

発電所主幹ケーブルの配列における諸問題

橋 本 博 治*

Several Problems in Arrangement of the Main Cables in Power Stations

By Hiroji Hashimoto

Hitachi Electric Wire and Cable Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

There are many cases where the main cables in power stations are installed with many cables in parallel. In these cases the effective current capacity is influenced by the lay out method, especially by the grouping arrangement method. In this report the writer has mainly taken up the nine cable lay out as an example and listed the problems that determine the grouping arrangement, and also has given measures to counter these problems.

The cable impedance under the lay out grouping arrangement conditions can be obtained by approximate calculation and the results are completely satisfying for practical use. Obtaining the cable current under the lay out arrangement conditions is also a necessary technical knowhow. For this purpose a flexible current transformer was used. Moreover two or three more actual examples were taken up to obtain the relation between the grouping arrangement method and the current unbalance factor. However, from these examples the conclusion was derived that this value varies greatly according to what grouping arrangement method is used. Among the various nine cable lay out arrangements, the 3 triangle-3 group-center group double-transposed method was found to be the best.

Moreover, when actually arranging the grouping of the cables, the difference in the heat radiation impedance of cables due to the arrangement method must be taken into consideration. This aspect has been made clear in the case of an actual example of the 3-step, 3-row method.

〔I〕 緒 言

発電所の主発電機と主変圧器の連絡には、ケーブルあるいは絶縁ブスバーが使用されている。これらのいずれが使用される場合にも電流容量が問題となり、最近発電機単位出力の増大に伴い、電流容量の大きな大寸法のを数条並列に使用する場合が多くなってきた。ケーブルあるいはブスバーの選択は発電所の構成、とくに発電機と変圧器の相関位置に関係し、保守上特に安全性に問題がなければ、コストの安い後者を使用するのが

よい。しかしながら発電所全体の計画の面から考えるならば、ケーブルを使用する方が都合の良い場合もある。すなわちケーブルの採用によつて変圧器の位置あるいはケーブル引入れ用ダクト通路を自由に選択することができる結果、発電所全体の計画が非常に容易となる。

以上の利点に対しケーブルを使用する場合にはコストが割高となるので、できるだけコスト高を軽減するように考えること、すなわちケーブルの実効電流容量を大きくとりうるよう考えることが必要である。とくに電流容量の点で数条並列に布設される場合には、各ケーブル間の電流不平衡の問題、多条布設による電流容量低減の問

* 日立製作所日立電線工場

題が生じ、これらの点を考慮して導体サイズの決定、あるいは布設方法の決定を行う必要がある。すなわち経済的な点からはできるだけ小サイズのケーブルを使用する方が得策であるが、反面ケーブルを過熱させ事故の原因となる機会も多くなる。したがってケーブルの導体サイズを決定する場合には、送電流およびケーブルの安全電流を考慮して決めるが、ケーブルの安全電流は布設方式によつて非常に変わり、とくにケーブルが数条並列に接続されるときは前述のような問題が生ずる。

多条布設されたケーブルにおける電流配分の理論的な検討および九州電力築上発電所の布設例についてはすでに詳細に報告^{(1)~(4)}したが、本報告では実際の布設を行うに当り、必要となるようなケーブルインピーダンス計算方法、電流の測定法および二、三の例における電流配分とケーブル温度上昇などの一連の技術的問題について実例を引用して検討を加えたいと考える次第である。

〔II〕 配列決定法

ケーブルの布設に当つて配列方式を決定する場合にはもつとも電流不平衡の少い配列方式を採用することが勿論必要であるが、実際に布設された状態の電流配分状況を知つておくことは本題におけるもつとも重要な点である。

任意に配列されたケーブルのインピーダンス計算方法に関しては、C.F. Wagner⁽⁵⁾が偶数条布設の場合を検討し、計算式を提出している。しかしながらこの方法は、たとえば9条布設のような奇数条布設に対しては適用できない。

