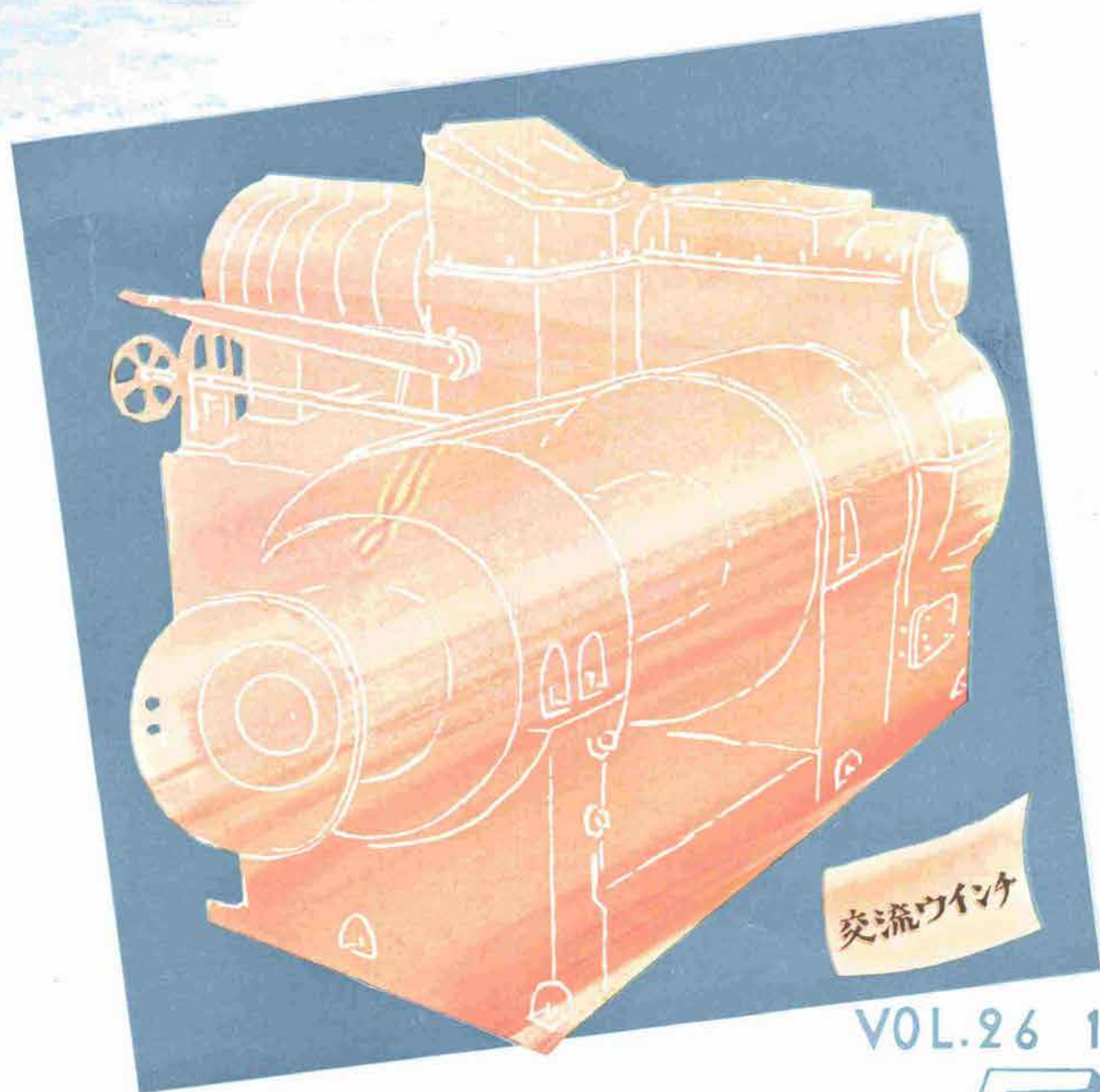


MITSUBISHI DENKI

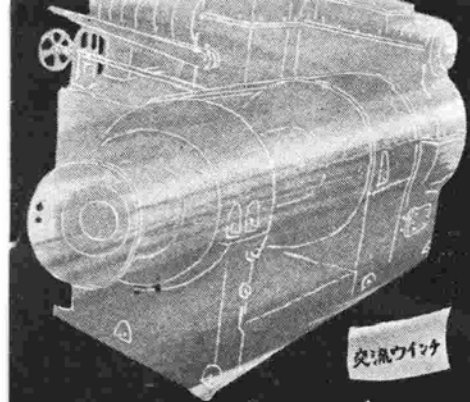
三菱電機



交流ウイン

VOL.26 1952

5



三菱電機

表紙説明

荷重3トン 速度毎分30mの交流電動揚貨機
で出力19/21/7kW 回転数毎分240/510/1140
で、極数24/12/6の三段速度にて慣性モーメ
ントを極度に小さくし、起動電流を少なく起
動回転力を大きくした、わが社独特の優秀製
品を示している。

三菱電機株式会社

本社

東京都千代田区丸の内(東京ビル)
(電)和田倉(20)代表1631・2331

研究所 兵庫県尼崎市南清水
神戸製作所 神戸市兵庫区和田崎町
名古屋製作所 名古屋市東区矢田町
伊丹製作所 兵庫県尼崎市南清水
長崎製作所 長崎市平戸小屋町
大船工場 神奈川県鎌倉市大船
世田谷工場 東京都世田谷区池尻町
郡山工場 福島県郡山市字境橋町
福山工場 福山市沖野上町
姫路工場 兵庫県姫路市千代田町
和歌山工場 和歌山市岡町
中津川工場 岐阜県恵那郡中津町
福岡工場 福岡市今宿青木
札幌修理工場 札幌市北二条東12
大阪営業所 大阪市北区堂島北町8番地1
(電)福島(45)5251-9

名古屋営業所 名古屋市中区広小路通
(電)本局(23)6231-5

福岡営業所 福岡市天神町(天神ビル内)
(電)西(2)5821-5825

札幌営業所 札幌市南一条西5の14
(電)(2)3378・3911

仙台事務所 仙台市東一番丁63
(電)仙台2573・8057

富山事務所 富山市安住町23の2
(電)富山4692・5273

広島事務所 広島市袋町1(明治生命ビル)
(電)中1069・4824

昭和27年 第26巻 第5号

目次

直流高速度遮断器の諸問題.....小 路...2
交流電動揚貨機.....毎 熊...10
超音波探傷器による鋼の品質判定について.....河井・田坂・辻本...15
250kV 117,000 kVA 超高圧用変圧器.....田宮・村上...23
同期機過度現象の解析(2).....潮...31

