UDC 621.311.442.024.1.026.44: {621.3.014.7+621.3.064.1}

論文

48-B 43

大容量直流変電所の短絡電流とそのしゃ断方式

鉄道技術研究所 藤村敏郎

1. ま え が き

大都市通勤輸送区間における大容量直流変電所の近傍で短絡事故が発生した場合、短絡電流はきわめて大で、条件によってはこの電流をしゃ断すべき高速度しゃ断器のしゃ断容量を越える恐れがある。この多相整流回路としての直流変電所の短絡現象の計算法と低圧による試験結果については、すでに報告した。⁽¹⁾ここでは具体的な大容量変電所の短絡電流を明らかにするとともに、その対策としてのインダクタンスそう入による抑制しゃ断法について報告する。

2. 大容量直流変電所の短絡電流

直流変電所の短絡電流は整流器の交流側と直流側の回路定数が与えられれば求められる。交流側定数は交流受電点の短絡容量、整流器用変圧器の定数より容易に求められる。しかし直流側定数は実測によるほかは必ずしも容易には求められない。直流側定数は整流器直流側出力端子より母線、引出口を経て外線に出、トロリーへの第1き電分岐点に到る部分(帰回路を含む)のインピーダンス、すなわち、第1き電分岐インピーダンスともいうべきもので、その実測値は神田変電所におけるものが唯一のものである。(0.2mH, 5.5mΩ)⁽¹⁾この値はきわめて小さく、したがって、短絡電流の大きさは交流側定数に大きく支配され、またその初期立上り di/dt は直流側のインダクタンスに大きく支配され、ともに高速度しゃ断器によるしゃ断に大きな影響を与える。以下、この直流側定数の計算法と短絡電流の計算結果について述べる。

〈2-1〉第1き電分岐インピーダンスの計算 代

Short-circuit Current and its Interruption in Large Capacity DC Substation. By T. FUJIMURA, Member (Railway Technical Research Institute)

藤村敏郎：正員，鉄道技術研究所電力研究室

表的な大容量直流変電所の直流側インピーダンス、すなわち整流器→直流母線→第1き電分岐までのインピーダンス(引出口インピーダンス)の実測は、測定法そのものは簡単であるが、数箇所にもわたる営業線での実測は容易ではないので、導体の幾何学的配置を調査して計算することとした。すなわち、複数導体で構成されるこの回路の等価的なインダクタンスの計算法としては正負導体群の配置に応じ以下によった。

(1) 正、負母線～第1き電分岐間で平行と見なせる部分については往復導体とし(1)式によった。(付録参照)

$$L = \{0.4 \log(d/\sqrt{a_n b_m}) + 0.05(1/n + 1/m)\} \quad (\text{mH/km}) \dots \dots \dots (1)$$

(2) 前項において、正負導体の相対位置が直角、あるいは正または、負側の導体が単独に存在する場合は、単独導体のインダクタンスとして(2)式によった。(付録参照)

$$L = 2l \{ \log(2l/a_n) - 1 + 1/4n \} 10^{-4} (\text{mH}) \quad (2)$$

ただし、{ }内第3項は軌条の場合0とする。

(3) き電線と軌条が、通常の相対位置にある箇所は、単線区間で軌条の大地漏えいのない場合と見なせるので

$$L = 1.6 \text{ mH/km} \quad (50 \text{ Hz 計算値})^{(1)}$$

を用いた。

実地調査した配線状態は相当繁雑であるので、ここでは線条数、長さなどを要約した例を示すに止める。(第1図参照)またこれら導体の幾何学的配置から計算したインダクタンス値と、神田における測定値を第1表に示す。主器～母線間には正あるいは負側においても部分的には単独導体の並列回路と見なせること、同一ピット内往復導体のインダクタンスはほとんど無視できること、などの点を考慮して有効なインダクタンス

第 1 図 主器～第 1 き電分岐間の導体配置

Fig. 1. Arrangement of conductors between rectifiers and the first feeding point.

