみとなる。

次に定常オ12番目回路状態に対応する期間に突入すると放電管T1の点弧子に点弧パルスが印加される。しかしこの場合、直流回路が放電管T3およびT4を通じて短絡されているために、オ6-1図の回路において、節点bが大地電圧となっており、したがってオ6-3図の相電圧曲線より容易に推察されるように、この時点における放電管T1の陽陰極間には逆電圧*が印加されることとなり、たとえ点弧子に点弧パルスが印加されても放電管T1は点弧しない。それ故定常オ12番目回路状態およびオ13番目回路状態(オ1番目)に対応する期間における点弧放電管は依然としてT3およびT4のみである。



オ6-3表図

* (註) オ6-3図の定常オ12回路状態の始端近傍における線間電圧 e_{ab} が印加される。

このような経過をたどって次に定常状態の第2番目回路状態に対応する期間に突入するわけであるが、この場合は、図6-3図から明かなように放電管T₆の陽極-陰極間に線間電圧e_{cb}が順方向に印加されるので、放電管T₆は点弧する。したがって点弧放電管はT₃、T₄、T₆の3個となり、放電管T₆およびT₄の間に転流状態が発生することとなる。さてこの状態の継続期間中における交流回路の回路方程式は次のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} v_r &= (L' \frac{d}{dt} + R') i_r + e_r + U_0 \\ i_a &= 0, \quad -i_b = i_c, \quad v_b = v_c = 0 \\ i_a^{-0} &= i_b^{-0} = i_c^{-0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

これを、たとえば*i_b(t)*について解くと次の結果となる。

$$i_b(t) = \frac{E_w \sqrt{6} E_{wph}}{2L'w} \cdot \cos \theta_0 \left\{ \cos(\beta - \theta_0 - \omega t) - \cos(\beta - \theta_0) \cdot e^{-\lambda t} \right\} \quad (6.7')$$

上式より明かなように電流*i_b(t)*は急速に上昇するが、この*i_b(t)*の値が直流電流*i_w(t)*の値に等しくなる時点において転流状態は完了し、放電管T₄が消弧する。しかし、實際上、通弧事故発生後においては直流回路は放電管T₃およびT₄を通じて短絡(地絡)されているので、直流電流*i_w(t)*は急激に上昇しており、したがってこの転流が可能であるためには式(6-7)式で表される*i_b(t)*の最大値がこの時点における*i_w(t)*の値より大きくなければならない。すなわち通弧事故が自然に解消するためにはまずこの転流完了時点における直流電流の値が上の*i_b(t)*の最大値よりも小さいことが必要であり、これは近似的に次式で与えられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_w \sqrt{6} E_{wph}}{2L'w} \{ 1 - \cos \beta \} &> i_w(t_1) \\ t_1 &= 2\tau + \beta/\omega \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

ただし*t₁*は時間の原点をこの通弧発生時点にえらんだ。

さてこの条件がみたされるものとすれば、上述のように放電管T₄が消

弧し、定常オ3番目回路状態に対応する期間においては、点弧放電管は T_3 および T_6 となる。以後オ6-2表に示すように定常オ5番目回路状態に対応する期間まで点弧放電管は T_3 および T_6 となり、定常オ6番目回路状態に対応する期間に至って放電管 T_2 に点弧パルスが印加される。この場合は定常時と全く同様の転流機構となり、もしこの時点で転流失敗が発生しなければ以後、定常状態におけると全く同様の点弧経過を繰返しながら漸次定常状態へと復帰する。したがってこのような形態の逆変換装置通弧事故は、上のオ(6.8)式から明かなように、一般に制御角 β を十分大きくとり、又転流インダクタンス L をできるだけ小さく選定しておけば、何等特別な制御装置を用いなくとも、通弧事故発生後約 $\frac{1}{2}$ サイクル経過した時点において、放電管の点弧状況が自然状態に回復することがわかる。尚放電管 T_4 が消弧した直後、すなわち通弧状態が解消した直後においては自明のことながら、直流回路方程式は次のオ(6.9)式であらえられる。

$$\left. \begin{aligned} \left[\begin{array}{cc} Lp + R_0' & 1 \\ -1 & C_p + \frac{1}{R} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} I_1(P) \\ V_2(P) \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{c} E - E_w(P) \\ 0 \end{array} \right] + P \left[\begin{array}{c} L0 \\ 0C \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} i_1^{-0} \\ v_1^{-0} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{cc} Lp + R_0' & 1 \\ -1 & C_p \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} I_2(P) \\ V_2(P) \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{c} E + E_w(P) \\ 0 \end{array} \right] + P \left[\begin{array}{c} L0 \\ 0C \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} i_2^{-0} \\ v_2^{-0} \end{array} \right] \end{aligned} \right\} \quad (6.9)$$

$$E_w(P) = h^{-1} E_w \sqrt{6} E_{wph} \sin(-\beta + u + \omega t)$$

(ii) その他の時点において通弧事故が発生した場合の解析

上の(i)においては通弧事故が発生する時点として、定常オ10番目回路状態の始端附近を考えたが、こゝではその他の時点として、定常オ1番目回路状態の継続期間中に通弧事故が発生した場合につき解析を行い、(i)の場合と比較検討を試みる。ただしこの場合もやはり放電管 T_3 の異常点弧により通弧事故が発生するものとする。

さてこの場合は、放電管 T_3 と T_4 が点弧しているところへ放電管 T_3 が異常点弧するのであるから、直流回路はやはりその直後から放電管 T_3 および

T₄を通じて短絡され、直流回路に対する回路方程式は(1)の場合と全く同様に式(6.1)式となる。交流回路に対しても上記の式(6.2)式が当てはまるが、点弧放電管がT₁, T₄, T₃であるので条件式は次のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} i_c = 0, \quad i_a = -i_b, \quad v_a = v_b = 0 \\ i_a^{-0} = i_w^{-0}, \quad i_b^{-0} = -i_w^{-0}, \quad i_c^{-0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.10)$$

この式を式(6.2)式に代入し、 $i_a(t)$ について解くと次の結果がえられる。すなわち

$$i_a(t) = (i_w^{-0})e^{-bt} + \frac{\epsilon_w \sqrt{6} E_{wph}}{2L\omega} \cdot \cos\theta_0 \cdot \left\{ \sin(\beta - \theta_0 - \omega t) - \sin(\beta - \theta_0) \cdot e^{-bt} \right\} \quad (6.10)'$$

表6-3

定 常 時		通 弧 時 点弧放電管
回路状態	点弧放電管	
1	T ₄ T ₁	T ₄ T ₁ T ₃
2	T ₄ T ₁ T ₆	T ₄ T ₃ T ₆
3	T ₁ T ₆	T ₃ T ₆
4	T ₁ T ₆ T ₃	T ₃ T ₆
5	T ₆ T ₃	T ₃ T ₆
6	T ₆ T ₃ T ₂	T ₃ T ₆ T ₂
7	T ₃ T ₂	T ₃ T ₂
8	T ₃ T ₂ T ₅	T ₃ T ₂ T ₅
9	T ₂ T ₅	T ₂ T ₅
10	T ₂ T ₅ T ₄	T ₂ T ₅ T ₄
11	T ₅ T ₄	T ₅ T ₄
12	T ₅ T ₄ T ₁	T ₅ T ₄ T ₁

上式から容易にわかるように、この場合も通弧事故発生後、たゞちに $i_a(t)$ が 0 となり、したがって放電管 T_1 が消弧し、点弧放電管は T_3 および T_4 のみとなってしまふ。

次に定常 ω 2 番目回路状態に対応する期間に到達すれば、(i) の場合と全く同様の理由により、放電管 T_6 が点弧し、放電管 T_4 および T_6 の間に転流状態が発生する。こゝでもし転流失敗が起らなければ、以後における各放電管の点弧経過は (i) と全く同様に ω 6-3 表のようになる。

したがって通弧事故発生後、放電管の点弧状況が定常時のそれに回復するまでの期間は (i) の場合より短くなり、又 ω (6.8) 式の条件もみたされやすくなる。

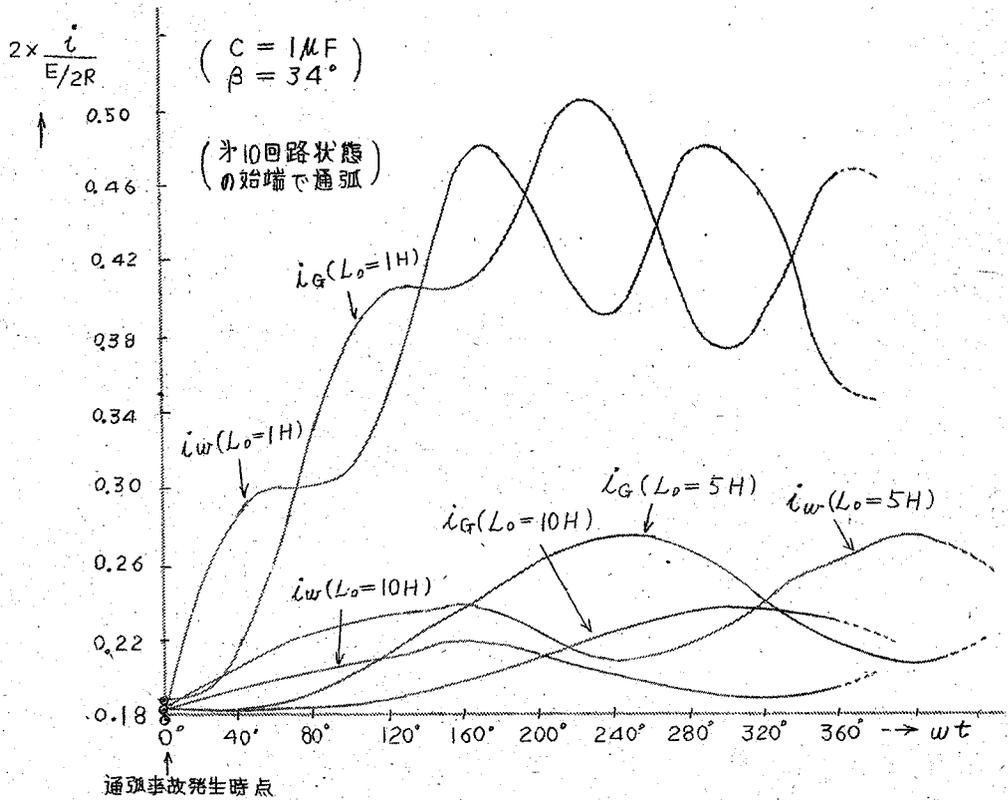
以上より一般に通弧事故の発生時点としては (i) の場合が最も苛酷であるかと考えられる。

6.3 通弧事故時における過渡現象の数値計算例

(i) L_0 の影響

ω 6-4 図および ω 6-5 図は $C=1\mu F$, $2R=40\Omega$, $2L\omega=24\Omega$, $\beta=34^\circ$, $L_0=1H, 5H, 10H$ とした場合に対し 6.2 (i) の場合すなわち定常 ω 10 番目回路状態の始端附近において放電管 T_3 の異常点弧により、通弧事故が発生した直後における過渡現象の計算結果である。たゞし各放電管の点弧経過は ω 6-2 表に従うものとし、又電流 i_G および i_w の上昇によって、平滑用コイル L_0 の飽和は起らないものと仮定した。

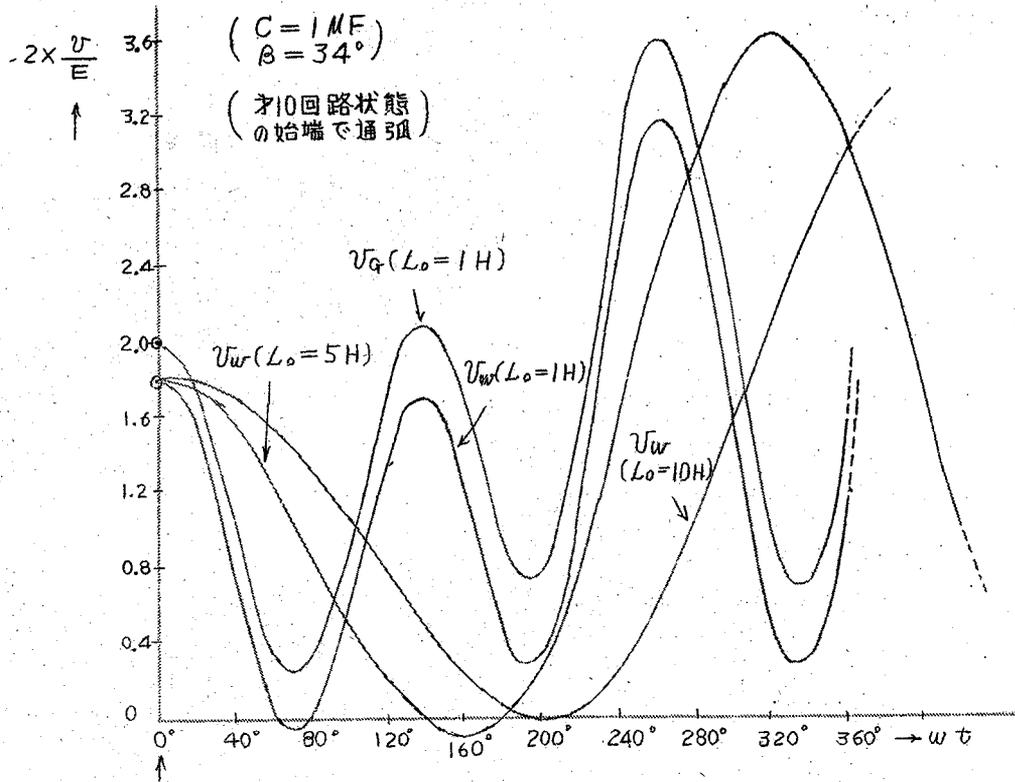
ω 6-4 図は直流電流 i_G および i_w の過渡経過を图示したもので、図から明かなように、この場合も ω 4 章の電圧変動時と同様、ほぼ $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$ で与えられる共振周波成分を含みながら急激に上昇し、その上昇率は L_0 の値が小さいほど著しい。しかし通弧事故発生後、前述のように約 $\frac{1}{2}$ サイクル経過すれば、放電管の点弧状況が定常状態と全く同様になるため、图示の期間以後における直流電流の波高値は図中の i_G の最大値以上になることはない。したがって図中の i_G の最大値が通弧事故発生時にお



才6-4図

ける直流電流 i_G および i_w の上昇限界と考えられ、その結果この i_G の最大値に等しい i_w の値に対し、各転流期間に転流失敗が発生しなければ通弧事故は何等特別な制御装置も働かさなくとも自然に定常状態に復帰する。すなわち電流 i_G の最大値が逆変換装置の転流失敗限界の電流値をこえないことが、通弧事故時における自然回復の条件となるのである。後述するように、上の計算例においては十分この条件が満たされており、又才6-6図はこの電流 i_G の最大値と L_0 との関連性を図示したものである。

次に才6-5図は同じく直流電圧 v_G および v_w の過渡経過を図示したものであるが、いずれの場合も通弧事故発生後、送電端直流電源電圧 E の2倍の



通弧事故発生時点

才6-5図

波高値を有する振動電圧となる。ただし $L_o = 1H$ の場合のみ最初の振動周期中に電圧波高値が電源電圧 E の倍電圧まで達していないが、これはこの時点において受電端側がまだ逆変換装置放電管を通じて地絡状態にあるためである。尚自明のことながら電圧の振動周波数もやはりほぼ $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_o C}}$ で与えられる。

又これらの計算例はすべて $\beta = 34^\circ$ とえらんだものであるが、直流電圧および直流電流の過渡経過に関する限り、制御角 β が殆ど本質的な影響をもたないことは、才4章の電圧変動時の場合と全く同様である。

さてこれらの計算例における重複角変化の過渡経過を図示すれば才6-7図のようになる。図から明かなように制御角 $\beta = 34^\circ$ は通弧事故に対

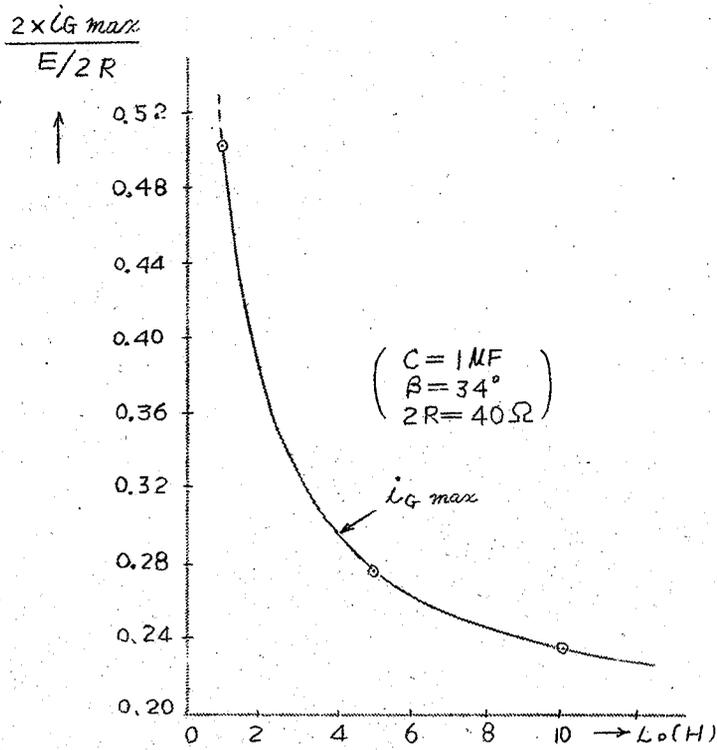
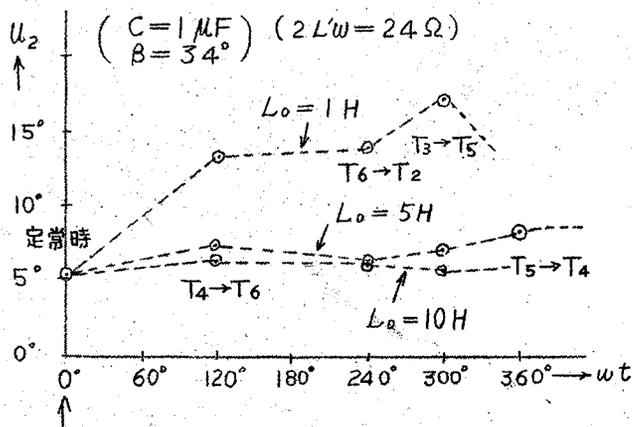