奇数条の任意に配列された場合には計算が非常に困難となり、数学的に完全な解をうることはむずかしい。このような場合には近似的な手法を用いる以外には実際的な手段は見当らなく、また実用的には十分満足される方法であることはすでに筆者らが報告⁽¹⁾した通りである。この近似計算法の要点のみを述べればつぎの通りである。すなわち各ケーブルに均等に平衡三相電流が流れたものとしてインダクタンスは(1)式であらわされる。

$$L_{u1} = \left[\frac{1}{2} + \log \left(\frac{l_{v1} \cdot l_{v2} \cdot l_{v3} \dots \cdot l_{w1} \cdot l_{w2} \cdot l_{w3} \dots}{r^2 \cdot l_{u2}^2 \cdot l_{u3}^2 \dots} \right) + j\sqrt{3} \log \left(\frac{l_{v1} \cdot l_{v2} \cdot l_{v3} \dots}{l_{w1} \cdot l_{w2} \cdot l_{w3} \dots} \right) \right] \times 10^{-7} \dots (1)$$

- たゞし r : ケーブル導体半径
- L_{u1} : u 相 No. 1 ケーブルインダクタンス
- l_u : u_1 ケーブルと u 相の他のケーブルとの線間距離
- l_v : u_1 ケーブルと v 相ケーブルとの線間距離
- l_w : u_1 ケーブルと w 相ケーブルとの線間距離

各ケーブルについて同様の計算を行つてのち、ケーブルのインピーダンスを求める。つぎに各ケーブルのインピーダンスよりケーブル電流を求めることができる。

以上が第1次の近似計算であり、さらに正確に求めようとする場合には、各ケーブルに第1次の計算によつてえた電流が流れた場合の見かけ上のインダクタンスを(2)式によつて求める。

$$L'_{u1} = \left[\frac{1}{2} + \log \left(\frac{l_{v1}^{\alpha v1} \cdot l_{v2}^{\alpha v2} \cdot l_{v3}^{\alpha v3} \dots \cdot l_{w1}^{\alpha w1} \cdot l_{w2}^{\alpha w2} \cdot l_{w3}^{\alpha w3} \dots}{r^2 \cdot l_{u2}^{2\alpha 2} \cdot l_{u3}^{2\alpha 3} \dots} \right) + j\sqrt{3} \log \left(\frac{l_{v1}^{\alpha v1} \cdot l_{v2}^{\alpha v2} \cdot l_{v3}^{\alpha v3} \dots}{l_{w1}^{\alpha w1} \cdot l_{w2}^{\alpha w2} \cdot l_{w3}^{\alpha w3} \dots} \right) \right] \times 10^{-7} \dots (2)$$

たゞし $\alpha u2, \alpha u3, \dots, \alpha v1, \alpha v2, \dots, \alpha w1, \alpha w2, \dots$ は u_1 ケーブル電流と他のケーブル電流の比である。

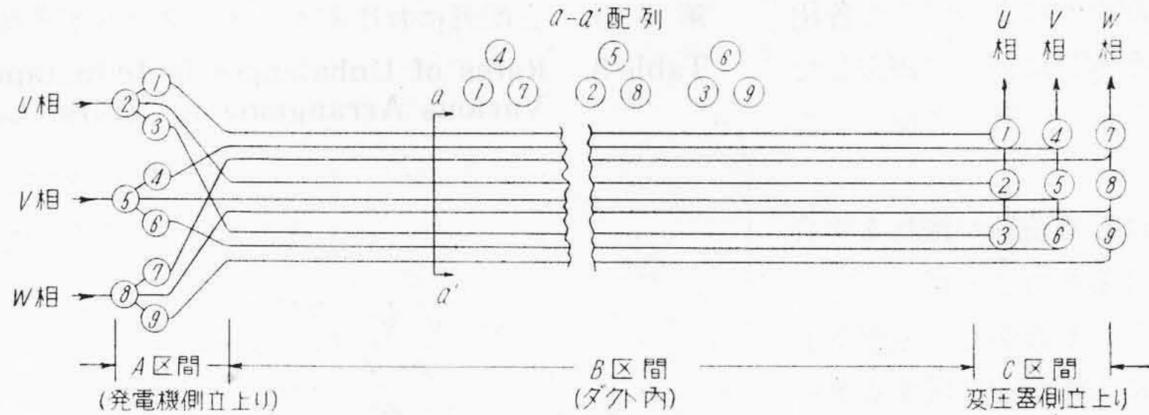
(2) 式の計算を各ケーブルについて行い、第1次の計算と同様にして第2次の計算も達成される。