を形成する等価的な導体長さに対するインダクタンスは、1箇所を除きほぼ一定値で、平均値はこう長あたり

$$L_e = 2.1 \text{ mH/km} \quad (3)$$

となり、神田の測定値 2.2mH/km に近い値で、この点からも計算結果は実際の値に近いものと推定されるときに、配線の長さ丈からもだいたいのインダクタンス値の推定が可能と認められる。短絡電流の立上り初期を問題にする場合には、直流側インダクタンスは、0.1～0.2mH 程度を考慮すればよいであろう。

〈2・2〉大容量変電所の第 1 分岐(引出口) 短絡電流

大都市通勤区間の大容量変電所の代表的な箇所として、7箇所の短絡電流を計算した。すなわち、その交流側、直流側定数より、整流回路を理想的な直流電源と見なしたときの短絡電流、すなわち等価短絡電流 I_d を(4)式より求めた。⁽¹⁾

$$I_d = (1 - e^{-R_d'/L_d' \cdot t}) E_d / R_d \quad (4)$$

ただし、 $R_d' = R_d + R_i$, $L_d' = L_d + L_i$,
 R_d : 直流側抵抗, L_d : 直流側インダクタンス,
 R_i : 変電所整流回路の見かけ上の内部抵抗 = $0.955 X + 1.5 R_a$, L_i : 変電所整流回

第 2 図 直流変電所短絡電流計算例 (C 変電所)

Fig. 2. Example of calculated short-circuit currents.

第 1 表 第 1 き電分岐インダクタンス

Table 1. Inductances for first feeding points.

変電所	全長 l (m)	同左補正值 l' (m)	補正こう長 D (m)	L 計算値 (mH)	L/D (mH/km)
A	310	310	155	0.402	2.60
B	143	136	68	0.130	1.91
C	186	170	85	0.168	1.97
D	542	276	138	0.274	1.99
E	249	249	125	0.250	2.00
F	158	143	72	0.147	2.06
G	160	160	80	0.176	2.20
平均 2.1 mH/km					
神田	180	180	90	*0.2	2.2

注 * 印: 測定値

路の内部インダクタンス = $1.5 L_a$, X : 交流側リアクタンス, R_a : 交流側抵抗, L_a : 交流側インダクタンス

結果を第 2 表にまた三相整流回路過渡現象として計算機で計算した波形との比較例を第 2 図に示す。A 変電所を除き、いずれも直流側インダクタンスが小さいため di/dt が大であり、電流値も 10ms で 30kA 以上となる。第 1 き電分岐までの距離が異様に長い A 変電所を除き、 di/dt , 推定短絡電流ともにいわゆる標準条件 $3 \times 10^6 \text{ A/S}$, 50kA をこえている点、特に完全短絡定常電流の小さい F 変電所でもそうである点が注目される。

3. 短絡電流の抑制しや断法

前述のような初期立上りの大きい大電流を低減、あるいは抑制しや断する方法としては、たとえば下記の方法が考えられる。

- (1) 直流母線を分離する
- (2) 抵抗しや断用しや断器の直列設置
- (3) インダクタンスをそう入し、初期立上り

di/dt を抑制する

第 2 表 大容量変電所等価短絡電流 (第 1 分岐)

Table 2. Equivalent short-circuit currents of large capacity substations.

変電所	主器	R_i	R_d	L_d	R_d'	L_d'	di/dt	I_{10}	I_m	I_{ds}
	(MW)	(mΩ)	(mΩ)	(mH)	(mΩ)	(mH)	(10 ⁶ A/S)	(kA)	(kA)	(kA)
A	MR 3×3	15.7	6.82	0.402	22.5	0.465	3.49	27.6	72.1	170.8
B	MR 3×3	17.4	2.35	0.130	19.8	0.193	8.39	52.2	81.8	68.7
C	MR 3×3	12.7	3.13	0.168	15.8	0.217	7.47	52.7	102	88.2
D	MR 4×3	16.6	11.4	0.274	28.0	0.343	4.72	31.8	57.9	64.5
E	SR 4×3	15.7	4.51	0.250	20.2	0.329	4.92	36.9	80.3	56.6
F	SR 4×2	26.4	1.95	0.147	28.4	0.261	6.21	37.9	57.1	39.1
G	MR 3×3	15.3	2.71	0.176	18.0	0.239	6.78	47.6	90.0	70.3
神田	MR 3×3	22.2	5.50	0.20	27.7	0.288	5.63	36.2	58.5	50.0