「三菱電機」編集委員会

委員長	岸 本 久 雄	荒 井 潔	安 藤 三 二	石 橋 英 樹
委 員	浅 井 徳 次 郎	岡 屋 精 二	川 田 勝 利	小 林 治 一 郎
	市 吉 惟 浩	澁 谷 進 一	田 宮 利 彦	松 田 新 市
	進 藤 貞 和	前 田 幸 夫	松 尾 米 太 郎	松 岡 治
	毎 熊 村 秀 平	森 村 久 男	薄 井 康 介	
幹 事	宗 吾 知 侃		(以上50音順)	

昭和27年6月15日印刷 昭和27年6月20日発行

『禁無断転載』 定價1部金60円

編集兼発行人

印刷所
印刷者
発行所

東京都千代田区丸の内2丁目3番地

東京都港区麻布竹谷町1番地

東京都港区麻布竹谷町1番地

三菱電機株式会社内

電話 和田倉(20)1631

吾 郷 侃 二

博文堂印刷所

大 橋 佑 吉

「三菱電機」編集部

日本出版協会登録 213013

直流高速度遮断器の諸問題

神戸製作所

小路 誠 春

Problems of High Speed Circuit Breakers

By Masaharu Kouji

Kobe Works

Abstract

High speed circuit breakers for electric railway substations have been manufactured and developed, for the protection of rotary converters against short circuits which might cause commutator flashovers.

But now the high speed circuit breaker is used not only on rotary converters but with proper characteristic adjustments or changes made for each separate device it is also used on mercury arc rectifiers and feeder lines.

In this paper, such problems, as "load-closing", "self-holding" and "mis-operation" which commonly occur on these high speed circuit breakers, are described.

1. 直流高速度遮断器の動作原理

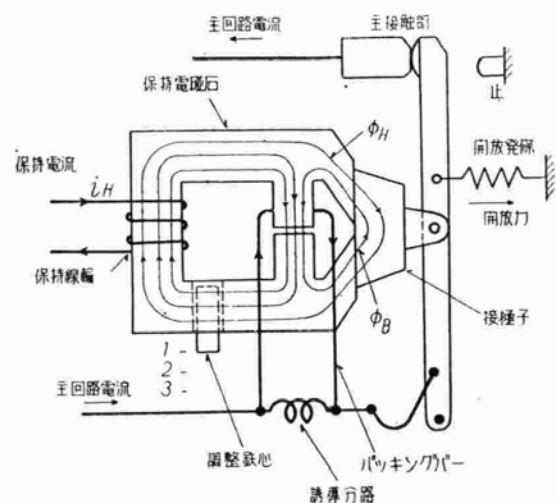
直流高速度遮断器は特性上大別すれば正性高速度遮断器と逆性高速度遮断器とになる。前者は常時負荷電流と同一方向の過大電流で動作し、後者は常時負荷電流と逆方向の電流で動作する。いずれの場合においてもその動作原理は根本的には同じであつて、これを簡単に説明するとつぎのとおりである。

高速度遮断をする理由は(1)主接触子を閉合位置に保つ方法が機械的掛金等によらず保持電磁石によつて、(2)接触子の開離が高速度であること、(3)強力な磁気吹消作用と消弧室の急速な消弧作用によることである。

1図は保持電磁石内部の磁束関係を示す。 ϕ_H は保持電流による磁束であつて常時接極子を吸着し主接触部を閉合状態に保持している。 ϕ_B はバックキングバー電流による磁束であつて接極子接触面においてバックキングバー電流の方向により ϕ_H に相加わりまた ϕ_H を打消す如く作用する。 ϕ_H を ϕ_B が打消す場合その差が一定値になれば開放鉄心により遮断動作を行うのである。

この動作原理による遮断器の動作特性は2図のようになる。

動作目盛の調整は保持電磁石の磁気回路の一部に設けた調整鉄心をぬきさして ϕ_H を変化することによつて行う。調整鉄心を(1)に設定した場合の動作特性曲線は曲線1、(2)の位置に設定した場合は曲線2、同様に



1 図 動作原理説明図

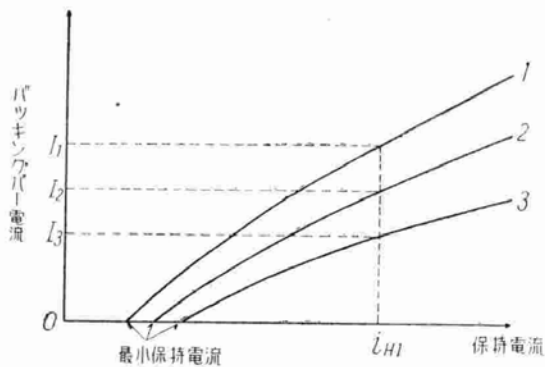
Fig. 1. Principle of operation.

して曲線3をうる。いま保持電流を i_{H1} に設定した場合、調整鉄心の位置(1)では I_1 で動作し、(2)では I_2 で動作し、(3)では I_3 で動作する。

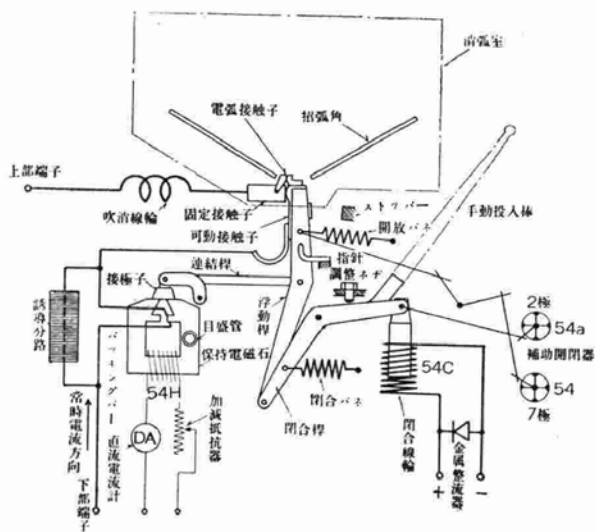
バックキングバーに誘導分路が接続されたときは、動作電流はそれぞれバックキングバー電流 I_1 I_2 および I_3 に対する主回路電流で称呼することとなる。

2. 主要部分の構造と動作

3図は構造説明図である。主回路は上部端子からたどると、上部端子・吹消線輪・固定接触子・可動接触子お



2 図 特性曲線説明図
Fig. 2. Characteristic curve.



3 図 高速度遮断器構造説明図
Fig. 3. Structure of high speed circuit breaker.