图 6-6



通流事故發生時點

图 6-7

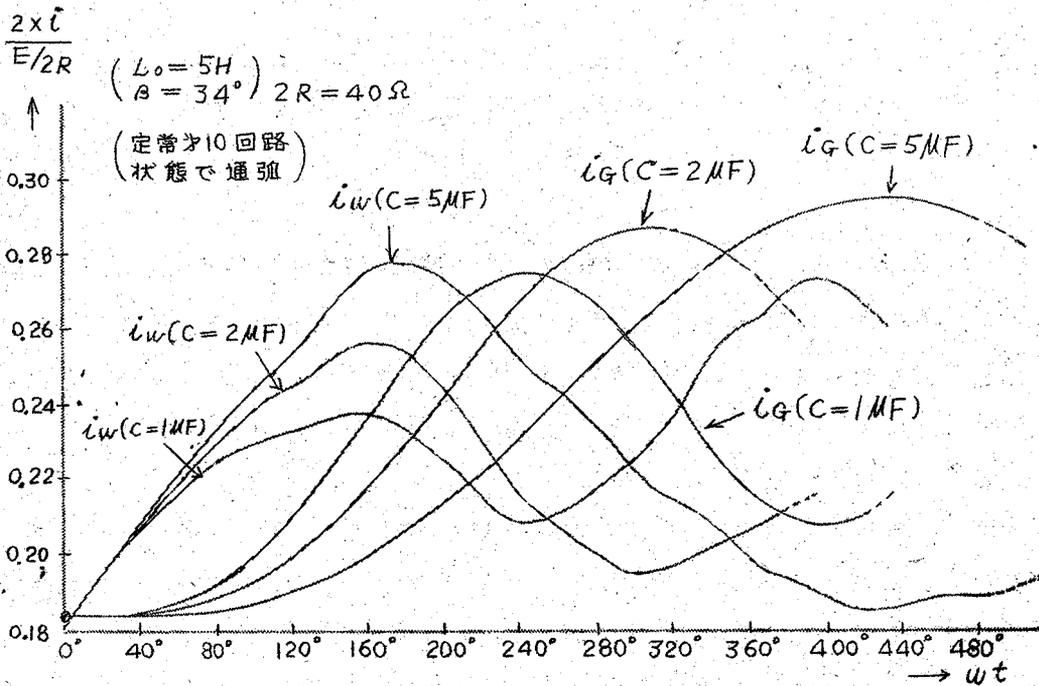
し十分安全側にあると考えられ、 $L_0=1H$ の場合においても、重複角 μ_2 の最大値は約 17° 程度であって、余裕角はなお 17° となっている。

ただし以上の計算結果は前述のように平滑用コイル L_0 が飽和しないものと仮定したものであるから、 $L_0=1H$ の場合でも直流電流の最大値が定常値の約2.8倍程度となっているが、実際には当然 L_0 の飽和が考えられ、したがって電流の上昇率はもっと大きくなるので、安全度はもっと悪くなる。

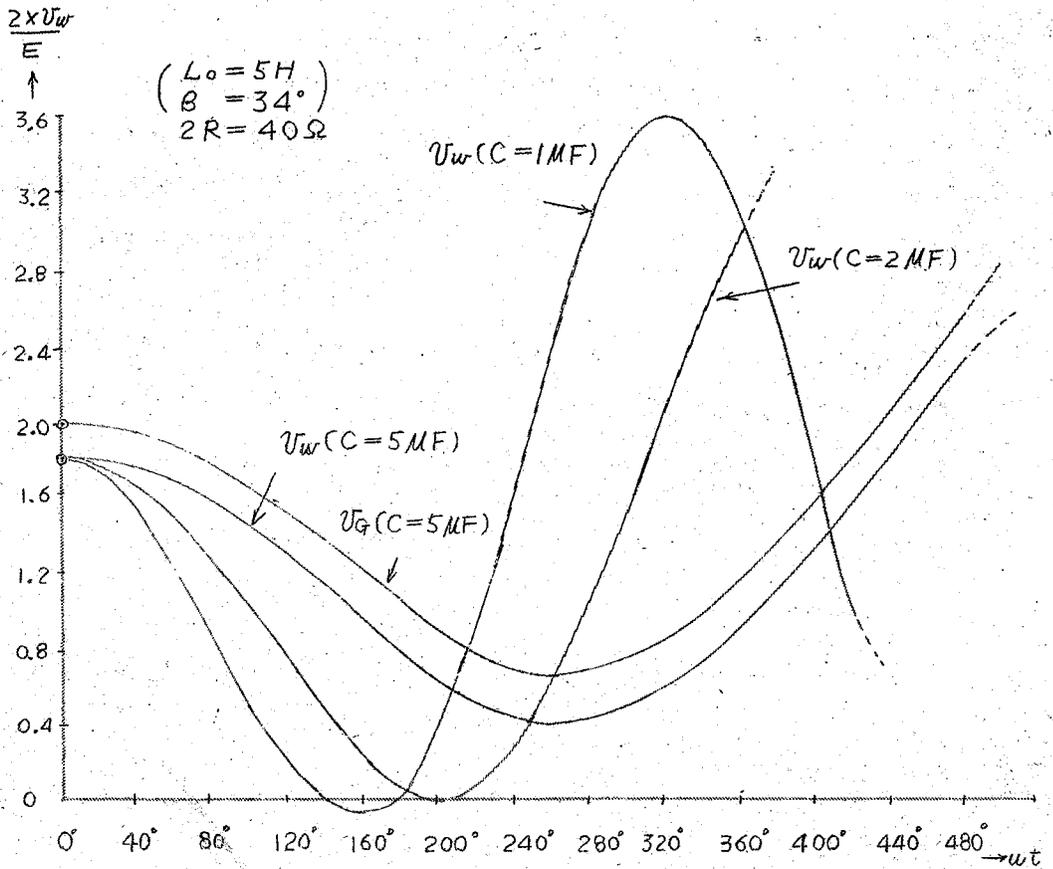
尚 $L_0=5H$ の場合には直流電流の最大値は定常値の約1.5倍、 $L_0=10H$ の場合には約1.3倍となっている。したがって通弧事故に対する安全性の面から考慮すれば平滑用コイルの値を数ヘンリー程度にえらぶことが妥当ではないかと考えられる。

(ii) C の影響

オ6-8図およびオ6-9図は $L_0=5H$ とした場合に対し、容量Cの影響



オ6-8図



オ6-9図

響について吟味したもので、(i)と同様、定常オ10番目回路状態の始端附近で放電管T₃の異常点弧により通弧事故が発生した場合の過渡現象の計算結果である。オ6-8図から判るように直流電流*i_G*の最大値はCの値が大きいほど大となるので、一般に容量Cの値が大きいほど、通弧事故に対する安全性はわるくなると考えられる。

尚Cの値が十分大きい場合には共振周期が大きくなり、その結果直流電流の上昇途上で通弧状態が終結してしまうため、オ6-9図に示されるように直流電圧*U_G*および*U_w*の振巾はいく分小さくなる。

尚これらの場合における重複角の過渡経過を图示すればオ6-10図がえられ、又*i_G*の最大値とCとの関連性を求め图示すればオ6-11図のよう

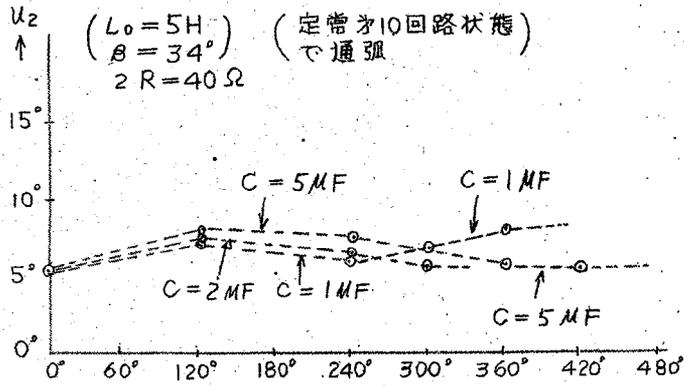


図6-10

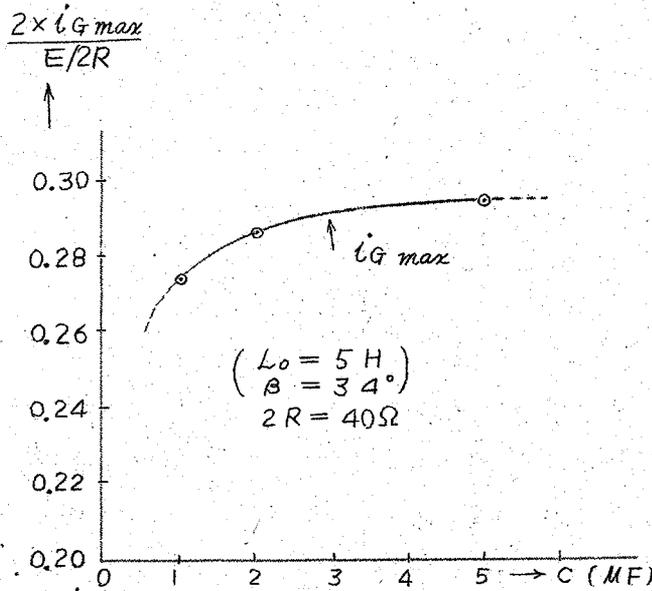
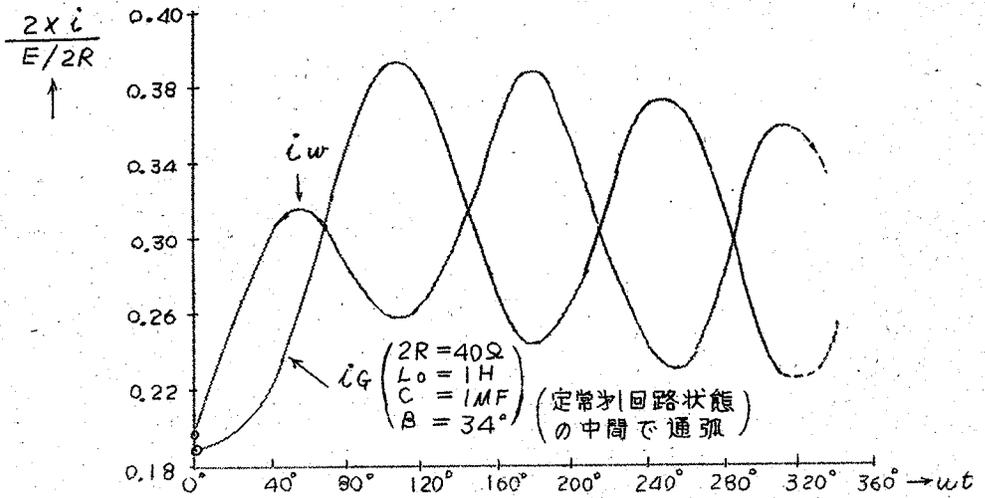


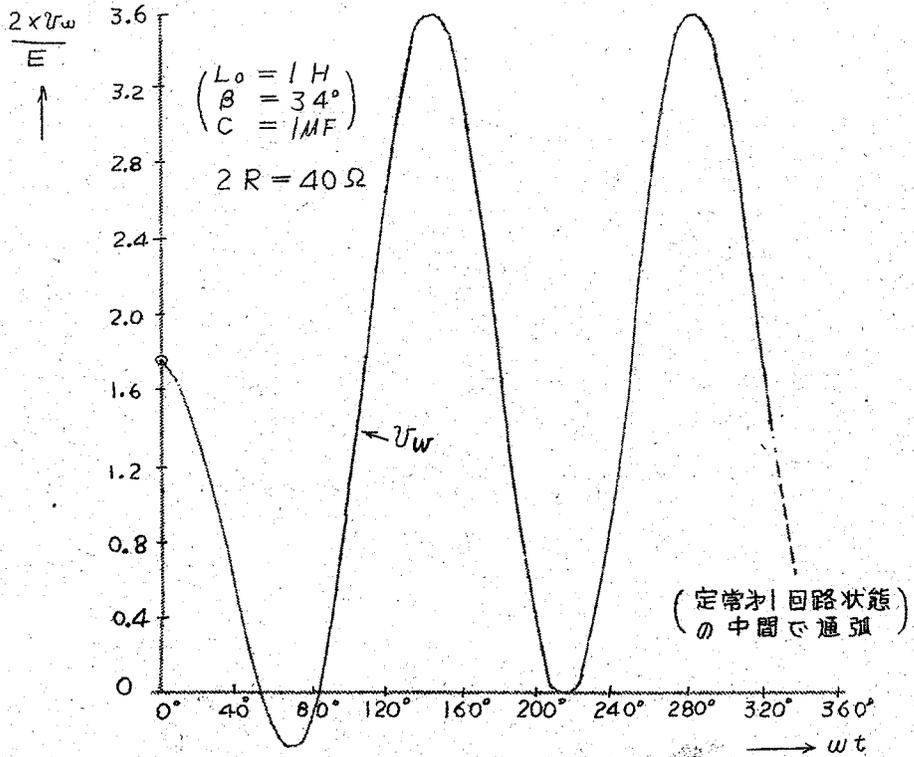
図6-11

になる。

以上より一般に平滑用コイル L_0 の値が十分大きい場合には、通弧事故時においても容量 C の影響は L_0 の影響に比し、殆ど無視してもさしつかえないと考えられる。



才6-12图

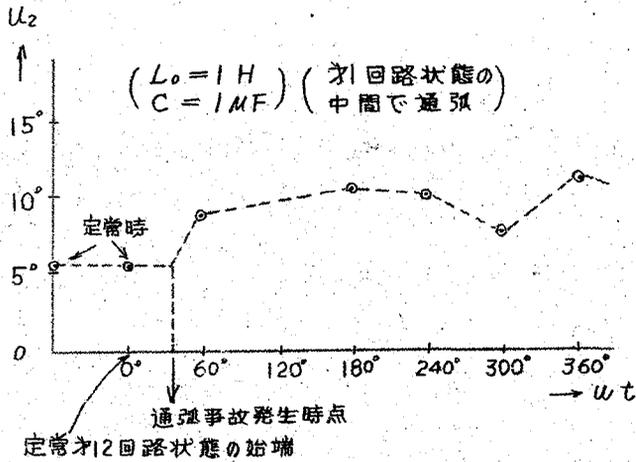


才6-13图

(iii) 通弧事故発生時点の影響

才6-12図および6-13図は $L_0 = 1H$, $C = 1\mu F$, $\beta = 34^\circ$, $2L'\omega = 24\Omega$ に対し、6.2(ii) の場合、すなわち定常才1番目回路状態の経過期間中に通弧事故も発生した場合の計算結果である。

この場合は前記の才6-3表に示すように通弧期間が、定常才1番目および才2番目に対応する期間のみであるから、電流の上昇率は(i)の場合に比しかなり低くなる。それ故、才6-14図に示すように重樞角の過渡経過も(i)の場合より安全側に位する。したがって一般に通弧事故発生時点としては前述のように6.2(i)の場合が最も危険であり、これは通弧期間が最も長くなることに対応する。



才6-14図

6.4 放電管逆弧時ならびに失弧時における過渡現象の解析

(i) 逆弧時における過渡現象の解析

定常運転時において各放電管の陽極-陰極間に印加される電圧すなわち前記の才6-2図を考察すれば、逆電圧の印加されている期間は、同図の

BF に相当する期間のみであり、したがって逆弧事故が発生するとすれば、この期間においてのみである。これは通常確率的に非常にまれであるが、制御角 β の値を過大にとると逆電圧の最大値もかなりの値に達するので無視することはできない。

図から容易に推察されるように、逆電圧の値は、放電管が点弧状態から転流期間を経て、消弧した直後において、最大となり、この場合制御角 β との関係は次式で与えられる。すなわち、

$$\text{逆電圧の最大値} = \epsilon_w \sqrt{6} E_w \phi \sin(\beta - u_2) \quad (6.11)$$

それ故こゝでは任意の放電管が消弧した直後、たとえば前述のように放電管 T_4 についていえば、定常オ3番目回路状態の始端において逆弧事故が発生するものと仮定して解析を進める。

さて、定常オ3番目回路状態の始端において放電管 T_4 が逆弧したとすれば、その直後における交流系統の回路方程式は次式で与えられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} U_r &= (L' \frac{d}{dt} + R') i_r + e_r + U_0 \\ \sum i_r &= 0, \quad \sum e_r = 0 \\ i_a &= i_w, \quad i_c = -i_w - i_b, \quad U_b = U_c = 0 \\ i_a^{-0} &= i_w^{-0}, \quad i_c^{-0} = -i_w^{-0}, \quad i_b^{-0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