注 I_{10} : 等価短絡電流の 10ms 時の値

I_m : 等価短絡電流定常値 (推定短絡電流)

I_{ds} : 完全短絡定常電流 (三相整流回路)

主器: 最大並列運転台数 (設備台数以下)

(1)の方法は、直流側同一母線につながる整流器の並列台数が減るため、簡単に短絡電流を低減できるので、実施可能な箇所ですでに実行に移されている。ただし整流器、直流母線、引出回線との相対位置の関係で、構造的に母線分離不可能な箇所が問題として残る。

(2)以下の方法はこれに対処するもので、並列抵抗をそなえ、かつ開極速度の早いしゃ断器を従来のしゃ断器と直列に新設する方法は二宮実験所での試験結果からは、短絡電流そのものの抑制はできないが、しゃ断時の限流値(実ししゃ断電流)、アークパワ、アークエネルギーの抑制に効果のあることが確認されたが、各回線に抵抗しゃ断用しゃ断器を設置するわずらわしさがある。

(3)の方法は、やはり短絡電流定常値の抑制は不可能であるが、しゃ断時の限流値に密接に関係する電流の初期立上り di/dt を抑制する効果がある。これにより限流値とアークパワが抑制される。

〈3.1〉インダクタンスそう入による大電流しゃ断現象への影響 インダクタンスを直流側にそう入したときのしゃ断現象への影響を見るため、前記各変電所に見かけ上の直流側インダクタンスが標準的な 0.5 mH になるように、新たにインダクタンスをそう入したときのしゃ断時アークエネルギー、アークパワを非そう入時と比較計算したものを第3表に、また計算波形例を第3図に示す。

なお計算条件は下記のとおりである。このうちアーク電圧上昇率 dV/dt はアークの駆動速度に関係し、駆動速度は自励の場合はほぼ電流に比例する。⁽²⁾ また、しゃ断器の構造によっても駆動速度は異なり、 dV/dt はしゃ断器固有のものであるが、開極電流にほぼ比例するとの前提⁽³⁾で二宮実験所での従来の試験結果(第

第3表 インダクタンスそう入時のしゃ断現象(計算値)

Table 3. Interrupting phenomena with additional inductance.

変電所	I_m (kA)	実ししゃ断電流				アークパワ				アークエネルギー			
		Lなし (kA)	Lあり (kA)	同比		Lなし (MW)	Lあり (MW)	同比		Lなし (WH)	Lあり (WH)	同比	
A	72.1	21.0	20.0	0.95	39	40	1.03	65	65	1.00			
B	81.8	39.0	21.5	0.55	68	44	0.61	70	72	1.03			
C	102	36.5	22.0	0.60	72	48	0.62	80	78	0.98			
D	57.9	24.0	19.5	0.81	42	36	0.62	54	58	1.07			
E	80.3	30.0	21.0	0.70	52	43	0.61	70	71	1.01			
F	57.1	27.5	19.0	0.69	46	36	0.62	55	58	1.05			
G	90.0	32.0	21.5	0.67	63	45	0.61	75	74	0.99			
神田	58.5	23.0	19.5	0.75	45	36	0.61	56	59	1.05			
0.5 mH 30 mΩ 1,620 V	54.0		19.4		—	35		—	56

第3図 インダクタンスそう入時の短絡電流(C変電所)

Fig. 3. Short-circuit current with additional inductance.

第4図 しゃ断時のアーク電圧上昇率

Fig. 4. Rate of rise of arc voltage at interruption.