よび誘導分路とバックアップバーの並列回路を経て下部端子へ出ている。

主接触子は銀を使用し、電弧接点子は耐弧金属たとえば銀タングステン、銅タングステン等を使用しており、閉合時主接触子に先立ち接触し、開放時は遅れて開離する構造であるから主接触子の溶損は軽微である。また電弧接点子の存在が全遮断時間におよぼす影響も実験の結果僅少で問題にならない。

吹消線輪は2個からなり主回路と直列回路を作り消弧室を挟む成層鉄心製の磁極に作用して消弧室内に強力な磁場を作る。

閉合電磁ソレノイド機構は遮断器の投入を行う全桿杆組織の運動源泉となっており、投入時の極短時間のみ通電する。

保持電磁石は接極子を吸着保持して主接触部を閉合位置に保つ。保持電磁石の一部に設けられた目盛管はそのなかの可動鉄心を抜さしすることによって接点子接触面を通過する磁束の調整すなわち動作目盛を調整するものである。

誘導分路は成層鉄心の中央を単に銅帯が貫通している
直流高速度遮断器の諸問題・小路

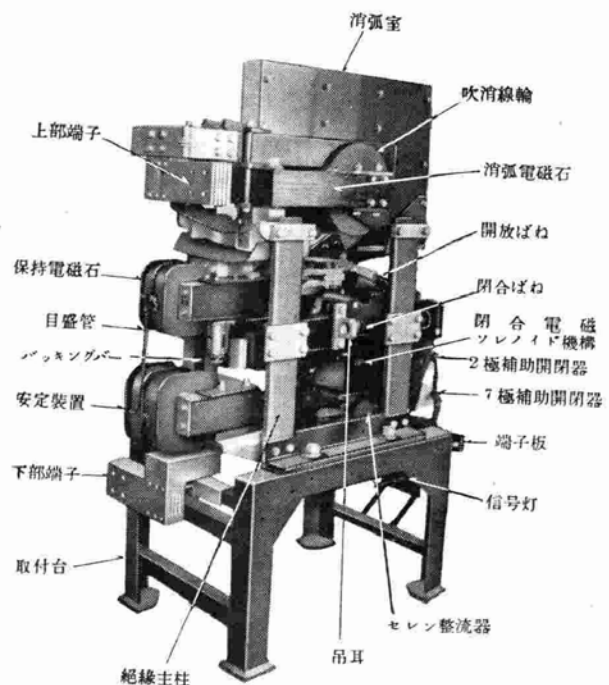
構造で、突進電流が流れるときバックアップバーへ流れる電流の配分を多くする作用を持つている。

指針はフレームに固着され、浮動棒すなわち主接触子の正しい位置を指示する。工場では浮動棒の正しい位置を決定し浮動棒上指針の指す処に刻印をするから使用中浮動棒の狂いを知りこれを処置することができる。

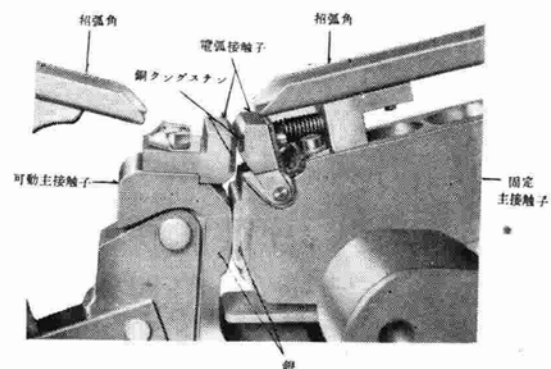
つぎに6図について動作説明をする。

ア. 閉 合 動 作

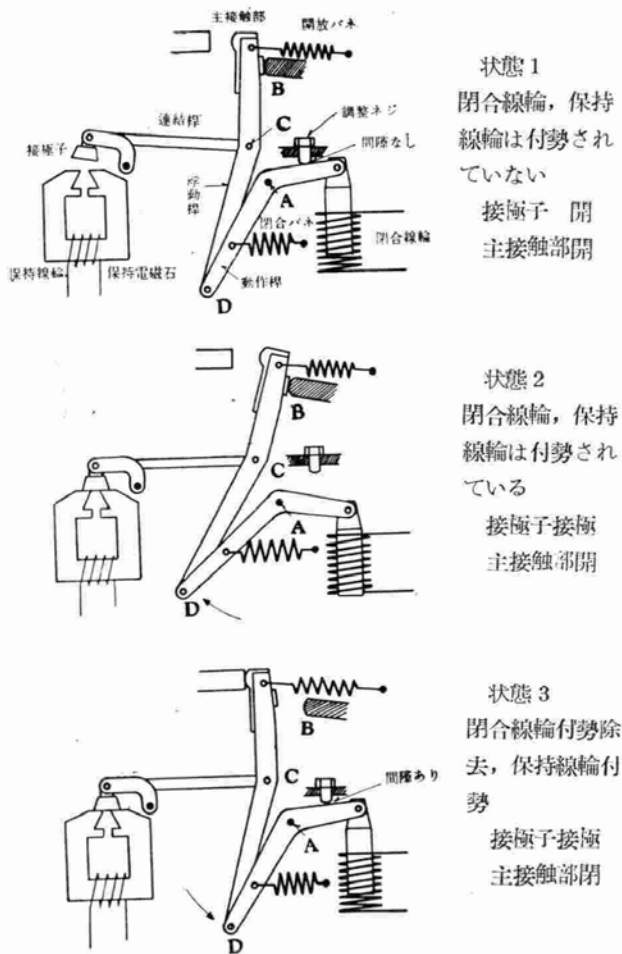
- (1) 状態1において閉合線輪を付勢すると可動鉄心は下方に吸引せられ動作棒はA軸を中心として時計式に回転し閉合バネは伸ばされる。
- (2) 浮動棒は開放バネによりストップBに引付けられているため動作棒の回転は浮動棒をB点を支点として時計式に回転する。
- (3) 浮動棒の回転は連結棒を左方から移動せしめ、接極子は保持電磁石面に押付けられる。



4 図 HP-3 型逆性高速度遮断器
Fig. 4. Type HP-3 reverse current high speed circuit breaker.



5 図 高速度遮断器の接触部
Fig. 5. Contacts of high speed circuit breaker.



6 図 動作説明図

Fig. 6. Diagram showing operating cycle of high speed circuit breaker.

- (4) 保持電磁石は保持線輪によつて励磁されているから接極子は吸着される。(状態2)
- (5) 保持電磁石が接極子を保持すると, 閉合電磁ソ

レノイド機構の可動鉄心の運動に伴う補助開閉器によつて閉合線輪は付勢を失ひ, 緊張位置にあつた閉合パネは動作桿を原位置に復せしめる。

- (6) 同時に浮動桿は連結桿のC軸を中心として反時計式に回転し開放パネを引伸し接触部を閉じ閉合動作を終る。(状態3)