これを逆弧電流 $i_b(t)$ について解けば次の結果をうる。すなわち

$$\begin{aligned} 2 \times i_b(t) &= (i_w^{-0}) e^{-bt} - i_w(t) + \frac{\sqrt{6} E_w \phi}{L' \omega} \cdot \cos \theta_0 \left\{ \cos(\beta - \theta_0 - u_2 - \omega t) \right. \\ &\quad \left. - \cos(\beta - \theta_0 - u_2) e^{-bt} \right\} \end{aligned} \quad (6.13)$$

上式より明かなように逆弧電流 $i_b(t)$ は逆弧事故発生後、急激に上昇し、その後再び下降することがわかる。したがって逆弧事故発生直後における点弧放電管は T_1, T_6 , および (T_4) となり、この状態が定常オ4番目回路状態の始端まで継続する。ただしこの場合、動作条件によっては、逆弧電流 $i_b(t)$ の方向が、この期間中に順方向に変わってしまうこともあ

る。すなわち $i_b(t)$ は上述のように上昇後再び下降するので場合によっては定常オ4番目回路状態に対応する期間以前に0となる時点が見れるのである。これをオ(6.13)式により考察すれば、 $i_b(t)$ が0となる時点は近似的に次式であらえられる。すなわち

$$\cos(\beta - U_2 - \omega t) - \cos(\beta - U_2) = 0 \quad (6.14)$$

したがって上式も満足する時点を t_0 とすれば、逆弧発生後、定常オ3番目回路状態に対応する期間内で電流 $i_b(t)$ が0となるべき条件は、定常オ3番目回路状態の継続期間を T とすれば、近似的に次式で与えられる。

$$2(\beta - U_2) = \omega t_0 < \omega T_1 \quad (6.15)$$

すなわち逆弧事故発生後、定常時における放電管余裕角の2倍に相当する期間経過した時点で逆弧電流 $i_b(t)$ は0となる。それ故一般に余裕角が小さいほど、すなわち制御角 β が小さいほど、この時点 t_0 は小さくなるが、これは制御角が小さいほど逆電圧期間が短くなることから容易に推察されよう。

さてこの電流 $i_b(t)$ が0となった直後について考察すると、もし放電管がこの時点で消弧したとすれば、放電管陽極-陰極間には順方向に正電圧が印加される結果、直ちに順方向に点弧してしまう。したがってこの場合電流 $i_b(t)$ がたとえ逆向きになるとしても放電管 T_4 は消弧しないと考えるのが妥当であろう。

尚この場合逆弧電流 $i_b(t)$ の波高値は近似的に次式で与えられる。すなわち

$$i_b \max = \frac{E_w \sqrt{6} E_{uph}}{2 L' \omega} \{1 - \cos(\beta - U_2)\} \quad (6.16)$$

又この期間における直流回路の回路方程式は定常時と全く同様にして、次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{aligned} \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & C_p+\frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(P) \\ V_1(P) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E-E_w(P) \\ 0 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} L_0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1^{-0} \\ v_1^{-0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Lp+R_0' & 1 \\ -1 & C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2(P) \\ V_2(P) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E+E_w(P) \\ 0 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} L_0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_2^{-0} \\ v_2^{-0} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$

$$E_w(P) = \sqrt{2}^{-1} \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_w \sqrt{6} E_w \phi \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \omega t\right)$$

さて以上のような点弧状況の下に定常が4番目回路状態に対応する期間に到達すると放電管T₃が点弧され、直流回路は直ちに放電管T₃およびT₄を通じて短絡される。その結果、放電管T₁およびT₆は直ちに消弧され以後6.2の逆弧時と全く同様の点弧経過をたどるようになる。表6-4表

表6-4表

定 常 時		逆 弧 時
回路状態	点弧放電管	点弧放電管
3	T ₁ T ₆	T ₁ T ₆ (T ₄)
4	T ₁ T ₆ T ₃	T ₁ T ₆ (T ₄) T ₃
5	T ₆ T ₃	T ₃ T ₄
6	T ₆ T ₃ T ₂	T ₃ T ₄
7	T ₃ T ₂	T ₃ T ₄
8	T ₃ T ₂ T ₅	T ₃ T ₄ T ₅
9	T ₂ T ₅	T ₄ T ₅
10	T ₂ T ₅ T ₄	T ₄ T ₅
11	T ₅ T ₄	T ₄ T ₅
12	T ₅ T ₄ T ₁	T ₄ T ₅ T ₁
1	T ₄ T ₁	T ₄ T ₁
2	T ₄ T ₁ T ₆	T ₄ T ₁ T ₆

はこれらの場合における各放電管の点弧経過を示したもので、これより、放電管の逆弧事故が発生した場合には必ずその直後に通弧事故が発生し、その後は前述の通弧事故と全く同様になることがわかる。

(ii) 失弧時における過渡現象の解析

この場合もすでに6.1で述べたように結果として通弧事故を発生するが、通弧事故発生後はやはり、6.2の場合と全く同様の結果をたどるので、ここでは失弧事故発生後、通弧事故発生までの期間のみに注目し解析を行うことにする。ただしその際簡単のために、定常第2番目回路状態の始端にて放電管T₆が失弧事故を発生するものと仮定する。

さて、定常第2番目回路状態における点弧放電管はT₄、T₁、T₆であるが、ここでT₆が点弧しないと仮定すれば、この回路状態および定常第3番目回路状態に対応する期間中の点弧放電管はT₁およびT₄となる。

したがって失弧事故発生直後における直流回路の回路方程式は第(6-17)式と全く同様に次式で与えられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} L_p + R_0' & 1 \\ -1 & C_p + \frac{1}{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(P) \\ V_1(P) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E - E_w(P) \\ 0 \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} L_0 \\ 0C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1^{-0} \\ v_1^{-0} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} L_p + R_0' & 1 \\ -1 & C_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_2(P) \\ V_2(P) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E + E_w(P) \\ 0 \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} L_0 \\ 0C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_2^{-0} \\ v_2^{-0} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} (6.18)$$

$$E_w(P) = E^{-1} E_w \sqrt{6} E_{wph} \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \beta + \omega t\right)$$

この場合、点弧放電管はT₁およびT₄のみであるので、交流系統の各相電流は次のようになる。すなわち

$$i_a = i_w, \quad i_b = -i_w, \quad i_c = 0. \quad (6.19)$$

以上のように失弧事故発生直後は、事故発生以前の点弧状態のまま、 $\frac{1}{6}$ サイクルの期間継続し、その後定常第4番目回路状態に対応する期間に至って放電管T₃が点弧する。すなわちこの場合も事故発生後 $\frac{1}{6}$ サイクル

経過してやはり逆弧事故を誘発し、以後は6.2の場合と全く同様の結果をたどる。オ6-5表はこの場合の点弧経過を表示したものである。

オ6-5表

回路状態	定 常 時	失 弧 時
	点弧放電管	点弧放電管
2	T ₄ T ₁ T ₆	T ₄ T ₁
3	T ₁ T ₆	T ₄ T ₁
4	T ₁ T ₆ T ₃	T ₄ T ₁ T ₃
5	T ₆ T ₃	T ₃ T ₄
6	T ₆ T ₃ T ₂	T ₃ T ₄
7	T ₃ T ₂	T ₃ T ₄
8	T ₃ T ₂ T ₅	T ₃ T ₄ T ₅
9	T ₂ T ₅	T ₄ T ₄
10	T ₂ T ₅ T ₄	T ₄ T ₅
11	T ₅ T ₄	T ₄ T ₅
12	T ₅ T ₄ T ₁	T ₄ T ₅ T ₁
1	T ₄ T ₁	T ₄ T ₁

6.5 逆弧時および失弧時における過渡現象の数値計算例

オ6-15図および6-16図は $L_0=10H, C=1\mu F, 2R=40\Omega, 2L\omega=24\Omega, \beta=34^\circ$ とした場合に対し、逆弧事故発生後における過渡現象の計算結果を図示したものである。

前述のように逆弧期間はほぼ最初の $\frac{1}{6}$ サイクルの期間のみであり、以後は通弧事故時と同様の経過をたどる。

図から判るように、逆弧電流 $i_b(t)$ の波高値はこの場合、定常時における陽極電流のほぼ2.4倍となっているが、これは勿論オ(6.16)式から明かなように、制御角 β が小さいほど、又転流インダクタンスが大きい

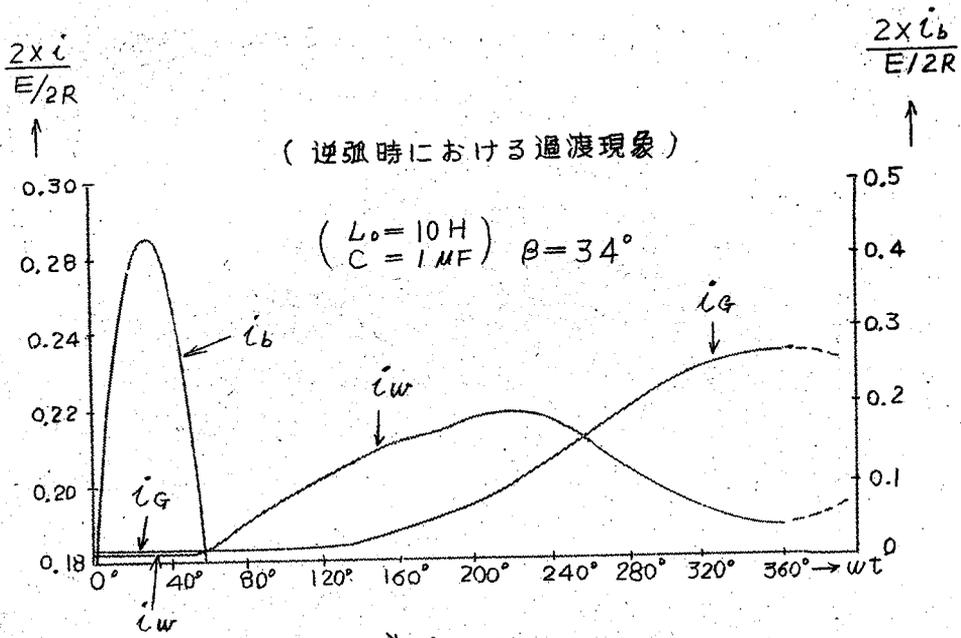


図 6-15

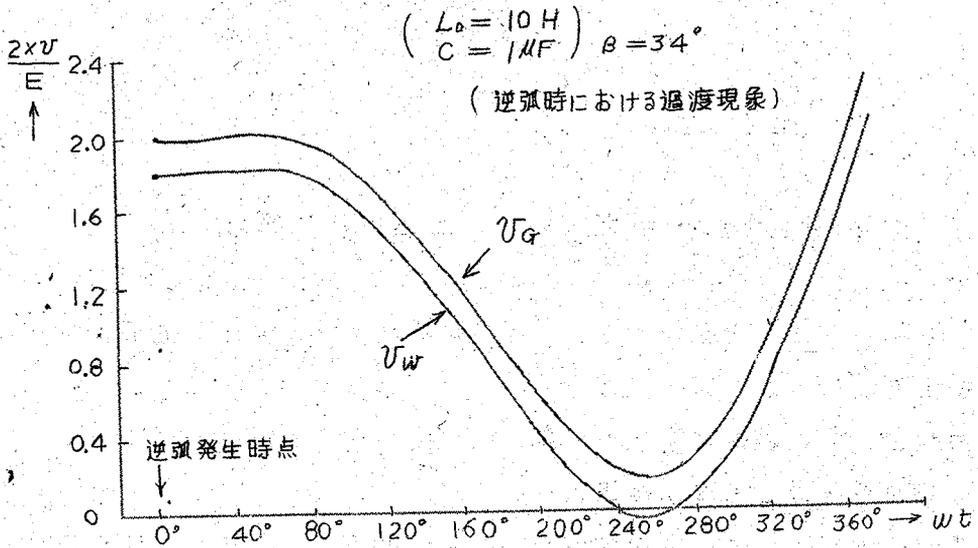
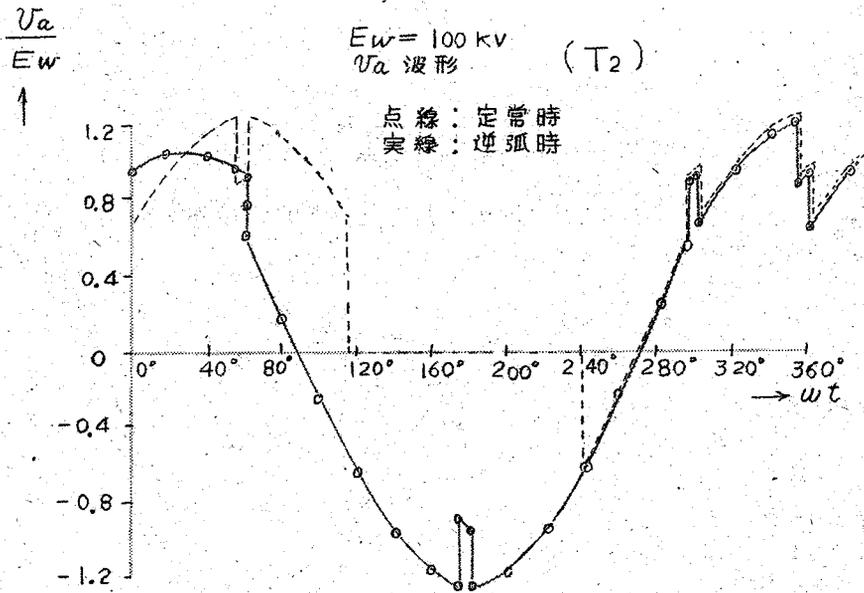


図 6-16

ほど小さくなる。

尚逆弧期間中における直流電流 i_G および i_w ならびに直流電圧 V_G および V_w の値は定常値に対しほとんど変化しないので、通弧事故発生後におけるこれらの過渡経過はさきの 6.3 の場合と殆ど一致し、したがって逆弧事故時における自然回復条件も 6.3 の場合と全く同様になると考えてさしつかえない。ただしこの場合逆弧放電管の陽極が逆弧電流によって破壊されないことが前提条件となることは論をまたない。

次にこれらの過渡経過期間における各放電管の陽極-陰極間電圧、入力直流電圧および中性点電圧の推移を図示すればオ6-17図および6-18図がえられる。オ6-17図(a)は、オ6-1図における節点Qの対地電圧の過渡経過を図示したもので、図中の点線で示した曲線は定常時の経過である。これらは放電管 T₂ の陽極-陰極間電圧に相当するものであり、定常時においては逆電圧の波高値は $\beta=34$ に対し、順電圧波高値の約 $\frac{1}{2}$ 程度であるが、逆弧事故発生時においては、順電圧の波高値とほぼ同じ値の逆電圧が印加されることとなる。



オ6-17図(a)

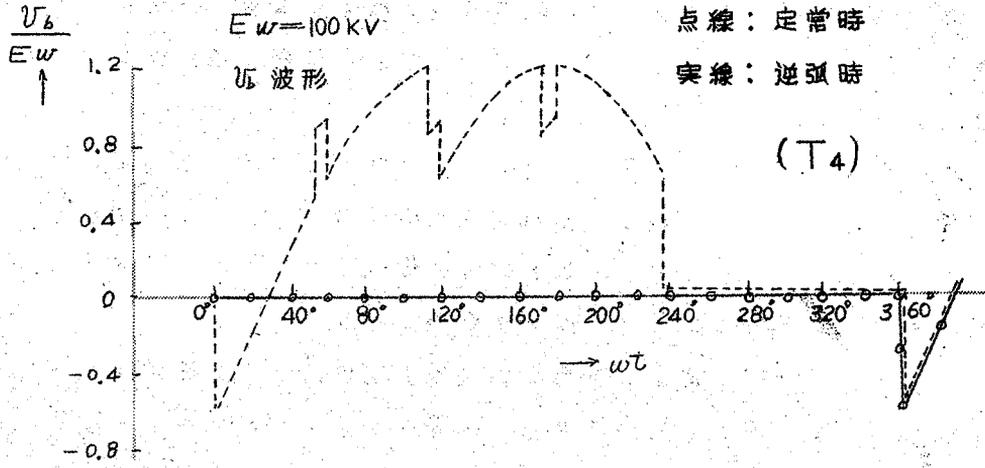


图 6-17(b)

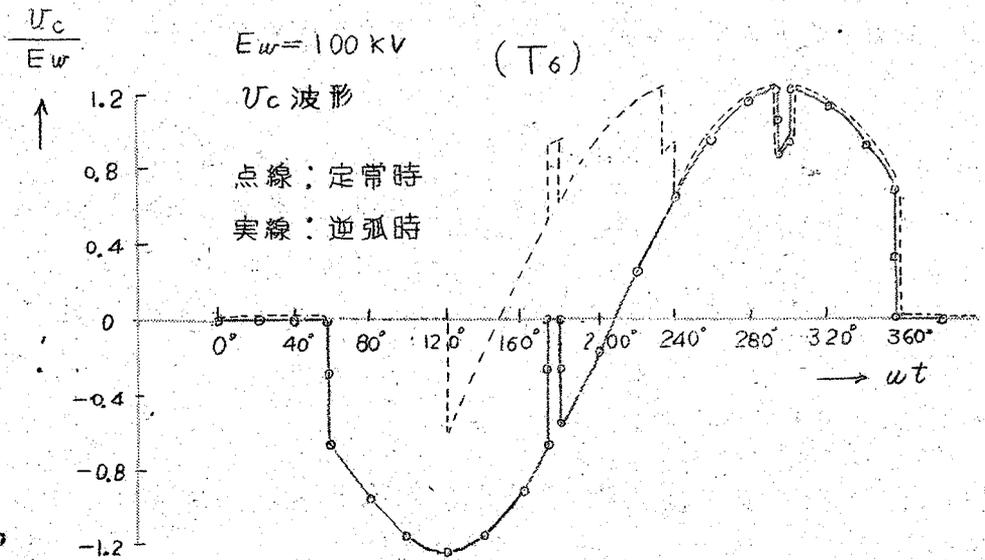


图 6-17(c)