4図参照)より下記によった。これは通常開極後の電流変化の余りない領域でアーク電圧が上昇する点より予想できることである。

(1) しゃ断器目盛 8,000 A

(2) しゃ断器選択率は次による。すなわち、 $\alpha \leq 10$ では 100%, $\alpha \geq 100$ では 50%, $100 > \alpha > 10$ では直線的に変化するものとする。

ただし、 $\alpha = R/L$, R, L はしゃ断すべき回路の抵抗とインダクタンス

(3) 開極遅れ 5 ms

(4) アーク電圧上昇率

$$dV/dt = 200 + 300 \times \text{開極時電流} / 20,000 \text{ kV/s}$$

.....(5)

(5) アーク電圧最大値 3,000 V

計算機による計算結果からは、インダクタンスそう入により条件が相当緩和され

(i) 限流値は大はばに減少する

(ii) アークパワは約 60% に減少する

(iii) アークエネルギーはほとんど変化しない

(iv) 標準条件 (0.5 mH, 30 mΩ) に対してはアークパワ、エネルギーとも上回る。(最大 40% 弱)

少ことが明らかとなった。限流値ならびにアークパワの抑制が、しゃ断をどの程度容易にするかは速断できないが、少くともインダクタンスそう入により条件が緩和されることは明らかであり、また過去の短絡発電機による交流等価試験時には、前記インダクタンスそう入時の計算値を上回るアークエネルギー、アークパワーでもしゃ断可能であった点より、インダクタンスそう入により大電流も現用しゃ断器でしゃ断可能であろう。また、試験設備上、現在のわが国ではインダクタンスが 0.5mH 程度であれば、推定短絡電流 50kA 以上の大電流領域の交流等価試験は容易であるので、この点からも直流側にインダクタンスをそう入する方法はしゃ断を容易にする実現可能かつ検証容易な方法と考えられる。なお 0.5mH より大はばに小さい試験についてはしゃ断器に並列に低インピーダンスを結ぶ交流等価試験法⁽⁴⁾があるが、電圧、周波数の点で制約を受けるおそれがある。

〈3・2〉可飽和インダクタンスそう入による大電流しゃ断現象への影響 可飽和インダクタンスをそう入したときのしゃ断現象を検討するには、その過渡特性を知る必要がある。大容量の実設備について求めるのは容易ではないので、順序として小形鉄心インダクタンスの $B-H$ 静特性、飽和領域の直流過渡電流特性の実験を行ない、 $B-H$ 静特性からの過渡現象計算結果と比較して計算法の実用性を確認し、これを順次大形のものに拡張することとした。すなわち小形鉄心コイルによる実験と計算の比較から、静的な飽和特性より折線近似での過渡電流計算の見通しが得られたので、比較的小容量（定格 1kA）の実設備（リアクトル）について試験、計算を行なった。そしてさらに大容量の計算を行なうこととした。

（1）リアクトルの飽和特性 供試リアクトル 2 個でブリッジ回路を形成し、直流（0～6,000 A）、交流 50 Hz（20～30 A）を重畳させて飽和特性を測定した。（付録Ⅲ 参照）第 5 図に結果を示す。

（2）リアクトル回路の直流過渡電流 前項のリアクトルを直流高圧（1,500 V）回路（不飽和インダクタンス 0.5mH を含む）にそう入し、推定短絡電流 4～50kA の範囲で直流過減電流の測定を行なうとともに、飽和特性からの計算値との比較を行なった。計算手順としては、

（i）インダクタンスは 200 A ほどの値を与え、その間は直線近似によった。

（ii）じゅうぶん小さな時間 ΔT に対する電流増加分を ΔI とすれば

$$E = L(I) \cdot \Delta I / \Delta T + RI$$

第 5 図 供試リアクトルの飽和特性

Fig. 5. Saturation curve of test reactor.

が成立するので、 ΔT を 0.1ms とし、 $I=0$ より計算を開始し

$$\Delta I = (E - RI) \Delta T / L(I)$$

$$I = I + \Delta I$$

として ΔT ごとの電流 I を求めた。ただし E , R は回路の電圧、抵抗、 $L(I)$ は可飽和インダクタンスと電源の不飽和インダクタンスの和で、電流の関数である。結果は

（a）推定短絡電流 11kA 程度までは不飽和領域、飽和領域を通じ、インダクタンスを測定値の 1.15 倍程度にすると、電流波形の測定値と計算値はよく一致する。これは最初実験を行なった小形鉄心コイルの場合と似た傾向である。

（b）前項の原因はインダクタンス測定値が直流に微小交流を重畳して測定した増分透磁率に相当するものであり、直流による磁化特性の傾斜より一般に小さいためと考えられる。