実際には布設されたケーブル全長について同一の配列方法を採用することはほとんど不可能であるので、ケーブルのインピーダンス計算においてはさらに具体的な方法が必要である。

並列に布設された同相のケーブルは両端で短絡する必要があるので、端末の配列を途中の配列と同一にすることは実際的には不可能である。さらに端末では同相のケーブルを一つの群としてまとめるので、この部分の単位長さ当りのインピーダンスは、各ケーブルが近接して布設され、かつ三相のケーブルを各一条ずつ一つの群にとりまとめるような配列を行うことのできるダクト内のインピーダンスに比して比較的大きい。

それゆえに両端末配列のケーブルインピーダンスを無視することができない。たとえば第1図のようなケーブル系統において、 A, B および C 区間の単位長さ当りのインダクタンスは第1表の通りとなり、 A および C 区間のインダクタンスは B 区間における値の約4倍および3倍の大きさである。両端配列区間の長さが B 区間の $1/4$ としても同程度のインピーダンスとなるので、これを無視できない。

また逆に考えればダクト内のインピーダンス不平衡を両端末の同相のケーブル位置を適当に調整することによつて補償することも可能となる。それゆえに実際の計算では、配列の異なる箇々の区間についてインピーダンスを求め、これらを集計した全体のインピーダンスについて比較する必要がある、この方法を前述の第1次および第2次の計算について行えばよい。これまでの二、三の検討例では第1次の計算のみでも十分満足のいく結果をえている。



第1図 ケーブル系統図 (9条布設の一例)

Fig.1. Diagram of Cable Circuit (An Example of Nine Cables)

第1表 各区間の単位長当りインダクタンス
($\times 10^{-7}$ h/m)
(第1図の例, $1,000 \text{ mm}^2$ 単心ケーブル)

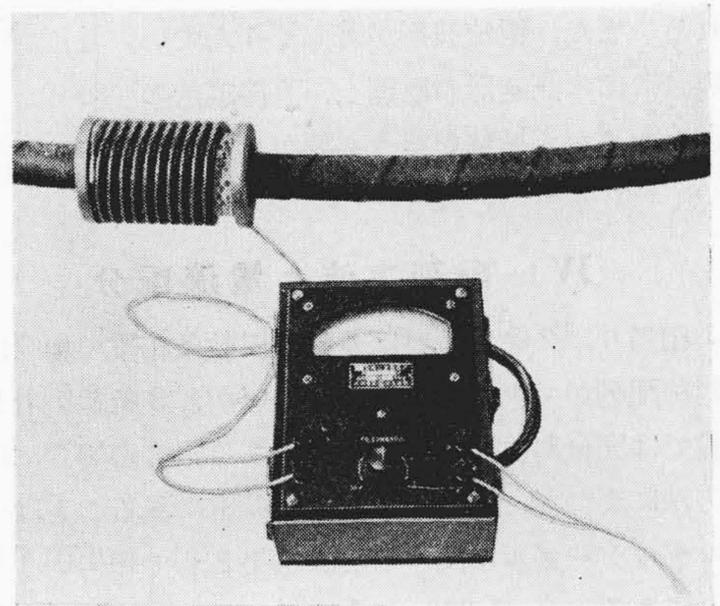
Table 1. Inductances of Unit Length of Cable in Each Section ($\times 10^{-7}$ h/mm²) (at Fig.1, $1,000 \text{ mm}^2$ Single Core Cable)

ケーブル番号	A 区 間	B 区 間	C 区 間	
U 相	1	14.67-j3.23	3.69-j0.18	9.36-j2.69
	2	14.12-j3.45	3.30+j0.08	10.37-j3.06
	3	14.03-j3.94	2.92+j0.28	9.36-j2.69
V 相	4	12.61+j1.41	3.33+j0.43	7.80
	5	12.12	3.31	8.37
	6	12.61-j1.41	3.33-i0.43	7.80
W 相	7	14.03+j3.94	2.92-j0.28	9.36+j2.69
	8	14.12+j3.45	3.30-j0.08	10.37+j3.06
	9	14.67+j3.23	3.69+j0.18	9.36+j2.69