4. 開放動作

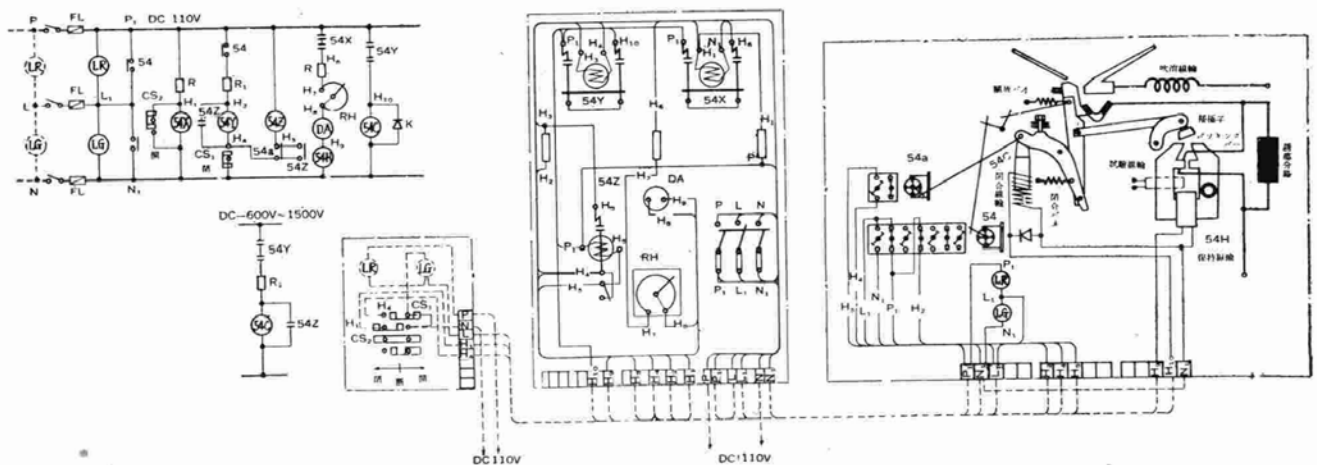
保持線輪回路を断つと保持電磁石に無励磁となり接触子は離れ閉合パネは動作桿を調整ネジに当るまでごく短い距離を回転せしめ, 浮動桿はD軸を中心として開放パネの力により時計式に回転し開放動作を行う。(状態1)

3. 負荷の投入について

一般に高速度遮断器は投入操作を確実ならしめるため, 投入時保持電磁石を定常値の2~3倍に過励磁するのが普通である。過励磁しなければ投入時の機構の衝撃で投入は不確実である。過励磁のみではなお不十分の場合可動部にダッシュボット等を作用せしめて衝撃を緩和している。

電鉄変電所における饋電線用高速度遮断器はつねに大小種々の負荷を投入しなければならないが, 保持電磁石を過励磁すれば必然に動作電流値は高くなるので, もし故障線を投入したとすれば, 設定目盛値では動作することなく, はるかに高い値に達しなければ遮断動作を行わない。かようなことは高速度遮断器にとつては好ましくない使用法といわねばならない。如上の理由で饋電線用高速度遮断器は保持電磁石を過励磁することなく確実に投入動作を行うものがよい。

わが社の投入方式はつねに作用の安定した電氣的緩衝装置を使用している。その装置は要するに閉合電磁石の可動鉄心の復帰速度を電氣的に調節するものである。



- 符号説明 FL ヒューズ LR 信号灯(赤) LG 信号灯(緑) 54X 電磁接触器 54Y 電磁接触器
54Z 電磁接触器 54H 高速度遮断器保持線輪 54C 高速度遮断器閉合線輪 54 高速度遮断器補助開閉器(7極)
54a 高速度遮断器補助開閉器(2極) CS 制御閉閉器 DA 直流電流計 RH 電流調整抵抗器 K 金属整流器

7 図 高速度遮断器操作説明図

Fig. 7. Connection diagram of high speed circuit breaker and its controlling panel.

この装置を適用した操作方式の一例を7図について説明する。

- (1) 接触器 54X は制御電源の生きているかぎりその接触子を閉じており、したがって保持線輪 54H はその真列抵抗 R および加減抵抗器 RH を通じて励磁されている。
- (2) 制御開閉器 CS_1 を入れるときは 54Y は動作しその接触子によつて高速度遮断器の閉合線輪 54C が励磁され、可動鉄心は吸引される。
- (3) レバーの運動によつて保持電磁石は接極子を吸着し、同時に動作桿に連結されている2極補助開閉器 54a は回転して接触子 54Z の回路を作る。
- (4) 54Z は動作してその接触子により 54Y の線輪を短絡、無励磁とし、同時に 54Z は自己保持を行う。
- (5) 54Y が無励磁となれば閉合線輪 54C は付勢を取去られ可動鉄心は復帰し、54a も復帰して接触を開く。この際保持電磁石は接極子を保持しているから閉合パネにより遮断器の主接触子は閉合する。同時にこれと関連する7極補助開閉器 54 は回転して 54Y の回路を開き、 CS_1 を開けば 54Z も開放して閉合動作を終る。
- (6) 制御開閉器 CS_2 を入れるときは 54X は短絡されて無励磁となり遮断器は開放する。

この操作において閉合電磁ソレノイド可動鉄心の復帰速度を緩和する電気的方法3種を8図に示す。

A は単なる放電抵抗 R_d を使用するもので、54Y が閉路すれば投入電流は 54C と R_d に分流して流れ可動鉄心は吸引される。つぎに 54Y が開路すれば可動鉄心は復帰せんとするが、54Y を通ずる電流は断たれても、54C と R_d の閉回路に循環電流がある間流れるため可動鉄心は急速に復帰せずゆるやかに復帰するのである。

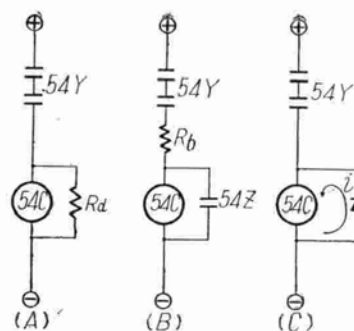
B は放電抵抗の代りに電磁接触器 54Z の接触子を使用した方式である。54Z が動作して 54Y を無励磁にするとき、他の一つのコンタクトは 54C を短絡し抵抗の非常に小さい放電回路を作る。このとき R_b にのみ制限された電流が流れるが、ただちに 54Y のコンタクトが開くのでごく短い時間しか継続しない。

C は放電回路に金属整流器 K を使用したものである。この方式では投入電流は 54C にのみ流れ K に流れない。しかしながら 54Y が開路するとき 54C と K 回路に流れる循環電流 i は図示の方向に容易に流れるのである。

A, B および C の方式を比較して見ると、A の場合循環電流を十分大きくするためには R_d を小さくしなければならない。 R_d を小さくすれば投入電流が増加するので良方式とはいえない。

B の場合は放電回路の抵抗が非常に小さく、時定数も大であるから循環電流の持続時間が長い。この方式では 54C の直列抵抗 R_b を必要とする。 R_b がなければ 54Z で短絡の形となるからである。54Y は 54Z が閉路

直流高速度遮断器の諸問題・小路



8図 閉合線輪回路
Fig. 8. Closing coil circuits.