（c）飽和が大なるほど、上の現象は少なくなるので、大なる飽和領域を問題とするときは測定値をそのまま使用すべきであろう。すなわち、今回の実験に使用したリアクトル定格 1kA に対し推定短絡電流が相対的に非常に大きい 30kA、50kA の場合は測定値をそのまま用いたほうが電流波形はよく一致した。（第 6 図）

（3）可飽和インダクタンス回路のしゃ断現象 可飽和インダクタンスとしてのリアクトルそう入の効果確認のため、二宮実験所で可能な範囲の条件でしゃ断試験を行なった（第 7 図～第 9 図）要約すれば、

（i）リアクトルそう入により実しゃ断電流は小となる。

（ii）アークパワーは推定短絡電流が大なる領域で小となる。

（iii）アークエネルギーはやや増大するが、不飽和インダクタンス 1mH に比較すれば小さい。また推定

第 6 図 可飽和インダクタンス回路の直流過渡電流

Fig. 6. DC transient current in saturable inductance circuit.

第 7 図 可飽和インダクタンス回路のしゃ断現象 (その 1)

Fig. 7. Interrupting phenomena in saturable inductance circuit. (1)

短絡最大 (50kA) 条件では、インダクタンスによる差はほとんどない。

すなわち、可飽和インダクタンスそう入により、アークエネルギーはやや増大する場合があるが、実しゃ断電流とアークパワーの抑制効果があることが確認できた。そこで大容量変電所における効果を推定するには計算によるほかないので、上記実験結果と計算結果の比較を行ない、可飽和インダクタンス回路のしゃ断現象計算法の妥当性を確認することとする。計算上最も問題となるのはしゃ断器の開極時間を支配する選択率をどのように与えるかである。すなわち、選択率は回路定数により定まるが、その回路定数が飽和により変化することになるわけである。ここでは選択率は以下の方法で与えた。

(i) しゃ断器の目盛値と最終選択率の積に相当する電流値すなわち最小動作電流値に対応するインダクタンス L を求め $\alpha = R/L$ (R は回路抵抗) に対応す

第 8 図 可飽和インダクタンス回路のしゃ断現象 (その 2)

Fig. 8. Interrupting phenomena in saturable inductance circuit. (2)

第 9 図 可飽和インダクタンス回路のしゃ断現象 (その 3)

Fig. 9. Interrupting phenomena in saturable inductance circuit.

る選択率をこの回路条件での選択率とする。

(ii) したがって、求めた選択率に相当する電流値 (開極の基準点) に達したときの真の α は飽和により前項の値を上回ることがありうるがこれは無視する。

以上の方法による計算結果を第 10 図に波形例を第 11 図に示す。すなわち、実験値と多小の差はあるが、

第 10 図 可飽和インダクタンス回路のしゃ断現象計算

Fig. 10. Calculation of interrupting phenomena in saturable inductance circuit.

第 11 図 可飽和インダクタンスしゃ断
($0.7\text{mH} \times 2$, 11kA)

Fig. 11. Interruption with additional saturatable inductance.

電流波形, 実しゃ断電流, アークパワ, アークエネルギーなどは近似の結果が得られ, 可飽和インダクタンスそう入によりしゃ断が容易となるか否かの判断を下すうえには, この計算法でじゅうぶんと考えられる。

(4) 大容量設備に対する計算 しゃ断器の定格をこえる短絡電流が流れる箇所に可飽和インダクタンス, たとえばフィルタ用リアクトルをそう入したときの効果を計算する。一般に使用されているフィルタ用リアクトルの飽和特性は定格電流で 1.1mH 以上, 150% に対して 1mH 以上のほかは規定されていないので, 数種のものについての調査結果より最も飽和しやすいものと, 最も飽和し難いものの 2 例を用いることとした。(第 12 図参照) 計算条件としては, 下記によるほかはいままで述べた方法によった。

- (i) 不飽和時のインダクタンス値は 1.37 , 1.1 , 0.55mH の 3 種
- (ii) 変電所内部インダクタンスは 0.2mH , 同内部抵抗は 0.03Ω , 0.015Ω とする。
- (iii) 事故発生直前のしゃ断器電流, すなわち, 底

第 12 図 フィルタ用リアクトルの飽和特性
Fig. 12. Saturation curves of filter reactors.