〔III〕 ケーブル電流測定法

布設されたケーブルの実際に流れている電流を正確に測定することは、ケーブルインピーダンスの計算法とともにこの種ケーブルの布設において必要かくべからざることである。既設のケーブル系統では並列に接続された各ケーブルごとに電流測定用の電流変成器 (以下 CT と略す) を接続することはほとんど行われておらず、同相のケーブル電流を一括したもので各相の全電流を測定できるように CT を接続しているにすぎない。

このような状態では箇々のケーブル電流を測定するために CT を接続することは実際的に不可能であるので、ケーブル回路を変更することなく、箇々の電流を測定するためにはいわゆる組立式の CT を使用する必要がある。これはケーブル鉛被上に鉄心の閉回路をつくり、これに2次コイルを巻いて2次コイル電流を測定してケーブル電流を算出する方法である。この方法について種々の検討を行つた結果、被測定電流以外の大電流が近くに流れているときは、この影響をうけるために正確な測定は根本的に不可能なことがあきらかとなつた。この対策として考えられたのがすでに報告した可撓トロイダルコ



第2図 可撓 CT および電圧計

Fig.2. Flexible Current Transformer and Voltmeter

第2表 可撓 CT によるケーブル電流測定例
Table 2. Measuring Example of Cable Current by Flexible Current Transformer

ケーブル番号	可撓 CT 誘起電圧 (V)	ケーブル電流 (A)	相電流 (左欄の小計) (A)	相電流 (配電盤の計器) (A)	
U 相	1	0.775	850	2,620	2,610
	2	0.780	855		
	3	0.835	915		
V 相	4	0.800	875	2,620	2,630
	5	0.790	865		
	6	0.805	880		
W 相	7	0.800	875	2,575	2,630
	8	0.800	875		
	9	0.755	825		

イル (可撓 CT)⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ である。本測定器の原理および特性については重複の説明を避けるが、一様な媒質中にあるトロイダルコイルに誘起する電圧はコイルを貫通する電流の時間的変化のみによつて決定されるという一般的な原理を応用したもので、これを実用に供しうるような測定器としたものである。

第2図にその使用状況を示す。

本測定器の現場使用結果は第2表の通りで表からあき

らかなように、本測定器によつてえた各相の全電流と同時に配電盤において測定した各相の全電流はほとんど一致して正しいことを示している。

なお、本測定器は鉛被電流が流れる場合にはこの影響をうけるのでこの点については注意を要する。しかしながら、発電所主幹ケーブルのように大電流を送電するケーブルでは一端接地、他端絶縁方式をとるのが普通であるので實際上、上記の問題が生ずるような場合はほとんどないものと考えられる。また、電流波形が著しく歪んでいる場合には本測定器の原理上、直接誤差の原因となるから補整を行う必要がある。

第3表 各配列におけるインダクタンス不平衡率 (第1次計算)
Table 3. Rates of Unbalances in Inductances of Cables at Various Arrangements (First Calculation)

ケーブル配列法	ケーブルインダクタンス不平衡率 (%)								
	U ₁	U ₂	U ₃	V ₄	V ₅	V ₆	W ₇	W ₈	W ₉
(A)	+29.8	-3.3	-26.5	+0.4	-0.8	+0.8	-26.5	-3.3	+29.8
(B)	+8.9	-2.1	-11.1	+0.3	-0.6	+0.3	-11.1	+2.1	+8.9
(C)	+6.7	+7.8	-13.8	-3.15	+6.3	-3.15	-13.8	+7.8	+6.0
(D)	+55.0	-3.3	-52.7	+4.5	-9.0	+4.5	-54.3	-8.7	+63.0
(E)	-2.8	+5.6	-2.8	-3.1	+6.3	-3.1	-2.8	+5.6	-2.8