した直後に開路するのであるが、この間極短時間 R_b のみに制限された尖頭電流が流れるが時間が短かいので問題にならない。

C においては投入電流は放電回路によつてほとんど変化されない特長をもっている。しかしながら高圧用としては整流器の価格が高むので経済的に不利である。

結局 B 方式を 600 ~ 1,500 V 用に、C 方式を 100 V 用を使用することにした。

4. 投入時における動作電流値の低下

負荷のある回路を投入する場合、つぎのような理由によつて実際の動作電流は設定目盛値よりも低下するものである。すなわち

- a. 主接触部が閉合するときの衝撃。
この衝撃は接極子を引離す方向に働く。
- b. 主接触部が閉合した瞬間に流れる電流による反撥作用。
この反撥作用は浮動桿に作用し a. の場合と同様接極子を引離す方向に働く。
- c. 閉合時誘導分路の作用によるバックンバー電流の増加。

等である。

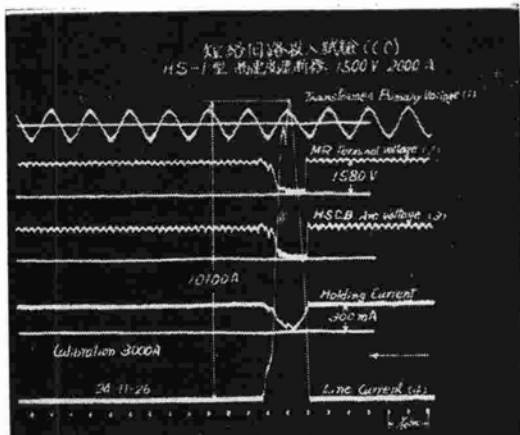
投入時流れる電流が設定目盛値にとくに接近している場合は如上の理由で投入しにくい場合があるわけであるが、こんな場合には保持電磁石の適当な強励磁は望ましいといえる。

5. 電弧接触子の作用

かつて高速度遮断器は、急速に上昇しつつある大電流をきわめて短時間に遮断する、というただ一つの目的のもとに設計製作せられたもので、このために普通の遮断器に使用する電弧接触子は除かれてあり、主接触子すなわち電弧接触子となつていたのである。

現在の饋電線用高速度遮断器のように頻繁に投入遮断す繰返すものにおいては、このような構造では主接触子は荒れざるを得ない。主接触子の荒れることは発熱を招くのみならず浮動桿を移動さすため目盛を狂わす原因となる。

主接触子の上部に取付けられた電弧接触子は、投入時は主接触子に先立ち接触し、開放時は主接触子に遅れて



9 図 1,500 V 2,000 kW 水銀整流器に HS-1 型高速度遮断器を使用して短絡回路の投入遮断の試験を行ったオシログラム

Fig. 9. Oscillogram of short-circuit current on 1580 Volt D.C. reclosing main circuit. Using type HS-1 high speed circuit breaker. Power being supplied by 2,000 kW mercury arc rectifier.

開離するようになっている。この構造では小電流はもちろん大電流を遮断しても主接触子の溶損はきわめて僅少であるため接触部には純銀を使用することができる。電弧接触子の材料は銅タングステン・銀タングステン等の耐弧金属を使用しているので溶着の心配がない。また電弧接触子のあることは保守の見地からも好ましいことで、電弧接触子の取替えをするのみで長期間主接触子を取替える必要がない。

しかしながら電弧接触子をつけたための死時間(Dead time)の増加は否めないが、実際試験の結果全遮断時間にはほとんど影響のないことを認めた。

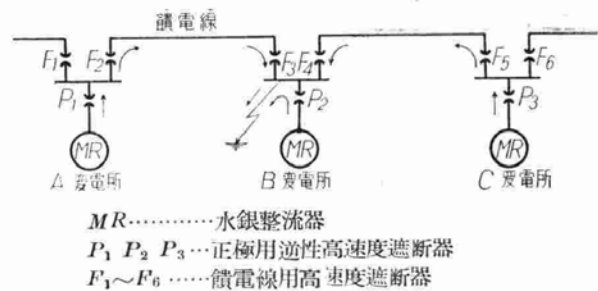
6. 高速度遮断器のベル作用

投入時主接触子の溶着についてはいろいろ原因があると思うが、この一つの原因となる現象すなわちベル作用について述べる。

この現象の起りやすい条件について考えるとつぎのとおりである。

- 電弧接触子がなくて主接触子のみの場合。
- 保持電磁石の接極子の開離開始とほとんど同時に主接触子(この場合電弧接触子なし)が開離を始めるような構造。
- 投入時流れる電流は急上昇する大電流でなく電流値は大であつても変化のゆるやかなもの。
- 投入した回路のインダクタンスは比較的小さくて電弧が遮断されやすい場合。

如上のような条件で、一つの回路を投入したとするとただちに電流が流れて1図の ϕ_R を ϕ_N が打消し、接極子が開離運動を始めると主接触子がただちに開離し始める。



10 図 電鉄変電所における事故例

Fig. 10. Example of fault in electric railway substation.

主接触部がわずかに開離したとき発生した電弧は強力な吹消作用によつて吹飛ばされ電流は急激に減少する。この急減する負荷電流にしたがつて ϕ_R もまた急速に減少して一度減少していた接極子吹着磁束はふたたび増加する。もし接極子が保持電磁石面から遠ざかりつつある過程において急激に増加して来る磁束により引戻されるならば主接触子は再び閉合するわけである。この一開閉の時間はごく短かいため、再閉合した場合の負荷電流はほとんど変化のないものとなれば、またこの開閉動作を繰返えし、ベルのように断続して遂に溶着するに至る。

この現象を防止する方法は最大目盛における保持磁束が接極子を吸着し得ない距離に接極子が離れるまで主回路電流が遮断されないようにすることである。換言すれば接極子が上記距離に達するまで主接触部は閉じているようにすればよいのである。このことは死時間がある程度大にすることにはなるが、このような現象を防止するためには一定のデッドタイムが要求されるのである。

電弧接触子はこの必要なデッドタイムを得るために有用な存在であることがわかる。

7. 自己保持について

高速度遮断器が自己保持をするために事故を拡大することがある。一例をあげると10図に示すとおり、A、BおよびCの3変電所のうちB変電所の母線に接地事故が起きたとすれば、接地故障電流は図示のように流れるが、もし高速度遮断器 F_2 (A変電所) および F_6 (C変電所) の目盛が故障電流よりも高い場合はいずれも動作しない。またB変電所の F_3 および F_4 は逆電流を通じているのでこれまた動作しない。

3変電所の P_1 , P_2 および P_3 もまた逆性高速度遮断器であるため動作しない。B変電所では故障をただちに発見しても F_3 および F_4 がこの電流で自己保持をする場合は手動開放は不能である。こうして故障電流を遮断する何ものもなく、隣接する変電所に連絡して饋電線遮断器を開放するまでの長時間経過のうちに故障は拡大するのである。