同図(b)は同じく節点bの対地電圧すなわち放電管T₄の陽極-陰極間電圧を图示したものである。この場合、逆弧放電管は逆弧発生後1サイクルの期間点弧状態が継続している。

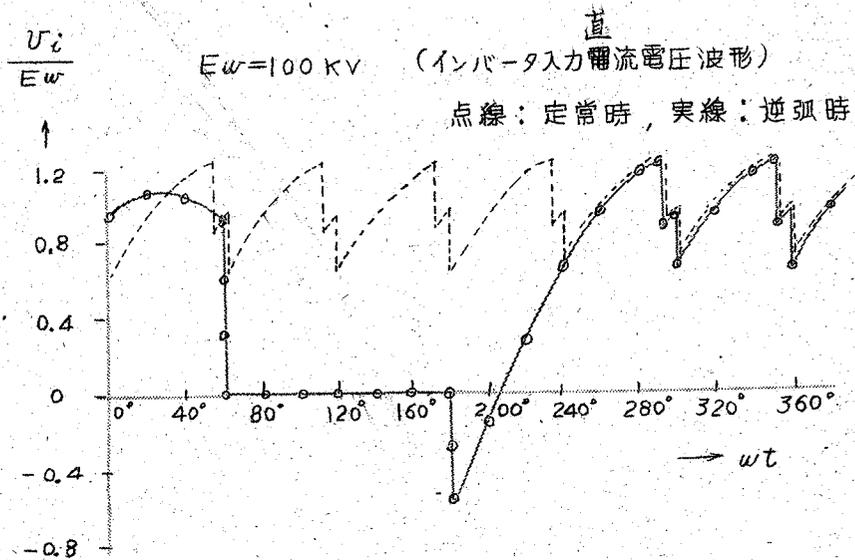
同じく同図(c)は放電管T₆の陽極-陰極間電圧を图示したもので、この場合も逆電圧の波高値はほぼ順電圧の波高値に等しくなっている。

尚当然のことであるが、通弧事故発生後、すなわち図の横座標60°以後は6.2の通弧事故時も全く同様の経過となる。

したがって一般に通弧放電管以外の各放電管には通弧期間中、順電圧の波高値にほぼ等しい波高値をもつ逆電圧が印加されることとなる。

次にオ6-18図(a)は逆変換装置の入力直流電圧の過渡経過を、同じく(b)は中性点電圧V₀の過渡経過を图示したものであって、これより通弧期間の終結直後(180°の時点)においてはオ(6.9)式からも容易にわかるように入力直流電圧が負の値になることが知られ、又中性点電圧は通弧期間中は負の値となることがわかる。

尚以上の結果より、各放電管に印加される陽極-陰極間電圧および逆変換装置入力直流電圧、中性点電圧等はすべて逆弧事故発生後 $\frac{2}{3}$ サイク

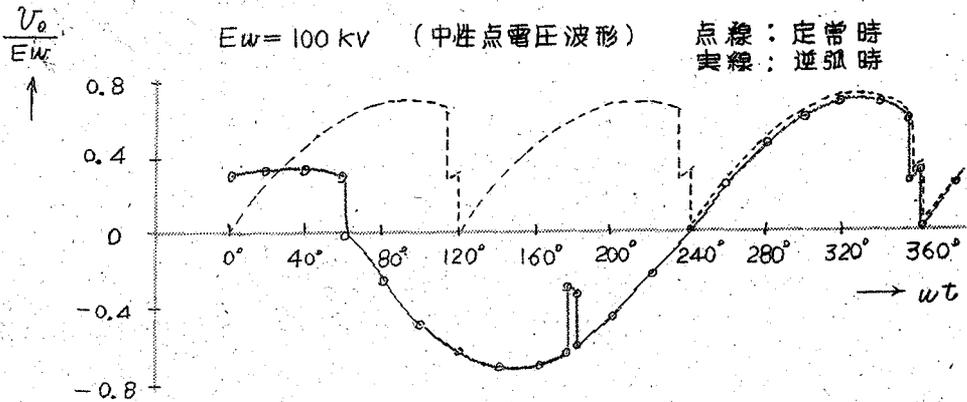


オ6-18図(a)

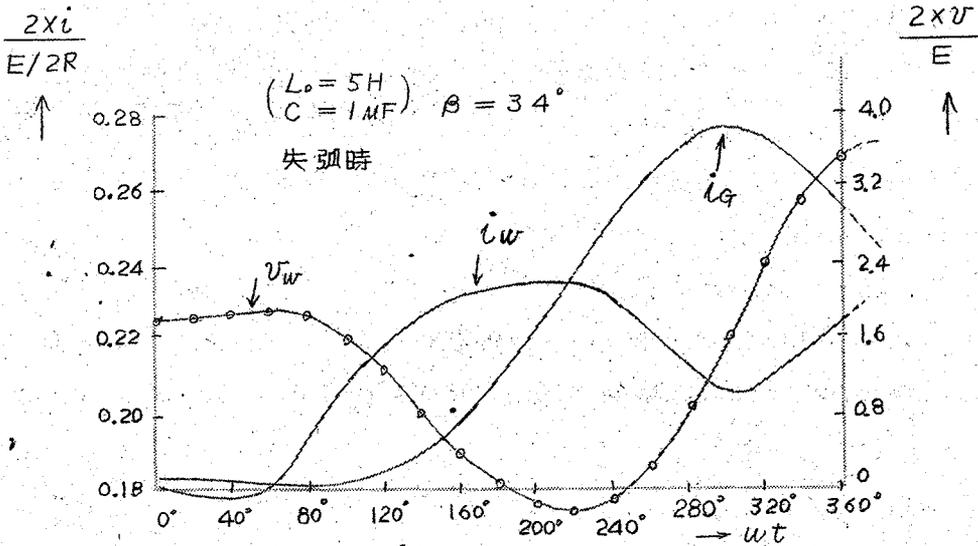
ル経過してほぼ定常状態に回復することがわかる。

オ6-19図は前述の6.4(ii)の場合、すなわち放電管失弧時における過渡現象の計算結果を図示したものであって、その際、 $L_0=5H$ 、 $C=1\mu F$ とした。

この場合も失弧事故発生後、通弧事故発生までの期間においては、直流電流 i_G 、 i_w および直流電圧 V_G 、 V_w の変化が非常に微小であるので、通弧



オ6-18図(b)



オ6-19図

事故発生後における過渡経過はさきの6.3の場合と殆ど一致する。

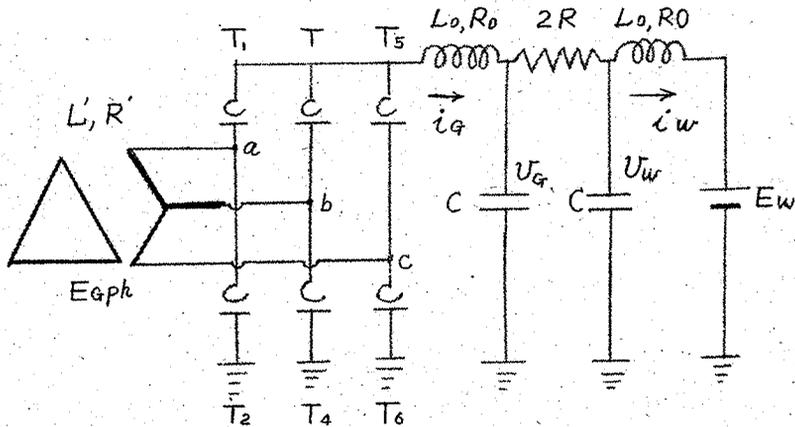
以上より、一般に逆弧時および失弧時における過渡特性は前述の通弧時における過渡特性さ之明かであれば十分把握できると断言してよからう。

以上、直流送電系統の逆交換装置放電管故障時における過渡現象の解析結果についてのべたが、これを要約すると次の結論がえられる。すなわち、

- (i) 逆弧事故、失弧事故等はいずれもその発生直後ほぼ $\frac{1}{6}$ サイクルも経過して通弧事故を誘発するが、通弧事故発生以前における直流電圧および電流の変動は通常微小である。
- (ii) 通弧事故発生後においては、直流電流は急激に上昇し、その上昇率は殆んど平滑用コイル L_0 の値によって決定される。又直流電圧は $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$ の共振周波数をもつ振動電圧となり、自然回復条件がみたされる場合にはその波高値は直流電源電圧の倍電圧に達する。
- (iii) 通弧事故発生後ほぼ1サイクル以内における直流電流の上昇率を転流失敗限界値以下に限定しうる場合には、通弧事故は一般に何等特別な制御装置を用いなくとも自然に定常状態に復帰する。
- (iv) 自然回復の可能性は回路常数および動作条件によって決定され、一般に平滑用コイル L_0 の値が大きいほど、送電線の容量 C の値が小さいほど、転流インダクタンスの値が小さいほど、制御角 β の値が大きいほど、交流系統電圧が高いほど、この可能性は大きくなる。
- (v) 以上はすべて交流系統周波数を60サイクルとして、解析したものであるが、周波数が低い場合には通弧期間が長くなるため、交流系統の周波数は高い方が通弧事故に対して安全である。

第7章 直流送電系統の順変換装置 放電管逆弧時における過渡現象の解析

この章では直流送電系統が定常運転状態にある場合に、順変換装置放電管が急激に逆弧事故を発生した直後における過渡現象の解析結果について述べる。ただしその際直流送電系統としては第3章の最後に述べたと同様、第7-1図の回路、すなわち受電端側を直流電源 E_w に等価した回路について解析を行った。



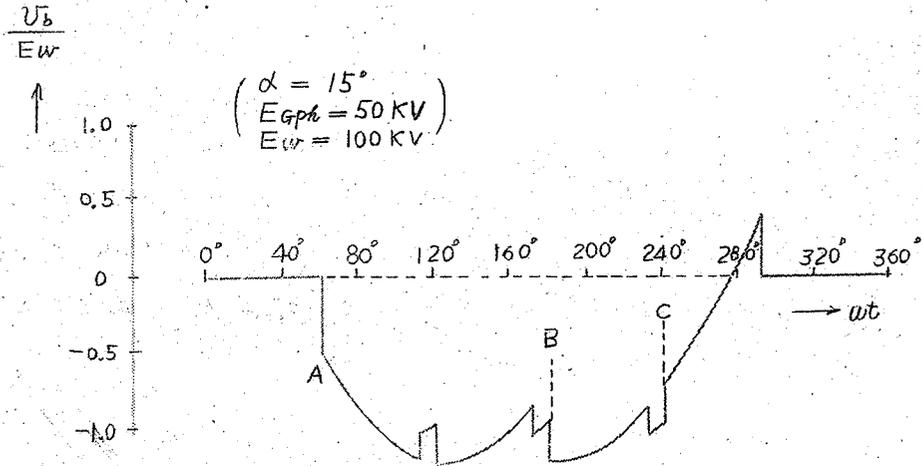
第7-1図

回路状態	点 弧 放 電 管		
1	T ₄	T ₁	
2	T ₄	T ₁	T ₆
3	T ₁	T ₆	
4	T ₁	T ₆	T ₃
5	T ₆	T ₃	
6	T ₆	T ₃	T ₂
7	T ₃	T ₂	
8	T ₃	T ₂	T ₅
9	T ₂	T ₅	
10	T ₂	T ₅	T ₄
11	T ₅	T ₄	
12	T ₅	T ₄	T ₁

第7-1表

7.1 順変換装置の逆弧事故について

さてオ7-1図の系統が定常運転状態にある場合、順変換装置の放電管陽極-陰極間に印加される電圧はオ7-2図のようになる。図は定常オ1番目回路状態の始端を時間の原点にえらび、放電管T₄の陽極-陰極間電



オ7-2図

圧を示したものであるが、他の放電管についても全く同様となることはすでにオ6章で述べた通りである。

図から明かなように、各放電管には1サイクル中約 $\frac{3}{4}$ サイクルの期間中、逆電圧が印加されているので、逆変換装置の放電管に比し、逆弧事故も発生する確率はきわめて大きい。後述するように、順変換装置放電管の逆弧事故時には、交流系統に非常に大きな短絡電流が流れるので、前章で述べた逆変換装置の通弧事故のように、自然回復することはいままであり、したがって順変換装置の逆弧事故は可及的に避けなければならない。実際上は、逆弧放電管の強制消弧等種々の制御過程が設けられ、更にオ7-1図の回路における各放電管の代りに、数個の放電管を直列に接続することにより、逆弧発生の確率ができるだけ小さくなるようにしている。

しかし以下の解析においては、これらの逆弧防止策は一応考慮せずに、
 図7-1の回路において、任意の放電管が定常運転中に逆弧事故を発生
 した直後における過渡現象のみ注目し、更にその際逆弧発生時点として
 図7-2のA点、B点およびC点に対応する時点を選び、逆弧事故発生
 時点と短絡電流の大きさとの関係を主として吟味することにする。

7.2 逆弧発生時における回路方程式の導入

(i) A時点で逆弧した場合

この場合も、第6章におけると同様、逆弧事故を発生する放電管とし
 て、簡単のために放電管 T_4 を考えると、図7-2のA時点は表7-1の
 定常第3番目回路状態の始端に対応する。したがって逆弧発生直後に
 ける点弧放電管は $T_1, T_6, (T_4)^*$ であり、その際の直流回路に対する回路方
 程式は次のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} L_p + R_0' & 1 \\ -1 & C_p + \frac{1}{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(P) \\ V_1(P) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E_G(P) - E_w \\ 0 \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} L_0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1^{-0} \\ v_1^{-0} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} L_p + R_0' & 1 \\ -1 & C_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_2(P) \\ V_2(P) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E_G(P) + E_w \\ 0 \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} L_0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_2^{-0} \\ v_2^{-0} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

$$E_G(P) = \frac{\sqrt{3}}{2} E_g \sqrt{6} E_{gph} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + \omega t\right)$$

他方交流回路に対する回路方程式は次式で与えられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{Q}_r &= (L \frac{d}{dt} + R) i_r + v_r - v_0, \quad r = a, b, c \\ i_a &= i_G, \quad i_b + i_c = -i_G, \quad v_b = v_c = 0 \\ i_a^{-0} &= i_G^{-0}, \quad i_b^{-0} = 0, \quad i_c^{-0} = -i_G^{-0} \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

ただし i_a, i_b, i_c はそれぞれ中性点から流れ出す方向を正とする。

上式より逆弧電流 $i_b(t)$ を求めると次の結果がえられる。すなわち

* (註) 逆弧放電管は以後すべて()で包み、他と区別することにする。

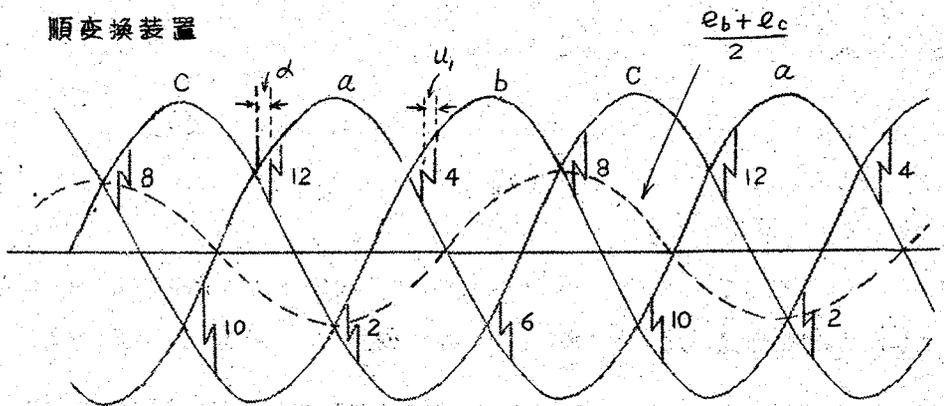
$$2 \times i_b(t) = (i_g^{-0}) e^{-bt} i_g(t) + \frac{E_g \sqrt{6} E_{gp} t}{L' \omega} \cdot \cos \theta_0 \left\{ \cos(\alpha + u_1 + \theta_0) \cdot e^{-bt} - \cos(\alpha + u_1 + \theta_0 + \omega t) \right\} \quad (7.3)$$

この結果より容易に推察されるように、逆弧電流 $i_b(t)$ は逆弧発生後時間とともに急激に上昇する。したがって定常才3番目回路状態に対応する期間中では点弧放電管は $T_1, T_6 (T_4)$ の点弧状況をそのまま、継続する。

次に定常才4番目回路状態に対応する期間に到達すると放電管 T_3 に点弧パルスが印加されるが、この時点における放電管 T_3 の陽極電圧は放電管 (T_4) が逆弧中であるので、ほぼ大地電圧となっており、他方陰極電圧は放電管 T_1 が点弧状態にあるため、ほぼ才7-1図における節点 Q の対地電圧 v_a に等しい。この場合電圧 v_a は才(7.2)式より次のようになる。すなわち、

$$v_a = e_a - \frac{e_b + e_c}{2} - \frac{3}{2} (L' \frac{d}{dt} + R') i_g \quad (7.4)$$