* 矢E011/20?回換架

〔IV〕 配列方法と電流配分

1相当り、2条あるいは4条の偶数条布設の場合は完全対称配列ができるので問題はないが、3条並列計9条布設では完全対称配列が不可能である。この場合には配列方法によつて、電流不平衡率が非常に異なることはすでにモデルケーブルに関する実験結果として報告⁽¹⁾⁽²⁾した通りである。今、1,000 mm²の単心ケーブル9条布設の場合、種々の配列におけるインダクタンス不平衡率の第1次計算結果を示すと第3表の通りで、これは相隣れるケーブル中心間の距離をすべて100 mmとした場合である。表からあきらかなように配列のいかんによつては非常に大きな不平衡となることが示されている。

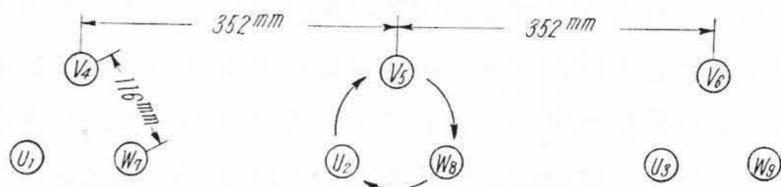
前報の結果ではBおよびEの配列方法がもつとも不平衡率が少いことを示し、また第3表からもあきらかであるが、同じ型の配列方法でもケーブル線間距離によつて不平衡率が変わることは(1)式あるいは(2)式からもあきらかである。たとえばAのような配列においても各群内のケーブル線間距離を小さくし、各群間の距離を大きくすれば当然不平衡率は小さくなる筈である。第1図B区間の配列において、各群間の距離を同一とし、各群のケーブル相互の間の距離を変化したときのU相ケーブル単位長当りのインダクタンス不平衡率の変化を示すと第4表の通りである。すなわち、線間距離を小さくすればそれだけ不平衡率は小さくなる。しかしながら線間距離を小さくすれば熱放散が悪くなり、同一電流による温度上昇が大きくなるから、その線間距離はできるだけ大きい方がよく、線間距離を小さくすることなしに電流不平衡率を減少できればもつともよいことになる。

実際に布設されたケーブルの配列方法と電流不平衡率実測結果との二、三の例を示すと、第3図、第4図および第5表、第6表の通りである。第3図および第5表は

第4表 線間距離とインダクタンス不平衡率 (%) との関係
(第1図B区間 1,000 mm² 単心ケーブル, 群間距離 500 mm)

Table 4. Relation between Distance of Cable and Rates of Inductance Unbalances (%) (on B-Section Fig.1. Distance between Groups, 500 mm)

ケーブル番号	線間距離 (mm)					
	200	150	100	85	60	
U相	1	+17.5	+16.1	+12.3	+11.4	+10.3
	2	-1.0	-0.9	0	0	0
	3	-16.5	-15.2	-12.3	-11.4	-10.3



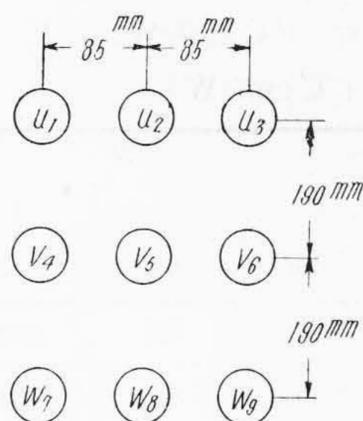
第3図 ケーブル配列, A例
Fig. 3. Arrangement of Nine Cables Example-A

第5表 ケーブル電流不平衡率 (第3図A配列例)

Table 5. Rates of Unbalance of Cable Current (Fig. 3. Example-A)

ケーブル番号	不平衡率 (%)	ケーブル番号	不平衡率 (%)	ケーブル番号	不平衡率 (%)			
U相	1	-2.90	V相	4	-0.20	W相	7	+1.83
	2	-2.40		5	-0.80		8	+1.83
	3	+5.30		6	+1.00		9	-3.66

15 kV 850 mm² 分割導体を使用しており、電流不平衡率少く、非常によい例である。第4図および第6表は 3kV 764 mm² ケーブルを使用しているが、この例では電流不



第4図 ケーブル配列, B例
Fig. 4. Arrangement of Nine Cables Example-B

第6表 ケーブル電流不平衡率 (第4図 B-配列例)

Table 6. Rates of Unbalance of Cable Current (Fig. 4. Example-B)