もし F_2 , F_4 および P_2 が自己保持をしなければ単に各遮断器の保持電流を断つことにより簡単に故障電流を遮断することができるのである。

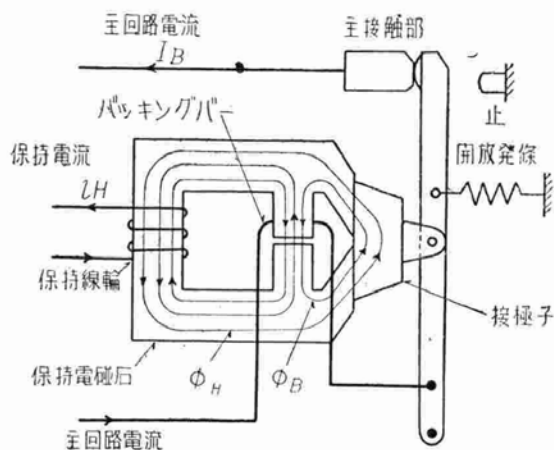
逆性高速度遮断器に正方向すなわち負荷電流が流れているとき、その負荷電流の値が一定値をこえると保持電流を断つても自己保持をして遮断動作を行わなくなる。

正性高速度遮断器においてもこれに逆電流が流れている場合は上記の場合と同様保持電流を断つても逆電流の値が一定値をこえると遮断動作を行わなくなる。

この様子を 11 図 によつて説明する。自己保持現象は接極子に生ずる ϕ_H と ϕ_B が同一方向である場合に起るのである。この磁束関係は上述のように逆性高速度遮断器に正電流が、また正性高速度遮断器に逆電流が流れているときに成立する。いま磁束がこのような関係にある場合保持電流を断つと ϕ_H は消滅して ϕ_B のみ残る。この ϕ_B による吸着力が開放バネの引放力に打勝つ場合は自己保持をするわけである。

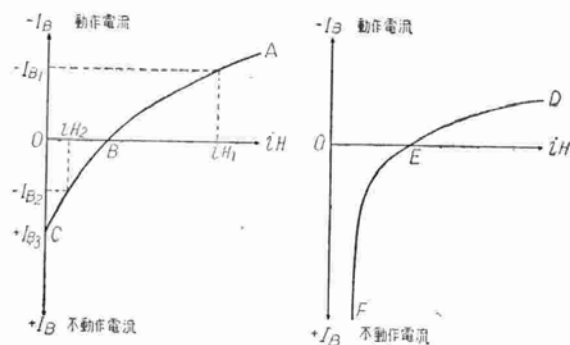
自己保持を防止する方法は簡単であつて、保持電磁石の各脚部の磁気抵抗を適当に選定して過大な回路電流に対しても ϕ_B の増加は一定値を越えないようにし、この ϕ_B による吸着力は開放バネの引放力の限界内にあるようにすればよいのである。

この特性曲線を 12 図 に示す。(ア) の曲線 A—B—C



11 図 自己保持現象説明図

Fig. 11. Illustration of "self-holding".



(ア) 自己保持をするもの (イ) 自己保持をしないもの

12 図 逆性高速度遮断器特性曲線説明図

Fig. 12. Characteristic curves of reverse current high speed circuit breakers.

は自己保持をするものの特性曲線であり、(イ)の曲線 D—E—F は自己保持をしないものの特性曲線である。これらの曲線は接極子における引放力と吸着力とが平衡する限界曲線であつて、吸着力は ϕ_H と ϕ_B との差あるいは和によるものである。横軸の上方は差による曲線、すなわち ϕ_H を ϕ_B が打消してその差が一定値になれば動作する点の曲線である。これは普通の高速度遮断器の原理であるが、下方は ϕ_H と ϕ_B との和による吸着力が引放力と平衡する点の曲線である。B 点および E 点はそれぞれ最小保持電流を示す点であつて、この電流以下の保持電流では最早吸着保持は不能であつて、吸着するためにはバックアップ電流をこの電流による磁束 ϕ_B が ϕ_H に加わるような方向に流さねばならない。

いま (ア) の曲線 A—B—C について説明すると、保持電流 i_{H1} A を通ずるとき、逆電流 I_{B1} A で動作する。つぎに最小保持電流以下であるところの i_{H2} A を通じた場合には正方向に I_{B2} A を通すれば保持する。最後に保持電流を零にした場合は I_{B3} A (C 点) で保持する。これが自己保持電流であつて、これは保持電流が零である場合バックアップ電流のみによつて吸着するものであるから、バックアップ電流の方向には無関係でその大きさのみによるものである。

しかるに (イ) の曲線 D—E—F においては正方向にいかにバックアップ電流を増しても曲線は縦軸にほとんど平行しており交差する点を持たない。これがすなわち自己保持をしない高速度遮断器の特性曲線である。自己保持をしないといつても曲線が縦軸に正確に平行していないかぎり絶体ではないが、その自己保持電流は非常に大であるから実用上自己保持をしないといふことができる。

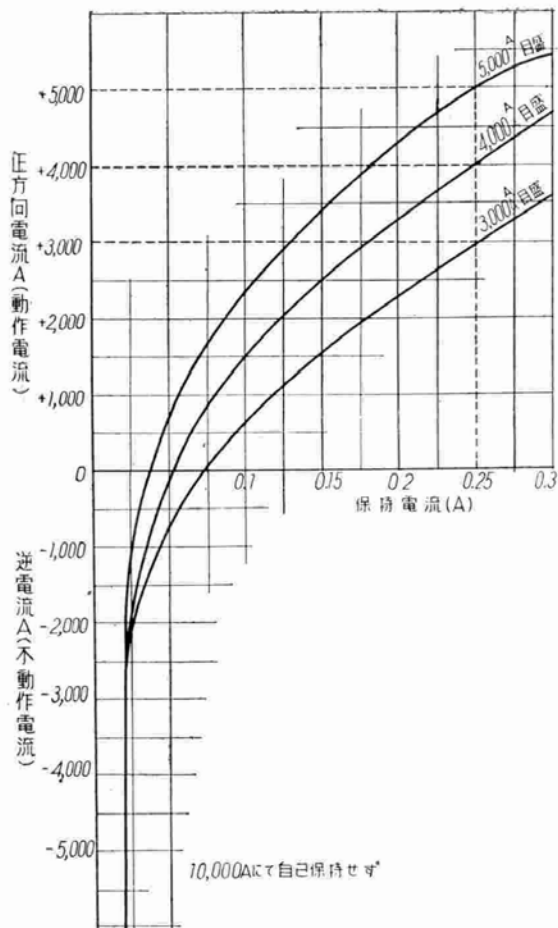
13 図、14 図はわが社の実際試験による特性曲線の实例である。

8. 逆性高速度遮断器の誤動作とその防止装置

逆性高速度遮断器が正電流を通じている場合、この電流の急激な減少、たとえば直列に接続された饋電線遮断器が負荷電流を遮断した場合、逆性高速度遮断器もまた追従して遮断動作を行う現象がある。水銀整流器に接続されている場合は逆弧したのではないかと疑い、またこの場合普通は受電側の油入遮断器が電気連動により遮断することになっているので変電所は全停電となる。こうした誤動作はいたすらに運転を煩雑にして手数を要するほか利するものはない。

いまこの現象を考察して見るに、15 図 (イ) において負荷電流 i が次第に増加してついに饋電線遮断器が遮断した場合、保持電磁石内部の磁束変化は 16 図 のようになる。

この曲線は磁束変化の傾向をうかがう目的で磁気抵抗を常数と看做し、すなわち飽和曲線のほぼ直線部分を使用し、また漏洩磁束はこれを無視した計算からえたもの



13 図 正性高速度遮断器

HS-1 型 1,500 V 2,000 A 特性曲線

Fig. 13. Characteristic of type HS-1 high speed circuit breaker 2,000A 1,500V DC.