こゝに $\frac{e_b + e_c}{2}$ は才7-3図の点線で示され、制御角 α の値が 30° より小さい場合には e_a の値より小さくなる。又転流インダクタンスおよびその抵抗分による電圧降下は通常微小であり、更にこの場合、一般に $\frac{di_g}{dt}$ の値が負となるので、制御角 α が 30° よりも小さい場合には、上式の右辺は正となり、したがって放電管 T_3 の陽極-陰極間には逆電圧が



第7-3図

印加されている。その結果、定常オ4番目回路状態に対応する期間では放電管T₃は点弧せず、点弧放電管はT₁, T₆, (T₄)のみ、すなわち交流系統のbC相が短絡状態のみ、オ(7.1)式およびオ(7.2)式で与えられる状態が更に1/6サイクルの期間継続する。

勿論制御角αが30°より十分大きい場合、あるいは、この期間中に直流電流*i_d(t)*が0となってしまう場合等においては事情はいく分異ってくるが、ここでは簡単のためにαは30°より小さいものとし、又*i_d*はこの期間では0にならないものとして解析を進める。

さて次に定常オ6番目回路状態に対応する期間に到達すると放電管T₂に点弧パルスが印加されるが、この場合、オ7-3図から容易に推察されるように放電管T₂の陽極-陰極間には順電圧が印加されているので、T₂は点弧する。その結果、直流回路は放電管T₂およびT₁を通じて大地に短絡され、この時点直後における直流回路の回路方程式は次のようになる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} L_0 P + R_0 & 1 \\ -1 & C_P + \frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(P) \\ V_1(P) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -E_w \\ 0 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} L_0 & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1^{-0} \\ v_1^{-0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} L_0 P + R_0 & 1 \\ -1 & C_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2(P) \\ V_2(P) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E_w \\ 0 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} L_0 & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_2^{-0} \\ v_2^{-0} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

又、この場合点弧放電管はT₁, T₂, (T₄), T₆であるので、交流回路は、この直後から三相とも短絡状態となり、回路方程式は次のようになる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} e_r &= (L' \frac{d}{dt} + R') i_r + v_r - v_0 \\ v_a &= v_b = v_c = 0, \quad v_0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

これより、各相電流を求めると次の結果がえられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} i_a(t) &= (i_a^{-0})e^{-bt} + \frac{E_g\sqrt{2}E_{gph}}{L'w} \cos\theta_0 \left\{ \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta_0 + \omega t\right) - \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta_0\right) e^{-bt} \right\} \\ i_b(t) &= (i_b^{-0})e^{-bt} + \frac{E_g\sqrt{2}E_{gph}}{L'w} \cos\theta_0 \left\{ \sin(\alpha + \theta_0 + \omega t) - \sin(\alpha + \theta_0) e^{-bt} \right\} \\ i_c(t) &= (i_c^{-0})e^{-bt} + \frac{E_g\sqrt{2}E_{gph}}{L'w} \cos\theta_0 \left\{ -\cos\left(-\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta_0 + \omega t\right) + \cos\left(-\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta_0\right) e^{-bt} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

式(7.5)~(7.7)式より明かなように、この期間以後においては、直流回路と交流回路とが互に無関係となる。したがってこの後、直流電流 $i_G(t)$ がどの時点で0になるか否かということには全く無関係に、交流系統の各相間の短絡状態が継続する。その際の各短絡電流の波高値は式(7.7)式より容易に求められるが、次にこれを近似的に検討してみよう。

まず電流 $i_a(t)$ について考察すると、式(7.7)式の右辺第1項は、式(7.2)式から明かなように、通常右辺第2項に比して微小である。したがって $i_a(t)$ の波高値は近似的に次式で与えられる。すなわち、

$$|i_a \max| \doteq \frac{E_g\sqrt{2}E_{gph}}{L'w} \left\{ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right\} \quad (7.8)$$

又、この波高値を与える時点を $t_{a \max}^*$ とすれば、ほぼ次式で与えられる。

$$\omega t_{a \max} \doteq \pi - \left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \quad (7.8')$$

次に電流 $i_b(t)$ について考察すると、 i_b^{-0} は式(7.3)式より容易に求められ、したがって $i_b(t)$ の波高値は近似的に次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} |i_b \max| &\doteq \frac{E_g\sqrt{6}E_{gph}}{2L'w} \left\{ \cos(\alpha + \omega t_1) - \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \right\} + \frac{E_g\sqrt{2}E_{gph}}{L'w} \left\{ 1 - \sin\alpha \right\} \\ \omega t_{b \max} &\doteq \frac{\pi}{2} - \alpha \end{aligned} \right\} \quad (7.9)$$

* (註) 勿論時間の起点は式(7.7)式と同じで、定常第6番目回路状態の始端に対応する。

全く同様にして電流 $i_c(t)$ の波高値は次のようになる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} |i_{cmax}| &= \frac{E_g \sqrt{6} E_{gp} h}{2L'W} \left\{ \cos(\alpha + u_1) - \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \right\} + \frac{E_g \sqrt{2} E_{gp} h}{L'W} \left\{ 1 - \cos\left(-\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right\} \\ \omega t_{cmax} &= \frac{\pi}{6} - \alpha \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

ただし上の結果はいずれも α が 30° より十分小さいものとした場合である。

これらの結果より容易にわかるように、各短絡電流中、 $i_c(t)$ が最初に波高値に到達し、したがってその後最も早く符号が反転する。この場合直流電流 $i_G(t)$ が 0 となっておれば、その後は a, b 相のみの短絡となり、交流回路の回路方程式はいく分異ってくるが、もし $i_G(t)$ が尚正の値であれば、放電管 T_5 の点弧状態が考えられ、したがってその場合には電流 $i_c(t)$ の符号の反転は放電管 T_6 の消弧をもたらし、三相の短絡状態は依然として継続することになる。

以上のように放電管が定常運転時において、消弧直後に逆弧事故き発生した場合には、その後の各放電管の点弧経過は、動作条件によって種

第 7-2 表 $\alpha < 30^\circ$ の場合

定 常 時		逆 弧 時
回路状態	点弧放電管	点弧放電管
3	T_1, T_6	$T_1, T_6 (T_4)$
4	T_1, T_6, T_3	$T_1, T_6 (T_4)$
5	T_6, T_3	$T_1, T_6 (T_4)$
6	T_6, T_3, T_2	$T_1, T_6 (T_4), T_2$
7	T_3, T_2	$T_1, T_6 (T_4), T_2$
8	T_3, T_2, T_5	$T_1, T_6 (T_4), T_2, T_5$
9	T_2, T_5	$T_5, T_6 (T_4), T_2$
	etc.	etc.

又複雑な様相を呈するが、いずれの場合も、逆弧発生後、たゞちに交流系統の三相間の短絡状態を誘発し、各放電管には非常に大きな短絡電流が流れることとなる。

才7-2表は、この場合における各放電管の点弧経過の1例を表示したもので、表中定常才8番目回路状態に対応する期間において放電管T₅が点弧するとしたのは、 $i_G(t)$ が0とまらない場合、T₅の陽極-陰極間には、T₁の管内降下分およびT₂、(T₄)の管内降下分の総和に等しい電圧が印加されているので、こゝでT₅が点弧すると仮定したものである。尚A、B時点間の任意の時点で逆弧した場合もやはり一般に三相短絡事故が誘発される。

(ii) B時点で逆弧した場合

次に才7-2図のB時点すなわち定常才7番目回路状態の始端にて、放電管T₄が逆弧した場合につき解析を試みる。逆弧直後における点弧放電管はこの場合T₃^{*}、T₂、および(T₄)となり、その結果直流回路の入力電圧は放電管T₃および(T₄)を通じて直ちに大地電圧にひきおとされ、又αb相間に短絡状態が発生する。したがって逆弧発生直後における直流回路の回路方程式は才(7.5)式と全く一致する。

他方交流回路の回路方程式は次のようになる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} e_r &= (L \frac{d}{dt} + R') i_r + U_r - U_0 \\ i_a &= -i_b, \quad i_c = 0, \quad U_a = U_b = 0 \\ i_a^{-0} &= -i_G^{-0}, \quad i_b^{-0} = i_G^{-0}, \quad i_c^{-0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

これより逆弧電流 $i_b(t)$ を求めると次の結果がえられる。

米(註) この場合、才7-1図における節点bの対地電圧 V_b が急激に0となり、その結果放電管T₃の陽極電圧も急激に下降するが、この変化は平滑用コイル L_0 の作用により、放電管T₃の点弧状況には影響をもたないものとする。

$$i_b(t) = (i_G^{-0})e^{-bt} + \frac{E_g\sqrt{6}E_{gph}}{2L'\omega} \cdot \cos\theta_0 \left\{ \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha + u_1 + \theta_0\right) \cdot e^{-bt} - \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha + u_1 + \theta_0 + \omega t\right) \right\} \quad (7.12)$$

この場合、逆弧電流 $i_b(t)$ は定常オ7番目回路状態に対応する期間中増加していくので、点弧放電管は $T_2, T_3, (T_4)$ のまゝとなる。

次に定常オ8番目回路状態に対応する期間に到達すれば、放電管 T_5 に点弧パルスが印加されるが、この場合オ7-3図から容易に推察されるように、放電管 T_5 の陽極-陰極間には、順電圧が印加されているので、 T_5 は点弧する。したがってその後、直ちに放電管 T_3 が消弧され、点弧放電管は $T_2, (T_4), T_5$ の3個となる。 T_3 が消弧した後における直流回路の回路方程式は次のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \left[\begin{array}{cc|c} L_P + R_0' & 1 & \\ -1 & C_P + \frac{1}{R} & \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} I_1(P) \\ V_1(P) \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{c} E_G(P) - E_W \\ 0 \end{array} \right] + P \left[\begin{array}{cc|c} L & 0 & \\ 0 & C & \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} i_1^{-0} \\ v_1^{-0} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{cc|c} L_P + R_0' & 1 & \\ -1 & C_P & \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} I_2(P) \\ V_2(P) \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{c} E_G(P) + E_W \\ 0 \end{array} \right] + P \left[\begin{array}{cc|c} L & 0 & \\ 0 & C & \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} i_2^{-0} \\ v_2^{-0} \end{array} \right] \end{aligned} \right\} (7.13)$$

$$E_G(P) = \sqrt{2}^{-1} \frac{\sqrt{3}}{2} E_g\sqrt{6} E_{gph} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + u_3 + \omega t\right)$$

ただし u_3 は T_5 が点弧してから T_3 が消弧するまでの期間をさす*。
他方交流回路における各位相電流の計算結果は、それぞれ次式のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} i_a(t) &= -i_b(t) - i_c(t) \\ i_b(t) &= (i_b^{-0})e^{-bt} + \left\{ (i_G^{-0})e^{-bt} - i_G(t) \right\} / 2 \\ &\quad + \frac{E_g\sqrt{6}E_{gph}}{2L'\omega} \cdot \cos\theta_0 \left\{ \cos\left(\frac{2}{3}\pi + \alpha + u_3 + \theta_0\right) \cdot e^{-bt} - \cos\left(\frac{2}{3}\pi + \alpha + u_3 + \theta_0 + \omega t\right) \right\} \\ i_c(t) &= i_G(t) \end{aligned} \right\} (7.14)$$

* (註) われわれの計算例(後述)では u_3 は約 3° 程度となる。

もし $i_g(t)$ が 0 とならなければ、定常オ 8 およびオ 9 番目回路状態に対応する期間中、この点弧状況が継続し、次に定常オ 10 番目回路状態に対応する期間に到達すると放電管 T_4 に点弧パルスが印加されるが、この場合、 T_4 は逆弧中であるので、放電管の点弧状況には何等変化が起らない。したがって定常オ 10、オ 11 番目回路状態に対応する期間中における放電管の点弧状況は依然として $T_2, (T_4), T_5$ のまゝとなる。ただしオ 7-3 図から明かなように、この期間においては放電管 T_4 の陽極-陰極間に順電圧が印加されるので、動作条件によっては、この期間中に放電管 T_4 を流れる電流が順方向電流となることもある。

したがって、もし定常オ 11 番目回路状態に対応する期間中に電流 $i_b(t)$ の符号が反転するものとすれば、オ (7.14) 式より明かなように、いくらか遅れて電流 $i_a(t)$ も 0 となる時点が現れる。それ故この期間中に電流 $i_a(t)$ が 0 となれば、放電管 T_2 が消弧し、その後の点弧状況は定常時と全く同様となるので、以後の点弧経過は定常時と全く同様となり、漸次定常状態に回復する。

他方もし定常オ 11 番目回路状態に対応する期間中に電流 $i_b(t)$ の符号が反転しないものとすれば、定常オ 12 番目回路状態の始端に至って放電管 T_1 に点弧パルスが印加されるが、この場合放電管 T_1 の陽極電圧は T_2 が点弧状態にあるため 0 であり、他方陰極電圧は T_5 が点弧中であるため、節点 C の対地電圧 V_c に等しい。この時点における電圧 V_c は オ (6.4) 式と全く同様にして、次のようになる。すなわち、

$$V_c = e_c - \frac{e_b + e_c}{2} - \frac{3}{2} (L' \frac{d}{dt} + R') i_g \quad (7.15)$$

したがってこの場合も制御角 α が 30° より小さければ放電管 T_1 は点弧しない。しかしこの後もし定常オ 1 番目回路状態に対応する期間の終末以前に放電管 T_4 を流れる電流 $i_b(t)$ の符号が反転し、更に放電管 T_2 が消弧するものとすれば、以後はオ 7-3 表に示すような点弧経過をへて、常定状態の点弧状況に漸次回復するものと考えられる。

ただし以上の議論は、逆弧放電管を流れる電流 $i_b(t)$ の符号が反転す

才7-3表 $\alpha < 30^\circ$ の場合

定 常 時		逆 弧 時
回路状態	点弧放電管	点弧放電管
7	$T_3 T_2$	$T_3 T_2 (T_4)$
8	$T_3 T_2 T_5$	$T_3 T_2 (T_4) T_5$
9	$T_2 T_5$	$T_5 T_2 (T_4)$
10	$T_2 T_5 T_4$	$T_5 T_2 (T_4)$
11	$T_5 T_4$	$T_5 T_2 (T_4)$
12	$T_5 T_4 T_1$	$T_5 T_2 (T_4)$
1	$T_4 T_1$	$T_5 T_4$
2	$T_4 T_1 T_6$	$T_5 T_4 T_6$
3	$T_1 T_6$	$T_5 T_6$
4	$T_1 T_6 T_3$	$T_5 T_6 T_3$
5	$T_6 T_3$	$T_6 T_3$
etc		etc

る時点において、放電管 T_4 の陽極-陰極間には順電圧が印加されているので、 T_4 は消弧することなく、ただちに順方向電流を流すものと仮定し、更に、これらの経過中直流電流 $i_G(t)$ は0にはならないものとした。

以上のようにB時点にて逆弧を発生した場合も、やはり、動作条件いかんによっては複雑な点弧経過をたどるが、その際もし、逆弧電流の波高値が放電管を破壊する値までには達せず、更に直流電流が逆弧発生後1サイクル程度の期間中には0とならないとすれば、自然回復の可能性も考えられる。次にこの場合における逆弧電流および各相電流の波高値を(1)と同様、近似的に検討してみよう。

まず逆弧電流 $i_b(t)$ の波高値について考察すると、才(7.12)式および(7.14)式より近似的に次の結果がえられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} |i_b \max| &\doteq \frac{E_g \sqrt{6} E_g p h}{2 L' \omega} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha + u_1 \right) \right\} \\ \omega t_b \max &\doteq \pi - \left(\frac{2}{3} \pi + \alpha \right) \end{aligned} \right\} \quad (7.16)$$

ただし時間の起点は定常才8回路状態の起点に対応するとした。
 又電流 $i_a(t)$ 、および $i_c(t)$ の波高値については、才(7.14)式よりたゞ
 ちに推察されるようにそれぞれ次のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} |i_a \max| &\doteq i_G^{-0} + |i_b \max| \\ \omega t_a \max &\doteq \omega t_b \max \\ |i_c \max| &\doteq i_G^{-0} \end{aligned} \right\} \quad (7.17)$$

以上の結果より、この場合の逆弧電流の波高値は(i)の場合に比しか
 なり小さくなることがわかる。又交流回路の短絡は二相間のみで、(i)
 ように三相短絡にはならない。

(iii) C 時点で逆弧した場合

これは定常才9番目回路状態の始端にて放電管 T_4 が逆弧を発生した場
 合に相当し、しじがって逆弧発生直後における点弧放電管は $T_2, T_5, (T_4)$
 となるので、この時点における点弧状況は(ii)の場合と全く一致し、そ
 れ故この場合の直流回路に対する回路方程式は才(7.13)式と全く一致す
 る。但し $E_G(P)$ 中の u_3 のみはこゝでは u_1 となる。交流回路についても
 全く同様で、各相電流はやはり才(7.14)式で与えられる。以後における
 点弧経過も(ii)の場合に準じ、もし定常才11番目回路状態に対応する期
 間中に電流 $i_b(t)$ の符号が反転し、更に放電管 T_2 が消弧するものとすれ
 ば、以後定常状態に漸次回復するものと考えられ、又この期間内に T_2 が
 消弧しないものとすれば、以後才7-3表に示される点弧経過もたどるも
 のと考えられる。