第 13 図 フィルタ用リアクトルそう入時の
しゃ断現象 (その 1)

Fig. 13. Interrupting phenomena with additional filter reactor.

第 14 図 フィルタ用リアクトルそう入時の
しゃ断現象 (その 2)

Fig. 14. Interrupting phenomena with additional filter reactor.

負荷は 0A , $5,000\text{A}$, $10,000\text{A}$ とする。

計算結果の 1 部を第 13 図, 第 14 図に示す。また計算波形例を第 15 図に示す。要約すれば

第 15 図 可飽和インダクタンスそう入時の
しゃ断電流波形 (計算値)

Fig. 15. Calculated wave shapes of interrupting current with additional saturatable inductance.

(i) リアクトルそう入により実しゃ断電流(限流値), アークパワは非そう入時底負荷なしの場合の約40~80%に減少し, その効果はインダクタンス値の大なるほど大きい。

(ii) アークエネルギーはやや増大するが, 推定短絡電流が大なるときはわずかである。(最大 15% 増程度)

(iii) 標準的な 0.03Ω, 0.5mH (不飽和) 時に比較すればアークパワ, 実しゃ断電流, アークエネルギーとも増大するが, 0.55mH (可飽和) を除けば, 実しゃ断電流は仕様(25kA)以下であり, アークパワ, アークエネルギーも交流等価試験時の最大値を下回っているため, 現用しゃ断器でのしゃ断はじゅうぶん可能と考えられる。

(iv) 不飽和インダクタンスと比較すれば, アークパワ, アークエネルギーともやや大きい, そう入による効果はじゅうぶん大きい。ただし特に小なるインダクタンスをそう入するときは不飽和とし, 全直流インダクタンス値が 0.5mH 以上となるよう配慮したほうがよい。

4. むすび

以上, 大容量直流変電所の短絡電流を明らかにするとともに, その対策としては母線分離が望ましいがそれが不可能な場合にインダクタンスそう入による方法の検討を行なった。要約すれば次のとおりである。

(1) 短絡電流立上りを支配するものは, 変電所内部インダクタンスと変電所より第1き電分岐までのインダクタンスで, 後者は導体の幾何学的配置で計算できる。両者の合計は計算例では 0.17~0.47mH であった。

(2) 同様にして等価短絡電流は 60~100kA に達した。

(3) 初期立上り (di/dt) の大なる大電流のしゃ断では, インダクタンスそう入によりアークエネルギーはほとんど変化せず, アークパワ限流値(実しゃ断電流)が大はばに抑制される効果がある。

(4) そう入インダクタンスに可飽和のものを使用しても前項に近い効果がある。

いずれにしても大容量直流変電所の大なる短絡電流に対しては, まず母線分離をすべきであり, それが不可能である場合には上記のインダクタンスをそう入する方法によるのが適切であろう。

最後にこの研究に対し終始ご指導ご協力頂きました鉄道電化協会直流回路委員会 山村 昌委員長はじめ委員の方々に深謝致します。また, 各種実地試験には当

研究室 本多, 諏訪部, 古沢, 元当研究室 島田の諸氏の多大の助力を受けたのでここに謝意を表します。

(昭和 47 年 8 月 16 日受付, 同 48 年 2 月 6 日再受付)

文 献

- (1) 藤村: 電気学会論文誌 93-B, 256 (昭 48-6)
- (2) 福田: 電弧 225 (昭 23)
- (3) E. Grunefeld & H. Schulz: Siemens Zeitschrift 43, 2, 80 (1969)
- (4) 吉岡・斎藤: 昭 39 電気学会東京支部大会 165

付 録

I n 本と m 本 (それぞれ同一寸法) の導体よりなる往復回路のインダクタンス (付第 1 図参照)