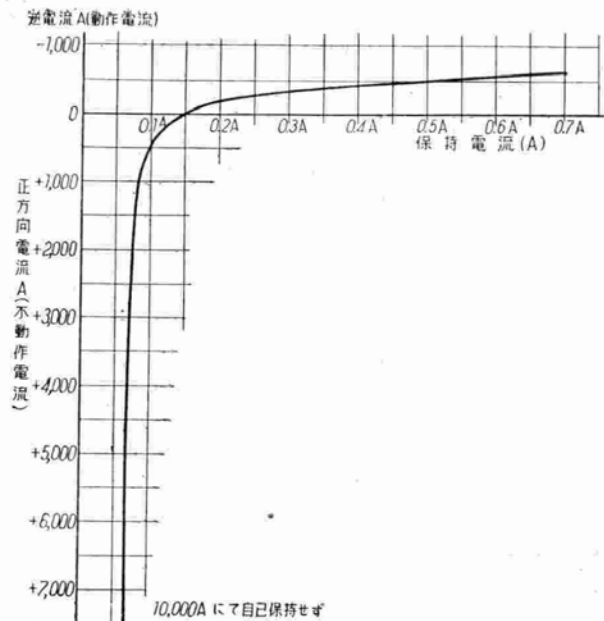
の一例である。

回路電流が 12,000 A から $\frac{20}{1000}$ 秒位の時間で遮断されるとき ϕ_1 はほぼ回路電流の減衰に追従して減衰するが、 ϕ_2 は保持線輪の作用を受けてその減衰はきわめて緩慢である。 ϕ_3 は ϕ_1 と ϕ_2 との和である。ここに注意すべきことは ϕ_1 が $\frac{6.7}{1000}$ 秒で零となりその後は逆転して次第にその値を増し $\frac{20}{1000}$ 秒で最大値に達した零値に向つて減少してゆくことである。

この理論計算の結果から ϕ_1 の逆転について考察をして見ると、主回路電流が急減するとき ϕ_1 は急速に減衰するが、 ϕ_2 は保持線輪に過渡電流が流れるためその減衰はさまたげられて非常に緩慢であるため ϕ_2 が ϕ_1 の磁路へ分流してゆくものと考えられる。この ϕ_2 の分流は ϕ_1 を打消して零にし、さらに逆転させるのである。

ϕ_H と ϕ_1 とは逆性高速度遮断器であるため正電流を通じているときは接極子接触面において同一方向である。

いま ϕ_1 が逆転して次第に ϕ_H を打消してゆけばその差 ($\phi_H - \phi_1$) が一定値に達すれば接極子は開離して遮断動作を行うのである。



14 図 逆性高速度遮断器

HP-1 型 1,500 V 2,000 A 特性曲線

Fig. 14. Characteristic of type HP-1. Reverse current high speed circuit breaker 2,000A. 1,500 V D-C.

結局この誤動作の原因は保持線輪に過渡電流が流れるために ϕ_2 がすみやかに減少せず ϕ_1 の磁路へ分流してゆくことにある。よつて対策としては保持線輪に過渡電流が流れぬ装置を施せばよいことになる。

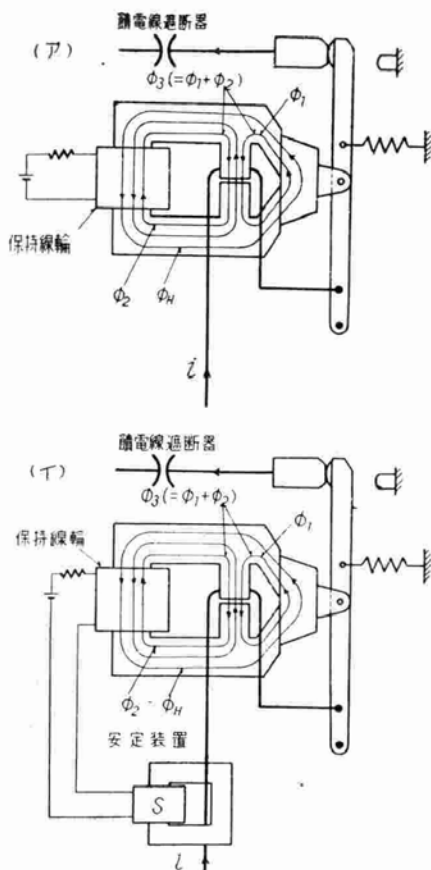
15 図 (ロ) に示す安定装置 S がこの装置である。理想的にいうならば、負荷電流が急激に減少するとき安定装置 S の線輪に誘起する電圧と保持線輪に誘起する電圧が同一時刻に同一波形のしかも方向相反するように構成されるならば過渡電流は流れないのであるが、実際製作されるものはこのような理想を満足することは困難である。

しかしながら実際問題としてたとえば 10,000 A 以上の急減電流 ($\frac{8}{1000}$ 秒位で零になる) に対しても誤動作をしないよう調整することができる。すなわち ϕ_1 が逆転するような磁束の動揺を防止し得るのである。

17 図は安定装置の効果を示す特性曲線の一例である。縦軸は主回路電流を示し、 O 点の上部は逆電流、下部は正電流を示す。横軸は保持電流を示している。曲線 A は動作特性、 B は安定装置のない場合の誤動作特性、 C は安定装置ある場合の誤動作特性である。

いま保持電流を 0.4 A とするとき動作電流は 200 A で安定装置のない場合の誤動作電流は 500 A である。保持電流を 1 A に増加すると動作電流は 600 A になり、誤動作電流は 2,100 A になる。この値はなお小さくして実用に供しにくい。誤動作電流を高くするためには動作目盛も相当に高くせざるを得ないのである。

しかるに安定装置を装置した場合は曲線 C で明らかな



15 図 安定装置説明図
Fig. 15. Principle of "stabilizer"