この場合における逆弧電流の波高値は才(7.14)式から直ちに求められ

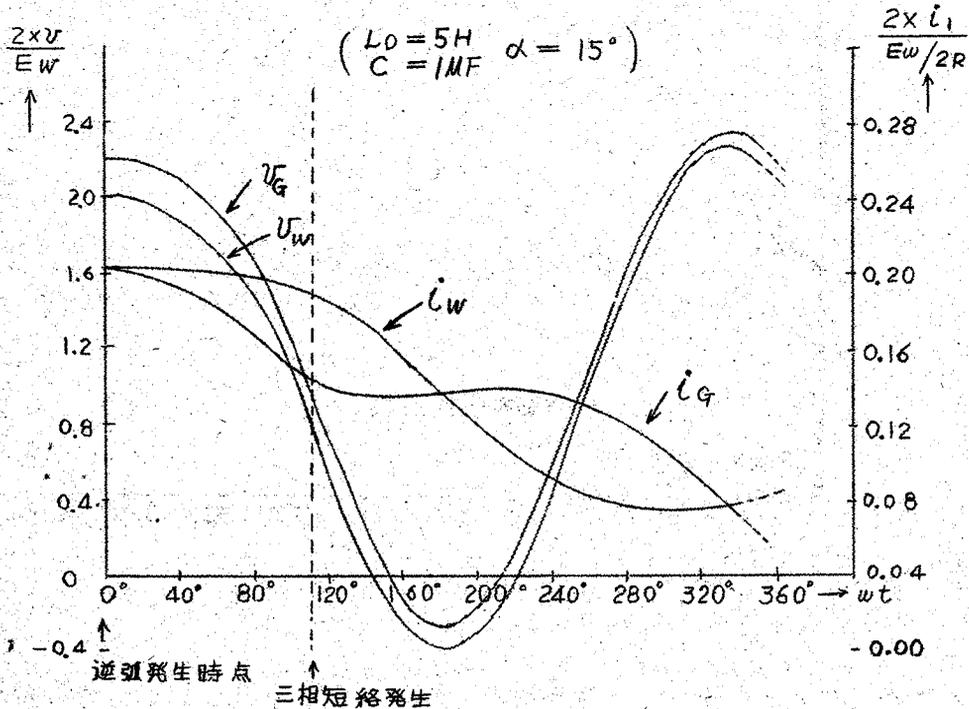
近似的に次式で与えられる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} |i_b \max| &\doteq \frac{E_g \sqrt{6} E_{gph}}{2 L' \omega} \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2}{3}\pi + \alpha\right) \right\} \\ \omega t_b \max &\doteq \pi - \left(\frac{2}{3}\pi + \alpha\right) \end{aligned} \right\} \quad (7.18)$$

したがって上の (i), (ii) の場合に比し、逆弧電流の波高値はずっと小さくなる。尚以上より一般に制御角 α が大きいほど逆弧電流の波高値は小さくなると考えられ、又転流インダクタンス L' の値が大きいほど小さくなる。

7.3. 数値計算例

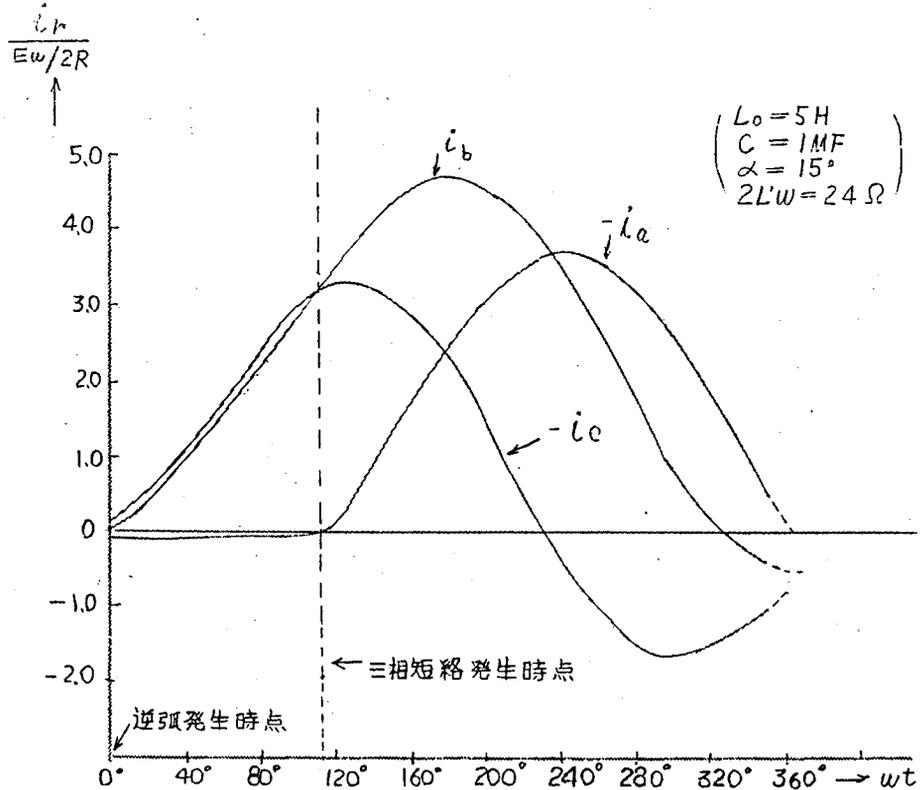
オ7-4図は $L_0 = 5H, C = 1\mu F, 2R = 40\Omega, 2L'\omega = 24\Omega, R_0' = 2\Omega$,



オ7-4図 A時点で逆弧した場合

$\alpha = 15^\circ$ とした場合に対し、前節の(i)の場合、すなわち定常第3番目回路状態の始端で放電管T4が逆弧を発生した場合における直流電流および直流電圧の過渡経過の計算結果を図示したものである。オ6章におけると同様、直流電圧はこの場合もほぼ $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$ で与えられる共振周波数成分の振動も発生し、直流電流は同じ共振周波数成分を含みながら急速に減衰する。

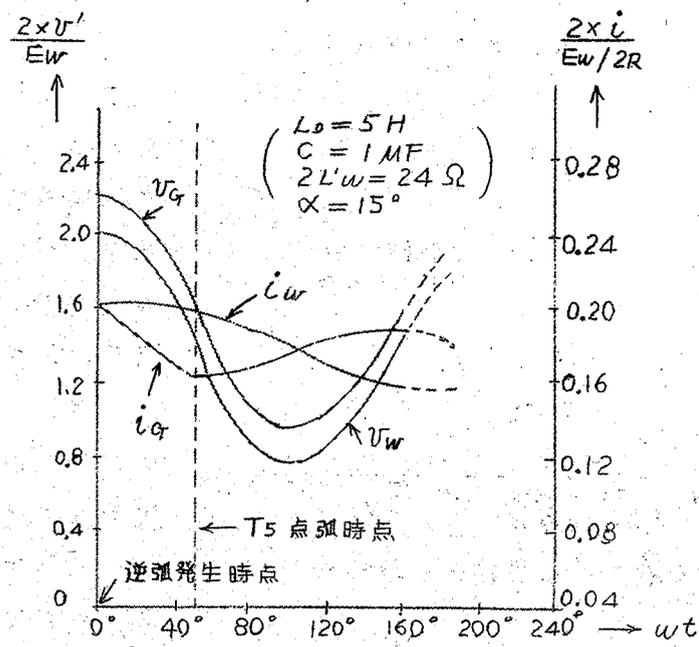
図から明かなように、 L_0 の値が十分大きい場合には、逆弧発生後、1サイクル程度の期間中では直流電流 i_G は0とならない。



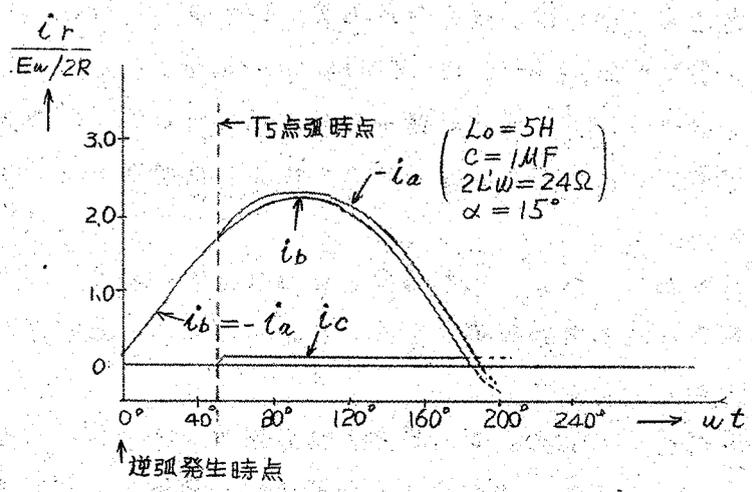
オ7-5図 A時点で逆弧した場合

オ7-5図はこの場合の各短絡電流の計算結果を図示したもので、図から明らかなようにA時点で逆弧事故が発生した場合には、逆弧電流の波高値は定常時における陽極電流の波高値のほぼ4.5倍程度となる。

尚この計算例における各放電管の点弧経過はオ7-2表に示した経過に従うものと仮定した。

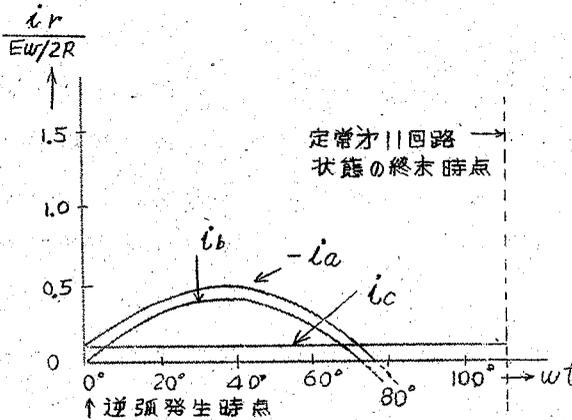


オ7-6図 B時点で逆弧した場合



オ7-7図 B時点で逆弧した場合

次にオ7-6図、7-7図はそれぞれB時点で逆弧した場合の計算結果を
 図示したもので、図から明かなように、直流電流および直流電圧の変動
 はA時点で逆弧した場合より少なく、又逆弧電流の波高値は定常時にお
 ける陽極電流波高値の約2.3倍程度となる。



オ7-8図 C時点で逆弧した場合

オ7-8図は同じくC時
 点で逆弧した場合におけ
 る逆弧電流の計算結果を
 図示したもので、逆弧電
 流の波高値は定常時陽極
 電流の約4倍、したがっ
 て放電管T₂を流れる電流
 i_a(t)の波高値は約5倍
 となっている。又この場
 合、定常オ11番目回路状
 態の継続期間中にi_a(t)

が0となり、したがって放電管T₂が消弧してしまうので、もし逆弧電流
 が放電管を破壊しないものとすれば、以後は完全に定常時の点弧経過に
 回復することとなる。

以上直流送電システムの順変換装置放電管が逆弧事故が発生した場合に対
 し、2,3の解析を試みたが、これを要約すれば次の結論がえられる。すなわち、

- (i) オ7-2図においてB時点以前の時点で逆弧が発生した場合には三相
 短絡を誘発するがB時点以後の時点で逆弧した場合には二相のみの短
 絡となる。
- (ii) 逆弧時点が早いほど、短絡電流の波高値は大となる。
- (iii) 短絡電流の波高値は転流インダクタンスが大きいほど、制御角αが
 大きいほど小さくなる。
- (iv) 交流系統電圧を50kV、変圧器その他の転流リアクトル内の電圧降下
 分を5%とした場合、逆弧電流の波高値は定常時における陽極電流の
 波高値250Aに対し最高約45倍程度となる。

第8章 低速型電子管式アナログ・コンピュータによる2,3の計算補遺

前章までにおいて、直流送電系統の定常時ならびに過渡時における動作特性に対し、かなり詳細な解析を試みたが、この章では特に起動時、過弧時における過渡現象も、さきの数値計算例ではとりあげなかった計算例に対し、低速型電子管式アナログ・コンピュータを用いて演算した結果について述べる。勿論現存のアナログ・コンピュータでは、数%の誤差はまぬがれないので、こゝでは専ら特性の大略を推定することを目的とした。

8.1. 起動時における過渡現象の計算補遺

第5章における計算例では回路常数 L_0 および C をそれぞれ次のように送定した。すなわち、

$$(i) L_0 = 5H; C = 1MF, 2MF, 5MF$$

$$(ii) C = 1MF; L_0 = 1H, 5H, 10H$$

これらの例は C の値がいずれも少し小さすぎ、又 L_0 の値が少し大きすぎると考えられるので、こゝでは次のように設定する。

$$(i)' L_0 = 1H; C = 1MF, 5MF, 10MF$$

$$(ii)' L_0 = 5H; C = 1MF, 5MF, 10MF$$

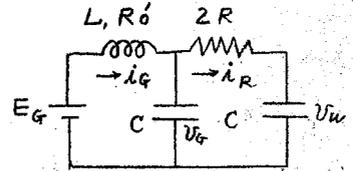
この(i)'および(ii)'について、さきの第5章で解析を行った順変換装置のみを投入した場合の過渡現象、および、直流送電線の容量素子 C に初期電価(倍電圧)を与え、しかる後逆変換装置のみを投入した場合の過渡現象について演算を行う。

(1) 順変換装置のみを投入した場合における過渡現象の演算

a) 回路方程式および演算器方程式の導入

オ5章で述べたように、順変換装置のみを投入した直後における回路はオ8-1図のようになるから回路方程式は次式で与えられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} E_G &= (L_p + R_0') I_G + V_G \\ V_G &= 2R \cdot I_G + V_w \\ I_R &= C_p (V_w - U_w^{-0}) \\ I_G - I_R &= C_p (V_G - U_G^{-0}) \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$



オ8-1図

この場合勿論 $U_G^{-0} = U_w^{-0} = 0$ である。

第(8.1)式を演算器方程式に変換する場合、各変数の変換係数をそれぞれ次のように定義する。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i I_G &= I_{Gm} & , & & \alpha_i I_R &= I_{Rm} \\ \alpha_v V_G &= V_{Gm} & , & & \alpha_v V_w &= V_{wm} \\ \alpha_t t &= t_m & , & & \alpha_v E_G &= E_{Gm} \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

ここでわれわれの場合、各変換係数 $\alpha_i, \alpha_v, \alpha_t$ の値をそれぞれ次のように設定する。

$$\alpha_i = 4 \times 10^{-4}, \quad \alpha_v = 4 \times 10^{-6}, \quad \alpha_t = 5 \times 10^3 \quad (8.3)$$

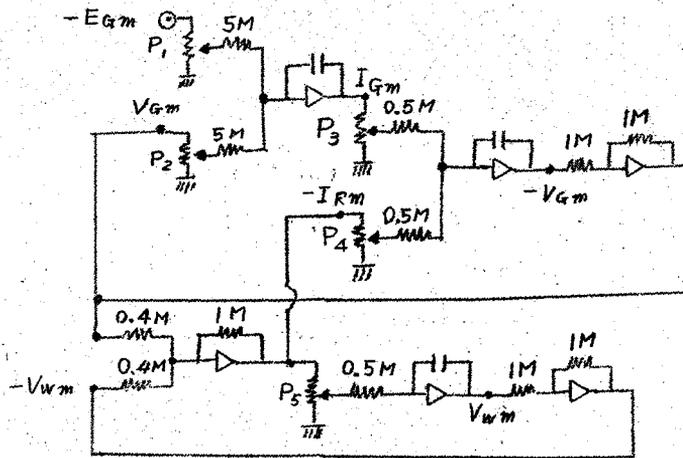
しあるときオ(8.1)式は次のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} P I_{Gm} &= \left\{ \frac{1}{L(H)} \right\} (0.02) \cdot E_{Gm} - \left\{ \frac{1}{L(H)} \right\} (0.02) \cdot V_{Gm} \\ &\quad - \left\{ \frac{R_0'(\Omega)}{L(H)} \right\} \cdot (0.0002) \cdot I_{Gm} \\ P V_{wm} &= \left\{ \frac{1}{C(MF)} \right\} (2.0) \cdot I_{Rm} \\ P V_{Gm} &= \left\{ \frac{1}{C(MF)} \right\} \cdot (2.0) (I_{Gm} - I_{Rm}) \\ I_{Rm} &= \left\{ \frac{1}{2R(\Omega)} \right\} (10^2) (V_{Gm} - V_{wm}) \end{aligned} \right\} \quad (8.4)$$

上式中 $L \doteq L_0 = 1 H, C = 1 MF, 2R = 40 \Omega$ とし、かつ上式中オ1

式の右辺が3項を無視すれば、演算回路はオ8-2図のようになる。

$E_G = 110 \text{KV}$ の場合には、 $\alpha v = 4 \times 10^{-6}$ であるから図中の E_{Gm} は 0.44 となる。又回路常数 L_0 および C の値が、それぞれ前記の (i)' および (ii)' の値をとる場合には、オ8-2図中の各ポテンシオメータは次のように設定すればよい。