ケーブル番号	不平衡率 (%)	ケーブル番号	不平衡率 (%)	ケーブル番号	不平衡率 (%)
U相	1 +19.5	V相	4 +15.8	W相	7 +8.1
	2 -18.7		5 -21.0		8 -19.3
	3 -0.90		6 +5.20		9 +11.3

平衡率が約 20% にも達し, 前者に比して非常に大きく, 悪い例である。第4図の配列の場合では両端ケーブルヘッドの配列が悪いので立上り部のインダクタンス不平衡が非常に大きく, これがダクト内ケーブルのインダクタンス不平衡に相加わるような配列となっており, さらにケーブルは各相が一つの群をなしているの非常に漏洩磁束が大きく, クリート支持鉄製金具のためにインダクタンスが影響されたためであると考えられる。

〔V〕電流不平衡と温度上昇

本問題の最終的な目的はケーブル温度上昇を全体として均一にし, ケーブル系統としての実効電流容量を増加

することにある。それゆえに実際的な立場に立つて, 温度上昇を検討する必要がある。一般にケーブルの温度上昇は他の条件が同一ならば電流の2乗に比例し, 電流の不平衡が直接温度上昇の差に影響する。前項までにのべてきた電流不平衡軽減対策の目的も実に電流容量の増加とともにこの点にあるわけである。しかしながら多条数密接して布設された場合には各ケーブルの見掛け上の放熱抵抗の間には, その位置によつて大きな差があるため, もし電流が均一に流れたとしても温度上昇は均一とはならない。この配列法と熱抵抗の差についての十分な系統の実験データは発表されていないようで, いくらか関係していると思われる報告⁽⁷⁾がわずかにみられるだけである。筆者もまたこれに関するデータを十分に揃えてはいないが二, 三の実測結果をえている。

第4図の例におけるケーブル電流と温度上昇との関係については第7表に示すような実測結果をえているが, この表では電流不平衡率と温度上昇不平衡率との間には大体において2乗比例の関係がみられ, ケーブル系統としての実効電流容量は最高温度のケーブルによつて決定されるので, 電流不平衡がいかに大きな意味をもつかあきらかである。また, 第7表のデータから各ケーブルの見かけ上の熱抵抗すなわちダクト内気温あるいは室温とケーブル表面温度から計算される値を示すと第8表(次頁参照)の通りである。表中の発電機側はケーブルが垂直に立上っている箇所であるが, このようなところでは熱抵抗の差が割合に少い。ダクト内では熱抵抗の差が非常に大きく, この関係を図示すると第5図(次頁参照)の通りとなる。3段3列に配列された場合, 中央列のケーブルがもつとも大きく, 中段, 上段, 下段の順となっている。また, ダクトの上部蓋を開放した場合と密閉した場合とではいくらか変わるけれども, その相関関係はほとんど同じである。

第7表 鉛被温度および計算導体温度上昇 (第4図 B-配列例)

Table 7. Temperatures of Lead Sheaths and Calculated Temperature Rises of Conductors (Fig. 4, Example-B)