半径 r , 導体間隔 D_{ij} の n 本の各導体に同一電流 I_0 が流れるとすれば, n 本の導体に蓄えられる電磁エネルギー W は次式で示される。

$$W = \frac{1}{2} I_0^2 \left(n L_0 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \right) \quad (i \neq j) \quad \dots\dots\dots (付 1)$$

ただし, L_0 (各導体の自己インダクタンス)

$$= 2(\log 1/r + 1/4) \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

M_{ij} (導体 i, j 間の相互インダクタンス)

$$= 2 \log 1/D_{ij} \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

n 本の導体を L_e なる自己インダクタンスを持つ往復導体の片側としての 1 本の導体 (等価導体) に置きかえれば

$$W = \frac{1}{2} L_e (n I_0)^2$$

$$\therefore L_e = \frac{2W}{n^2 I_0^2} = \frac{L_0}{n} + \frac{2}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \quad (付 2)$$

等価導体のインダクタンス L_e が (付 3) 式で表わされると仮定すれば, (付 2) 式より (付 4) 式が得られる。

$$L_e = 0.2(\log 1/a_n + K_n) \quad \text{mH/km} \dots\dots (付 3)$$

$$\log \frac{1}{a_n} + K_n = \frac{1}{n} \log \frac{1}{r} + \frac{1}{4n} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{2}{n^2} \log \frac{1}{D_{ij}}$$

$K_n = 1/4n$ とすれば

$$a_n = r^{1/n} (D_{12} \cdot D_{13} \cdot \dots \cdot D_{n-1} \cdot D_n)^{2/n^2}$$

付第 1 図 複数導体の等価インダクタンス
app. Fig. 1. Equivalent inductance of conductors.

($i \neq j$).....(付4)

ここに a_n を等価半径と名づける。したがって、 n 本導体、 m 本導体 (等価半径 b_m) よりなる往復回路 (間隔 d) のインダクタンスは

$$L = \{0.4 \log(d/\sqrt{a_n b_m}) + 0.05(1/n + 1/m)\} \\ (\text{mH/km}).....(\text{付5})$$

II l なる長さの n 本導体が単独に存在するときのインダクタンス この場合も、前項と同じ考え方で、(付1)式が成立する。ただし、この場合

$$L_0 = 2l \{\log 2l/r - 1 + 1/4\} \times 10^{-4} (\text{mH})$$

$$M_{ij} = 2l \{\log 2l/D_{ij} - 1\} \times 10^{-4} (\text{mH})$$

n 本の導体を L_e なる自己インダクタンスを持つ1本の単独導体 (等価導体) に置きかえれば、同様にして (付2) 式が成立する。そして L_e が (付6) 式で表わされると仮定すれば

$$L_e = 2l \{\log(2l/a_n) + J_n\} \times 10^{-4} \text{ mH (付6)}$$

$$\log \frac{2l}{a_n} + J_n = \frac{1}{n} \log \frac{2l}{r} - \frac{3}{4n} + \frac{2}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left\{ \log \frac{2l}{D_{ij}} - 1 \right\} \\ = \frac{1}{n} \log \frac{2l}{r} + \frac{2}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \log \frac{2l}{D_{ij}} - 1 + \frac{1}{4n}$$

となり、 $J_n = -1 + 1/4n$ と置くことにより、 a_n が同様に (付4) 式で与えられ、したがって、 n 本導体が

付第2図 リアクトル飽和特性測定回路
app. Fig. 2. Measuring circuit of saturation curve of reactor.

単独に存在するときのインダクタンスは

$$L = 2l \{\log(2l/a_n) - 1 + 1/4n\} \times 10^{-4} (\text{mH}) \\(\text{付7})$$

前項とともに n 本が並列となったことにより、内部インダクタンスが $1/n$ になったと見なせる。

III 可飽和リアクトル飽和特性の測定 付第2図に示すように、A、B 2箇のリアクトルと抵抗でブリッジを形成し、各直流電流に対し直流バランスをとり、これに交流を重畳させ、リアクトル端子電圧 (実効値) を測定した。なお、直流電流には高調波が含まれているので、重畳時の端子電圧 V_s 、直流のみ流したときの高調波による端子電圧 V_H より $V = \sqrt{V_s^2 - V_H^2}$ として真値を求めた。