オ8-2図

すなわち

(i)' $L_0 = 1 \text{H}$

$C = 1 \text{MF} : P_1 = P_2 = 0.1, P_3 = P_4 = P_5 = 1.0$

$C = 5 \text{MF} : P_1 = P_2 = 0.1, P_3 = P_4 = P_5 = 0.2$

$C = 10 \text{MF} : P_1 = P_2 = 0.1, P_3 = P_4 = P_5 = 0.1$

(ii)' $L_0 = 5 \text{H}$

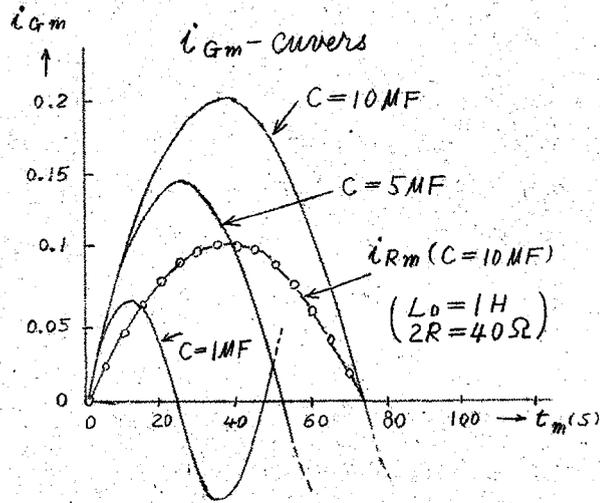
$C = 1 \text{MF} : P_1 = P_2 = 0.02, P_3 = P_4 = P_5 = 1.0$

$C = 5 \text{MF} : P_1 = P_2 = 0.02, P_3 = P_4 = P_5 = 0.2$

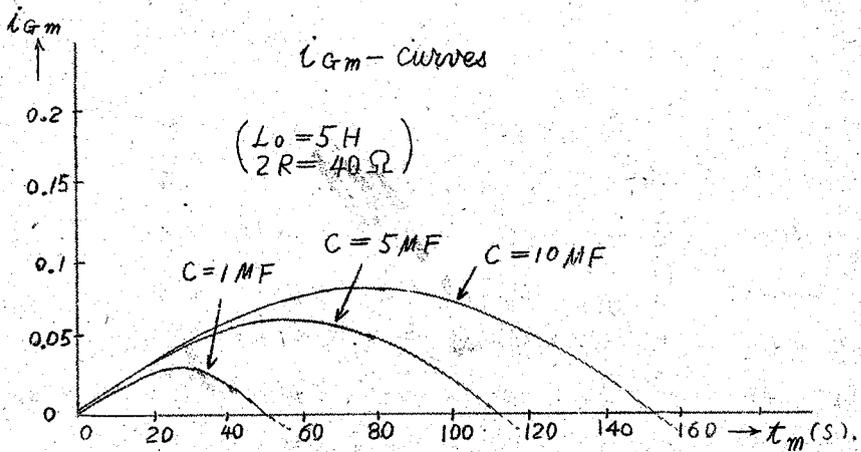
$C = 10 \text{MF} : P_1 = P_2 = 0.02, P_3 = P_4 = P_5 = 0.1$

(b) 演算結果

オ8-3図およびオ8-4図はこの場合の演算結果を図示したもので、オ8-3図は (i) の場合、オ8-4図は (ii) の場合に対応する。図は電流波形のみを示したが、電圧波形については、すでにオ5章の解析結果から明らかであるので割愛した。



オ8-3図



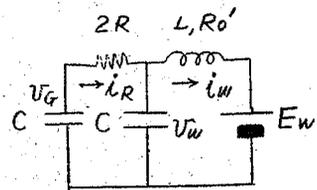
オ8-4図

これらの結果から明らかのように、充電電流 i_G の波高値は L_0 の値が小さいほど、 C の値が大きいほど大きくなり、 $L_0 = 1 \text{ H}$ 、 $C = 10 \text{ MF}$ の例では、定常電流値 $250 \text{ A} \times \alpha_i = 0.1$ の約 2 倍となっている。したがって、各変換装置における放電管の陽極電流があまり大きくできない場合には、回路常数の値によっては、起動時のみ交流系統電圧をあらかじめ下げておく必要がある。

(2) 直流送電線に初期電圧(倍電圧)を与え、しかる後、逆変換装置のみを投入した場合の過渡現象の演算

a) 回路方程式および演算器方程式の導入

これは第 5 章 5.2 の終りに述べたように、順変換装置投入後、 T 時間以後の時点で逆変換装置を投入する場合に相当し、逆変換装置投入直後における回路は既述のように第 8-5 図となる。したがって逆変換装置投入直後における回路方程式は次のようになる。すなわち、



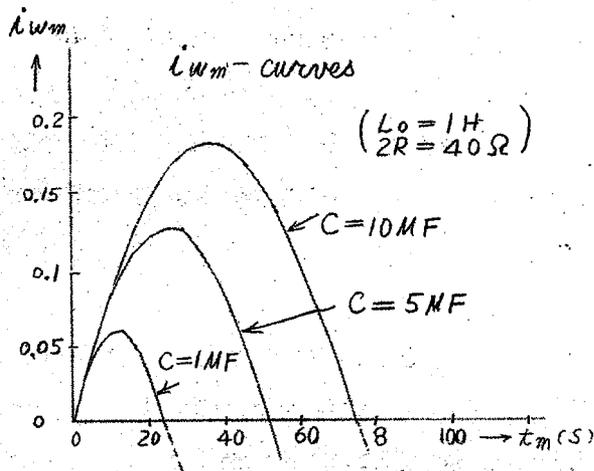
$$V_G^{-0} = V_w^{-0} = 2E_G$$

第 8-5 図

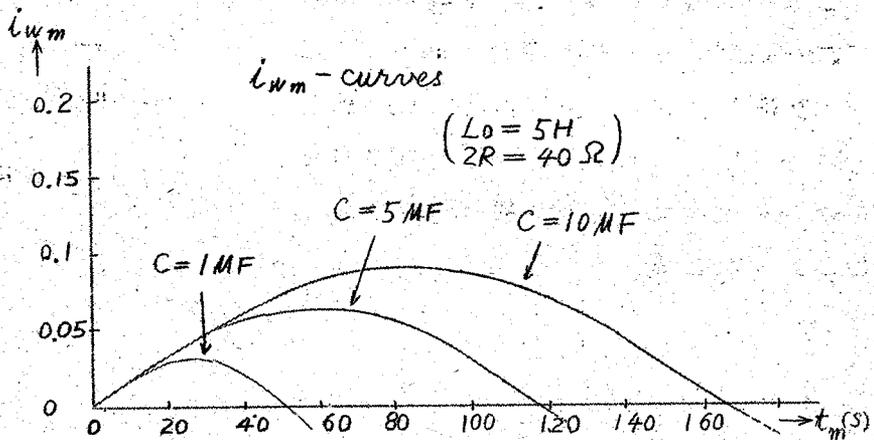
$$\left. \begin{aligned} V_w &= (L_p + R_0') I_w + E_w \\ V_G &= 2R \cdot I_w + V_w \\ I_R &= -C_p (V_G - V_G^{-0}) \\ I_R - I_w &= C_p (V_w - V_w^{-0}) \end{aligned} \right\} \quad (8.5)$$

この式を第(8-1)式と比較すれば、第(8-1)式中の E_G, I_G, I_R, V_G, V_w がそれぞれ $E_w, -I_w, -I_R, V_w, V_G$ となっているにすぎないので、演算器方程式、したがって演算回路も(1)の場合と全く同様になり、上記の各変数を上のように解釈しなおせばよい。ただし V_{Gm} および V_{wm} にそれぞれ 0.88 の初期値を与える点が異なるのみである。

b) 演算結果



第8-6図



第8-7図

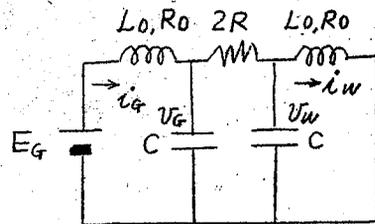
オ8-6図およびオ8-7図はこの場合の計算結果を図示したもので、これらの結果より、逆変換装置のみを最初に投入する場合も(1)の場合と全く同じ特性がえられることがわかる。尚オ8-7図と8-4図における振動周期の不一致は、計算の都合上、演算時間を非常に長くとったので、演算器増巾器のドリフトによる誤差が生じたものと考えられる。

8.2. 通弧時における過渡現象の計算補遺

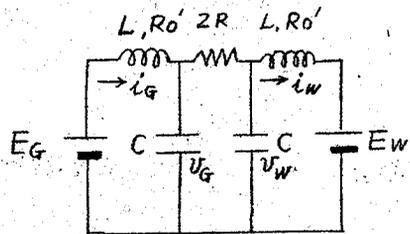
第6章で述べたように、逆変換装置の通弧事故は、もし自然回復の条件をみたすものとすれば、すくなくとも通弧事故発生後 $\frac{1}{3}$ サイクル経過した時点で、通弧状態が解消するので、ここでは通弧期間を $\frac{1}{3}$ サイクルとし、その後通弧状態が解消するものと仮定し、通弧事故発生後における直流電流 i_G の波高値を8.1で述べた回路常数中(1)'の場合にのみ注目して計算を行った。

α) 回路方程式及び演算器方程式の導入

通弧事故発生直後における直流送電系統の回路は近似的に第8-8図で表わされる。上述のように、この系統が通弧事故に対し、自然回復条件をみたすものとすれば、通弧期間はほぼ $\frac{1}{3}$ サイクル程度であるので、ここではまず第8-8図の回路に対し、過渡状態の計算を行って、通弧発生後 $\frac{1}{3}$ サイクル経過した時点における電圧、電流の値を決定し、その後はこれらの値を初期値として、第8-9図の回路について計算を行うことにする。



第8-8図



第8-9図

さて、第8-8図および第8-9図の回路に対する回路方程式は既述のようにそれぞれ次式で与えられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned}
 L_0 P(I_G - i_G^{-0}) &= E_G - V_G - R_0 I_G \\
 L_0 P(I_W - i_W^{-0}) &= V_W - R_0 I_W \\
 C_p (V_G - V_G^{-0}) &= I_G - \frac{1}{2R} (V_G - V_W) \\
 C_p (V_W - V_W^{-0}) &= \frac{1}{2R} (V_G - V_W) - I_W
 \end{aligned} \right\} (8.6)$$

$$\left. \begin{aligned} Lp(I_G - i_G^{-0}) &= E_G - V_G - R_0' I_G \\ Lp(I_w - i_w^{-0}) &= V_w - E_w - R_0' I_w \\ Cp(V_G - U_G^{-0}) &= I_G - \frac{1}{2R}(V_G - V_w) \\ Cp(V_w - U_w^{-0}) &= \frac{1}{2R}(V_G - V_w) - I_w \end{aligned} \right\} \quad (8.7)$$

8.1 におけると全く同様にして、上の2式の演算器方程式は次のようになる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} P(I_{Gm} - i_{Gm}^{-0}) &= \left\{ \frac{1}{L_0(H)} \right\} \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_t \alpha_v} \right) E_{Gm} - \left\{ \frac{1}{L_0(H)} \right\} \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_t \alpha_v} \right) U_{Gm} \\ P(I_{wm} - i_{wm}^{-0}) &= \left\{ \frac{1}{L_0(H)} \right\} \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_t \alpha_v} \right) U_{wm} - \left\{ \frac{1}{L_0(H)} \right\} \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_t \alpha_v} \right) \cdot K \cdot E_{wm} \\ P(V_{Gm} - U_{Gm}^{-0}) &= \left\{ \frac{1}{C(MF)} \right\} \left(\frac{\alpha_v}{\alpha_t \alpha_i} \right) I_{Gm} \\ &\quad - \left\{ \frac{1}{2R(\Omega) \cdot C(MF)} \right\} \left(\frac{1}{\alpha_t} \right) (V_{Gm} - V_{wm}) \\ P(V_{wm} - U_{wm}^{-0}) &= \left\{ \frac{1}{2R(\Omega) \cdot C(MF)} \right\} \left(\frac{1}{\alpha_t} \right) (V_{Gm} - V_{wm}) \\ &\quad - \left\{ \frac{1}{C(MF)} \right\} \left(\frac{\alpha_v}{\alpha_t \alpha_i} \right) I_{wm} \end{aligned} \right\} \quad (8.8)$$

ただし \$K\$ は式(8.6)式の場合は0, 式(8.7)式の場合は1とする。

ここで

$$\alpha_v = 4 \times 10^{-6}, \quad \alpha_i = 4 \times 10^{-4}, \quad \alpha_t = 10^{-4} \quad (8.9)$$

とすれば、\$L_0 = 1H\$, \$C = 1MF\$, \$2R = 40\Omega\$ に対する演算回路はそれぞれが8-10図および8-11図のようになる。

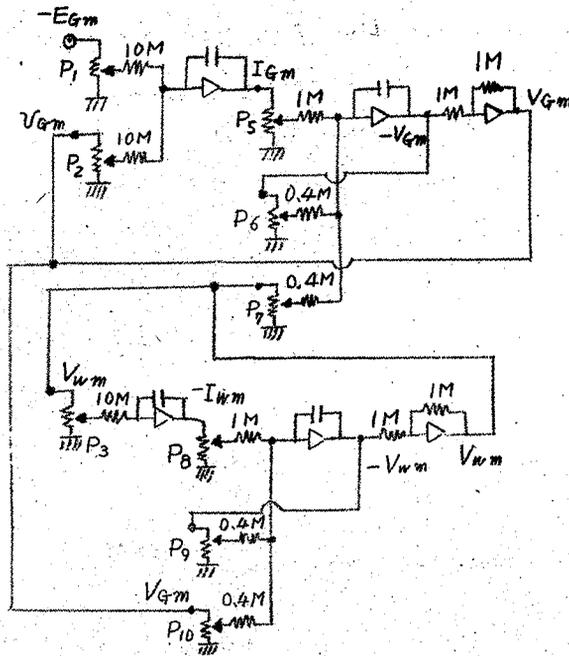
図中の各ポテンシオ・メータは、回路常数の値に応じ、それぞれ次のように設定する。

$$L_0 = 1H : C = 1MF : P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 0.1 \quad P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} = 1.0$$

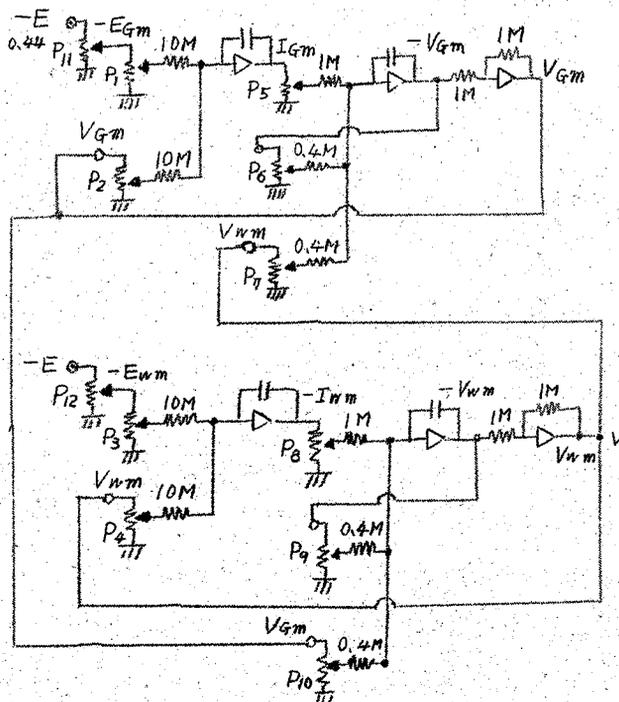
$$C = 5MF : P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 0.1 \quad P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} = 0.2$$

$$C = 10MF : P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 0.1 \quad P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} = 0.1$$

又 \$E_{Gm} = 0.44\$, \$E_{wm} = 0.4\$ であるから、\$P_{11} = 1.0\$, \$P_{12} = 0.909\$ とする。



为8-10图 { 为(8.6)式に対応 }



为8-11图 { 为(8.7)式に対応 }

b). 演算結果

図8-12はこの場合の演算結果を图示したもので、図から明かなように、 C の値が大きいほど直流電流 i_G の波高値は大となり、したがって通弧事故時における自然回復の可能性が低くなるが、 C の値が十分大

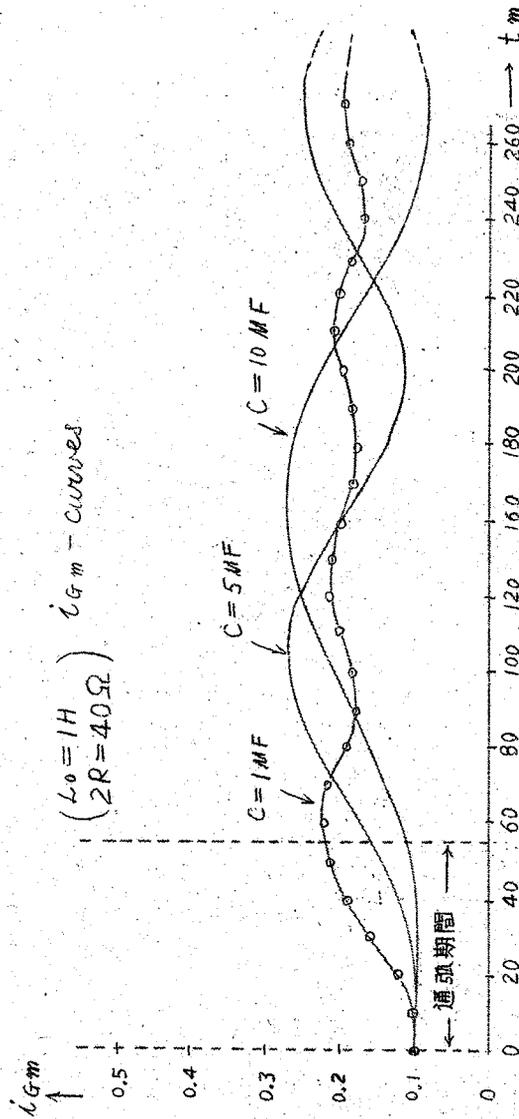


図8-12

きいところではあまり差異はみられない。尚これらの結果における波高値が、オ6章の計算結果よりいく分低くなっているのは、通弧状態解消後、直ちに受電端直流電圧 E_w が定常値に復するとしたためで、オ6章の計算例では通弧状態解消後、 E_w が完全に定常値に復帰するまで、尚 $1/6$ サイクルの期間を要している。