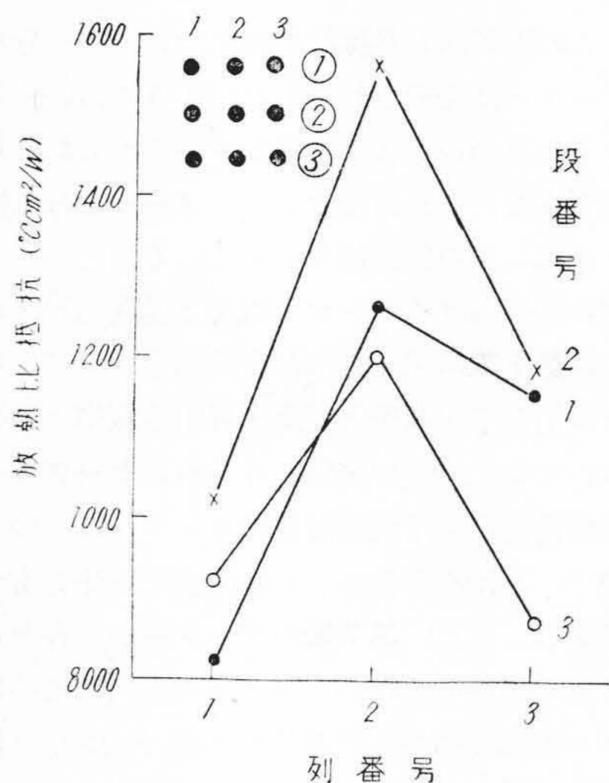
ケーブル番号	鉛被温度 (°C)			導体温度上昇 (計算値) (°C)			ケーブル電流 (A)	
	発電機側	ダクト内蓋なし	ダクト内蓋あり	発電機側	ダクト内蓋なし	ダクト内蓋あり		
U相	1	37.1	37.8	53.9	24.5	26.8	30.6	1,025
	2	29.1	32.6	45.2	11.7	16.8	17.1	698
	3	31.6	36.9	49.7	16.2	23.1	23.6	850
V相	4	37.4	41.1	52.8	24.4	29.7	29.1	1,000
	5	28.5	35.2	47.3	10.9	19.2	19.0	682
	6	34.9	40.1	50.9	20.4	27.2	25.7	907
W相	7	33.3	36.8	43.6	19.8	24.9	19.4	942
	8	30.0	32.2	40.9	12.7	16.6	12.9	702
	9	37.7	36.7	45.5	14.2	24.8	21.3	968

(注) 大気温度: 発電機側 21.5°C, ダクト内(蓋なし) 19.9°C, ダクト内(蓋あり) 32.2°C

第8表 ケーブル表面放熱比抵抗 ($^{\circ}\text{C cm}^2/\text{W}$)

Table 8. Thermal Resistivities at Cable Surface ($^{\circ}\text{C cm}^2/\text{W}$)

測定箇所	U 相			V 相			W 相		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
発電機側	718	752	691	771	728	791	698	839	836
ダクト内 (蓋なし)	823	1,270	1,161	1,026	1,565	1,181	919	1,208	871
ダクト内 (蓋あり)	998	1,300	1,195	996	1,573	1,106	623	861	686



第5図 ケーブル位置と放熱比抵抗の関係 (ダクト内蓋なし)

Fig. 5. Relation between Cable Positions and Their Thermal Resistivities at Cable Surface (In Duct, No Cover)

各ケーブルの温度上昇を均一にするためには、これらの熱抵抗の差を補償するような不平衡電流が流れれば都合がよい。これは温度上昇のあまり問題にならない両端ケーブルヘッド立上り部分の配列を適当に調整することによつてある程度実現される。

[VI] 結 言

以上発電所主幹ケーブルの配列を決定する場合の実際的な問題について検討を加えたが、本問題は各方面でと

りあげられてきたケーブルの合理的運用という観点からみれば非常に大きな問題であり、この目的に対しては未だ十分とはいえないが、一応の手段が確立されたものと考えられる。今後に残された問題としては多条敷布された場合の各ケーブルの実効熱抵抗におよぼす配列の形、線間距離の影響をさらに具体的に検討する必要があると痛感され、またケーブルの強制通風による冷却の問題も効果があると考えられるが、一応問題を別にして検討を進めているので稿を改めて報告したいと考えている。

終りに本問題に対して大きな関心をよせられ種々の貴重なる御意見を賜つた九州電力田中氏ほか関係者および測定に当り御便宜を計つて戴いた東北電力宮下氏に対し厚く御礼申上げる次第である。また本研究に対し種々御指導を仰いだ東北大学鳥山教授、日立製作所日立工場後藤部長、日立研究所橋本主任研究員および日立電線工場内藤部長には本稿をかり、改めて感謝申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 橋本, 加子: 日立評論別冊 No. 4 123(昭 28-10)
- (2) 田中, 石橋, 橋本, 加子: 電気学会連大 371 (昭 29-5)
- (3) 田中, 石橋, 橋本, 橋本清, 加子: 日立評論 36 1163 (昭 29-7)
- (4) 田中, 石橋, 橋本: 電気学会東京支大 400 (昭 29-10)
- (5) 橋本, 小林: 電気学会東京支大 405 (昭 29-10)
- (6) W. Richter: Trans AIEE 63 39 (1944)
- (7) N.P. Bailey: Trans AIEE 48 152 (1929)