結 言

以上、直流送電系統ならびに三相他励式インバータ回路（逆変換装置）の解析結果について述べたが、こゝでは、これらの結果にもとづいて系統の設計ならびに運転技術上の観点から整理してみる。

(1) 直流送電線上の電流および電圧の脈動分について、
直流電流および直流電圧の脈動分は次の条件がみたされるほど小さい。

すなわち、

- (i) 直流電流の脈動分： $\left\{ \begin{array}{l} a) \text{ 直流送電線入出力端の平滑用コイル } L_0 \\ \text{の値が大きい。} \\ b) \text{ 順逆両変換装置の制御角が小さい。} \end{array} \right.$
- (ii) 直流電圧の脈動分： $\left\{ \begin{array}{l} a) \text{ 直流送電線入出力端の平滑用コイル } L_0 \\ \text{の値が大きい。} \\ b) \text{ 順逆両変換装置の制御角が小さい。} \\ c) \text{ 送電線の容量分 } 2C \text{ が大きい。} \end{array} \right.$

尚、直流電流の脈動分は送電線の容量分 $2C$ には影響されない。又送電線出力端における直流電流の脈動分は送電端における電源電圧の脈動分には殆ど影響されず、同様に、入力端における直流電流の脈動分は受電端における電源電圧の脈動分には殆ど影響されない。

(2) 逆変換装置放電管の転流失敗について、

逆変換装置放電管の転流失敗は重複角が制御角より大きくなった場合に発生するが、これを防止するには、系統の定常特性ならびに過渡特性を考慮して、一般に次の諸条件がみたされるべきである。

- (i) 逆変換装置転流変圧器のリーケージ・インダクタンスはできるだけ小さくし、少くともその電圧降下分が数%以下となるようにす

ること。

- (ii) 逆変換装置に対する無効電力供給の制限内で逆変換装置の制御角はできるだけ大きくすること。
- (iii) 転流変圧器逆変換装置側の交流電圧はできるだけ高くし、放電管の陽極電流を小さくすること。
- (iv) 送電線の抵抗分はゆるされる範囲内で大きい方がよい。
- (v) 送電線入出力端の平滑用コイル L_0 の値はできるだけ大きくし、少くとも数ヘンリーの値が必要である。

(3) 直流送電系統の送電電力制御方式について

送電電力を制御する場合、交流系統電圧の昇降により制御する方式と制御角の調整により制御する方式の2通りが考えられるが、前者の場合には送電端側で制御する方が有利であり、後者の場合には受電端で制御する方が有効である。

(4) 直流送電系統の起動について

直流送電系統の起動方式として次の2通りの場合、すなわち

- (i) 順変換装置のみを最初に投入し、その後、逆変換装置を投入する方式
- (ii) 送電線に初期電圧を与え、逆変換装置のみを最初に投入し、その後、順変換装置を投入する方式

が考えられるが、いずれの場合も系統全体を起動させるためには、両変換装置の投入を動作条件によって定まる一定の起動可能期間内で行はなければならない。この期間は一様に送電線入出力端の平滑用コイル L_0 および送電線容量分 $2C$ によって決定され、 $\beta_0 = 34^\circ$ に対しては $\frac{1}{3}\pi\sqrt{2L_0C}$ で与えられる。

尚起動開始直後直流送電線には印加直流電源電圧のほぼ倍電圧波高値をもつ振動電圧を発生し、又 L_0 の値が小さく、容量 $2C$ の値が大きい場合には起動開始直後の放電管陽極電流が大きくなるので、このような場合には印加直流電源電圧、したがって転流変圧器変換装置側からみた交

流電圧を起動時のみあらかじめ低下させておくことが必要である。

(5) 逆変換装置の通弧事故について

所謂転流失敗以外の原因により、逆変換装置が通弧事故を発生した場合次の条件がみたされる場合には、何等特別な制御装置を用いなくとも通弧事故は自然状態に回復する。すなわち

- (i) 通弧事故発生後も各放電管には定常時と全く同様の点弧パルスが印加されている。
- (ii) 通弧事故発生後、少くとも1サイクルの期間内では、直流電流の上昇が転流失敗を惹き起さない。
- (iii) 通弧事故により放電管が破壊されない。

このためには上述の(2)の諸条件がみたされねばならない。

尚自然回復後、直流送電線には、定常運転時の2倍の波高値をもつ、電圧振動が発生し、その振動周波数は $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$ で与えられる。

(6) 順変換装置の逆弧事故について

順変換装置放電管が逆弧した場合には、各放電管に非常に大きな短絡電流が流れるので逆弧事故は可及的に避けなければならない。尚その際の短絡電流の波高値は次の条件がみたされるほど小さくなる。すなわち

- (i) 順変換装置転流変圧器のリーケージインダクタンスが大きい。
- (ii) 順変換装置転流変圧器の変換装置側交流電圧が低い。
- (iii) 順変換装置の制御角が大きい。

これらの条件は転流失敗防止に対する逆変換装置側の条件と全く異なるので、もし、順変換装置の逆弧事故が不可避であるような場合には、順変換装置側の放電管接絡方式を逆変換装置側とは全く異ったものにするのが妥当ではないかと考えられる。

尚これらの結果はすべて直流送電線としてケーブルを使用した場合のみに注目したものであるが、直流送電線はその本質上、送電線にはケーブルを使用するか、あるいはケーブルと架空線を併用する場合が普通であり、後者の場合には、架空線のインダクタンス分および抵抗分を平滑

用コイル L_0 および R_0 中に含ませて考えれば以上の結果がそのまま適用できる。

本研究は林重憲教授御指導の下に行ったもので、終始懇切な御鞭撻を下さった同教授に対し、深甚なる感謝の意を表する次第である。また本研究に対し、種々御指示を下さった林千博教授、近藤文治教授、若林二郎講師にも深甚なる感謝の意を表する。

また本研究の遂行に対し、種々御教示、御協力も賜った電力網異常現象委員会の方々、卒業研究の学生諸氏ならびに本研究を行うに際し、終始御援助を下さった在日朝鮮人教育会、応用科学研究所、友人各位にも深甚なる感謝の意を表する。

附 録

(1) 才3章才(3.7)式中的各常数はそれぞれ次式で与えられる。

$$rA'_1 = A_1 \cos \theta r + B_1 \sin \theta r, \quad rB'_1 = B_1 \cos \theta r - A_1 \sin \theta r$$

$$rC'_1 = C_1 \cos \theta r + D_1 \sin \theta r, \quad rD'_1 = E_1 \cos \theta r + E_1 \sin \theta r$$

$$rA'_2 = A_2 \cos \theta r + B_2 \sin \theta r, \quad rB'_2 = B_2 \cos \theta r - A_2 \sin \theta r$$

$$rC'_2 = C_2 \cos \theta r + D_2 \sin \theta r, \quad rD'_2 = E_2 \cos \theta r + E_2 \sin \theta r$$

$$rI'_1 = I_1 \cos \theta r + J_1 \sin \theta r, \quad rJ'_1 = J_1 \cos \theta r - I_1 \sin \theta r, \quad rK'_1 = K_1 \cos \theta r + L_1 \sin \theta r$$

$$rI'_2 = I_2 \cos \theta r + J_2 \sin \theta r, \quad rJ'_2 = J_2 \cos \theta r - I_2 \sin \theta r, \quad rK'_2 = K_2 \cos \theta r + L_2 \sin \theta r$$

こゝに

$$A_1 = (-1) \cdot \omega \beta \left[\frac{4\beta\beta' + (\omega^2 - \alpha'^2)}{(\omega^2 - \alpha'^2)^2 + (2\beta'\omega)^2} \right], \quad B_1 = 2\beta \left[\frac{\omega^2\beta' - \beta(\omega^2 - \alpha'^2)}{(\omega^2 - \alpha'^2)^2 + (2\beta'\omega)^2} \right]$$

$$C_1 = (\omega\beta) \left[\frac{(2\beta - \beta' + \gamma')}{2\gamma' \{(\beta - \gamma')^2 + \omega^2\}} \right], \quad D_1 = (-1) \left(\frac{\beta' - \gamma'}{\omega} \right) \cdot C_1$$

$$E_1 = (-1)\omega\beta \left[\frac{(2\beta - \beta' - \gamma')}{2\gamma' \{(\beta + \gamma')^2 + \omega^2\}} \right], \quad F_1 = (-1) \left(\frac{\beta' + \gamma'}{\omega} \right) \cdot E_1$$

$$A_2 = (-1) \left[\frac{\alpha^2(2\beta'\omega)}{(\omega^2 - \alpha'^2)^2 + (2\beta'\omega)^2} \right], \quad B_2 = (-1) \left[\frac{\alpha^2(\omega^2 - \alpha'^2)}{(\omega^2 - \alpha'^2)^2 + (2\beta'\omega)^2} \right]$$

$$C_2 = \left[\frac{\alpha^2\omega}{2\gamma' \{(\beta' + \gamma')^2 + \omega^2\}} \right], \quad D_2 = (-1) \left(\frac{\beta' - \gamma'}{\omega} \right) \cdot C_2$$

$$E_2 = (-1) \left[\frac{\alpha^2\omega}{2\gamma' \{(\beta' + \gamma')^2 + \omega^2\}} \right], \quad F_2 = (-1) \left(\frac{\beta' + \gamma'}{\omega} \right) \cdot E_2$$

$$I_1 = \left[\frac{d\omega(\alpha^2 - \omega^2)}{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2\beta M\omega)^2} \right], \quad J_1 = \left[\frac{d\omega(2\beta M\omega)}{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2\beta M\omega)^2} \right]$$

$$K_1 = (-1) \left[\frac{\beta M\omega(\alpha^2 + \omega^2)}{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2\beta M\omega)^2} \right], \quad L_1 = \left[\frac{\alpha^2(\alpha^2 - \omega^2) + 2(\beta M\omega)^2}{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2\beta M\omega)^2} \right]$$

$$I_2 = (-1) \left[\frac{\alpha^2(2\beta M\omega)}{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2\beta M\omega)^2} \right], \quad J_2 = \left[\frac{\alpha^2(\alpha^2 - \omega^2)}{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2\beta M\omega)^2} \right]$$

$$K_2 = \left[\frac{\alpha^2\omega(\alpha^2 + \omega^2 - 2d^2)}{d \{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2\beta M\omega)^2\}} \right], \quad L_2 = (-1) \left[\frac{\alpha^2\beta M(\alpha^2 + \omega^2)}{d \{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2\beta M\omega)^2\}} \right]$$

(ii) 第5章第(5.7)式の各係数はそれぞれ次式で与えられる。

$$A_{I_1} = \left(1 - \frac{a}{\beta}\right) A_{I_2}, \quad B_{I_1} = \left\{ \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) + \frac{\delta^2}{(a-\gamma)\beta} \right\} B_{I_2}$$

$$A_{I_2} = \frac{\alpha^2}{(a-\gamma)^2 + \delta^2}, \quad B_{I_2} = \frac{\alpha^2(a-\gamma)}{\delta \{(a-\gamma)^2 + \delta^2\}}$$

$$A_G = \frac{\alpha^2(a-\beta)}{a \{(a-\gamma)^2 + \delta^2\}}, \quad B_G = B_W - A_{I_2}, \quad C_G = C_W + B_{I_2}$$

$$B_W = \frac{\alpha^2 \beta (2\delta - a)}{\{(a-\gamma)^2 + \delta^2\} (\delta^2 + \delta^2)}, \quad C_W = \frac{(-1) \alpha^2 \beta \{\delta(a-\gamma) + \delta^2\}}{\delta \{(a-\gamma)^2 + \delta^2\} (\delta^2 + \delta^2)}$$

$$1A_{II} = \frac{a(a-\beta)}{(a-\gamma)^2 + \delta^2}, \quad 2A_{II} = \frac{\delta^2(\beta - 2\gamma) - (a-\gamma)(\delta^2 + \delta\beta - \gamma^2)}{\delta \{(a-\gamma)^2 + \delta^2\}}$$

$$1A_{21} = -\left(\frac{a}{a-\beta}\right) 1A_{II}, \quad 2A_{12} = \frac{\beta \{\delta^2 - \gamma(a-\gamma)\}}{\delta \{(a-\gamma)^2 + \delta^2\}}$$

$$1A_{31} = -\left(\frac{\beta}{a}\right) 1A_{II}, \quad 2A_{31} = 2A_{41} + 2A_{21}$$

$$1A_{41} = \left[\frac{\beta^2}{a(a-\beta)} \right] 1A_{II}, \quad 2A_{41} = \left[\frac{\beta(a-\gamma)}{\delta^2 - \gamma(a-\gamma)} \right] 2A_{21}$$

$$1A_{13} = -1A_{23} + 1A_{I_1}, \quad 2A_{13} = -\left(\frac{\alpha^2}{a\beta}\right) 1A_{II} - 2A_{23}, \quad 3A_{13} = -\left(\frac{\alpha^2}{\beta^2}\right) 2A_{31} - 3A_{23}$$

$$1A_{33} = 1A_{23} + \left[\frac{\beta(a-\gamma)}{a(a-\beta)} \right] 1A_{II}, \quad 2A_{33} = 2A_{23} + \left[\frac{\beta(a-\gamma)}{a(a-\beta)} \right] 1A_{II},$$

$$3A_{33} = 3A_{23} + \frac{\beta \{\delta^2 + (a-\gamma)(\gamma-\delta)\}}{\delta \{(a-\gamma)^2 + \delta^2\}}, \quad 1A_{24} = -1A_{23} - A_{I_2}, \quad 2A_{24} = -2A_{23} + A_{I_2},$$

$$3A_{24} = -3A_{23} - B_{I_2}$$

参 考 文 献

- 1) 林 重憲；演算子法と過渡現象，国民科学社 昭和25年
- 2) K. Bawdisch; *Energieübertragung mit Gleichstrom hoher Spannung*, Springer Verlag 1950年
- 3) 林 重憲，服部嘉雄；オ一類断続回路における過渡現象の解析例，電気評論 39.1 昭和26年
- 4) 林 重憲，吉住永三郎；格子制御放電管式单相直列インバータ回路の解析的研究(I)，電気評論 39.9 昭和26年
- 5) R.E. Turkington; *Analysis of a 3-phase Inverter with Resistive Load*, A.I.E.E. 70, 1055 1951年
- 6) G.A. Korn & T.M. Korn; *Electronic Analog Computers*, Mc.Graw Hill co. 1st Ed. 1952年
- 7) 九州電力株式会社；屋久島電源開発資料 1.2.3.4 昭和28年
- 8) 直流送電専門委員会；高電圧直流送電資料集，電気協同研究 昭和29年
- 9) 直流送電専門委員会；高電圧直流送電外国文献集，電気協同研究，昭和29年
- 10) 林 重憲，若林二郎，成 圭永；三相インバータ回路の解析的研究 京大工研彙報 7 昭和29年
- 11) 林 重憲，若林二郎，成 圭永；三相インバータ回路の解析的研究(II)，京大工研彙報 9 昭和30年
- 12) 直流送電専門委員会；オ二次直流送電中間報告，電気協同研究 昭和30年
- 13) 林 重憲，若林二郎，成圭永；対称抵抗負荷に接続されたインバータ回路の解析的研究，電気学会誌 75, 737 昭和30年
- 14) 林 重憲，若林二郎，成圭永；対称誘導負荷に接続されたインバー

タ回路の解析的研究，電気学会誌 75. 1150

昭和30年

- 15) 三上一郎；直流送電(I)，電気学会誌 76. 989 昭和31年
- 16) S. Hayashi, J. Wakabayashi, K. Song ; *Analysis of Three phase Inverter Circuits with symmetrical Load*
E.T.J. 2. 50 1956年
- 17) 林 重憲，若林二郎，成 圭永；インバータ回路の起動時ならびに負荷変動時における過渡現象，電気学会誌 76. 919

昭和31年

- 18) 三上一郎；直流送電(II)，電気学会誌 76. 989 昭和31年
- 19) 三上一郎；直流送電(III)，電気学会誌 76. 1129 昭和31年
- 20) A. B. Posse ; *Commutation Processes in the Operation of a Three-phase Bridge Circuit during Transient phenomena*, *Direct current* 4. 19 1958年
- 21) 林 重憲，成 圭永；電気学会連合大会予稿集 昭和31年~34年

正 誤 表

頁		誤	正
25頁	才(3.2)式	$\begin{bmatrix} Lp+R'_0 & 1 \\ -1 & C_p \end{bmatrix} =$	$\begin{bmatrix} Lp+R'_0 & 1 \\ -1 & C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}_1I_2(p) \\ {}_1V_2(p) \end{bmatrix} =$
85頁	才6-3図	才6-3表	才6-3図
102頁	下から4行目	通弧事故時	通弧事故時