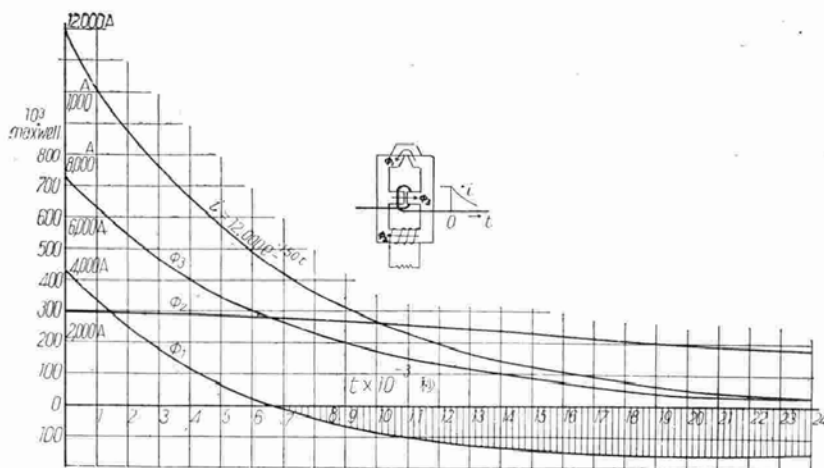
ように保持電流 0.4 A で誤動作電流は 3,500 A、0.6 A とすれば 8,700 A、0.8 A とすれば 10,000 A を越えるであろう。このとき動作電流は 500 A である。

すなわち逆流目盛を 500 A に設定したこの逆性高速度遮断器は 10,000 A の急減電流に対しても誤動作をしないのである。

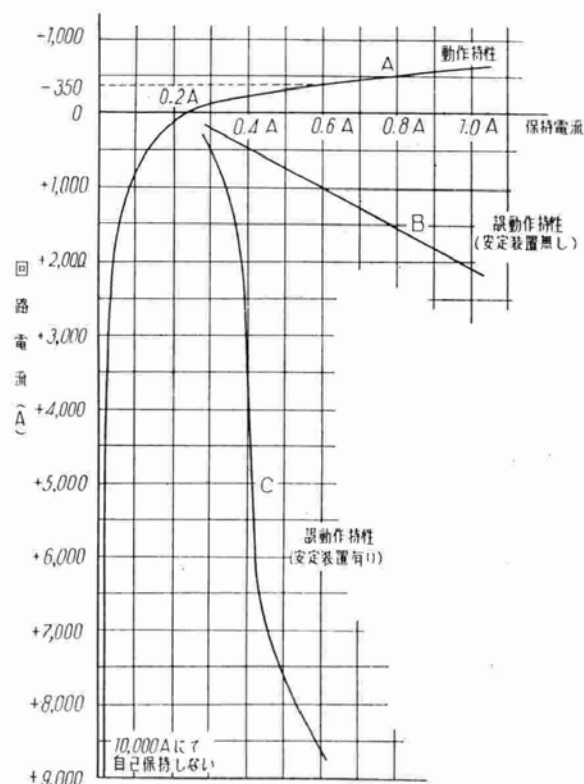
9. む す び

以上は当面した諸問題を解決し、改良された高速度遮断器について述べたのであるが要約して見ると、

- (1) 自己保持をしない特性を与え、自己保持による災害を一掃した。(特許第 186209 号)
- (2) 逆性高速度遮断器の誤動作防止装置(当社名は安定装置)を考案製作し好成績を得た。(特許出願中)
- (3) 適当な投入速度をうる電気的方法として閉合線輪に並列に放電回路を作つた。とくに放電回路に金属整流器を使用したものは投入操作電流を他の方法に比較して小さくすることができる。(特許第 187718 号)
- (4) 耐弧金属製の電弧接触子を装置した。これは主接触子の溶損を防止するのみならず負荷投入時有害なるベル作用とこれに起因する接触部の溶着を防止するものである。



16 図 保持電磁石内部の磁速変化
Fig. 6. The change of magnetic flux in holding magnet.



17 図 特性曲線の一例
HP-1 型 逆性高速度遮断器

Fig. 17. Characteristic of type HP-1 reverse current high speed circuit breaker.

- (5) 主接触部の正規位置(したがって浮動棒の正規位置)を指示する指針を設けた。(登録実用新案第 355904 号)
- (6) 遮断時発生する電弧ガスならびに異常電圧による絶縁破壊の問題に対しては各部の絶縁を強固なものとした。

等である。

最後にこの高速度遮断器の改良にあたりご指導とご協力を賜つた関係各位に対して深甚な謝意を表する次第である。

交 流 電 動 揚 貨 機

本 社
毎 熊 秀 雄

AC motor winch

By Hideo Maiguma

Head Office

Abstract

Induction motors are easily handled and do not require a great deal of adjustment and maintenance. They are constructed lightly resulting commutators are not required. However, DC motors have been used for marine equipment due to their excellent speed-torque characteristics which are not provided with AC motors. AC electric cargo winches furnish a good set of speed control characteristics as they are specially designed and constructed to meet the requirements. A 3 speed AC electric cargo winch has recently been developed and manufactured experimentally, and load test have been made by means of our specially built testing tower under conditions similar to the actual operating conditions, proved entirely to the cargo winch application.

1. まえがき

誘導電動機は速度制御特性を除けば、整流子という厄介なものがないので取扱、保守等が容易で重量も軽く価格も安価であるが、船舶用としては従来ほとんど直流電動機が使用せられた。とくに揚貨機用としては下記に述べるような主な理由により交流電動機は使用されなかつた。

A. 交流電動機は速度調整が完全に行いにくい。

直流電動機は速度調整がきわめて円滑で広範囲に行われる。ことに揚貨機に適合した直巻特性がえられるが、普通の交流電動機はこれらの特性をうることが困難である。

B. 起動特性が適当でない。

交流電動機は起動電流・起動回転力あるいは速度上昇率等の点において揚貨機のように起動・停止・逆転を頻繁にくり返す場合には困難を生じやすい。

わが社は昭和 11 年運輸省の関釜連絡船金剛丸級用として、2 トン、3 トンの交流電動揚貨機を交流の弱点たる

速度制御特性を改善した優良な製品を製作納入した経験を活用し、機械部分は新三菱重工業株式会社神戸造船所で製作願ひ（機械部分はわが社でも製作する）3 段速度の交流電動揚貨機を試作し、わが社独特のウインチ試験塔を使用し実際の使用状態と類似の負荷試験を施行した結果、優秀な成績をうることができた。構造上の特長改良した諸点をことにご紹介致し顧客のご批評を蒙り今後の新造船用に陸続としてご採用方を願う次第である。

2. 試作電動揚貨機の仕様

荷 重	3 トン
速 度	30 m/sec
出 力	10/21/7 kW
回転数	240/510/1,140 (毎分)
極 数	24/12/6
電 圧	220 V
周波数	60 ~
型 式	他力通風型 カゴ形回転子
冷却用送風機	FoL-10 A 型 (1 HP)

3. 試作電動機の特長

ア. 慣性モーメントを極度に小さくした.

回転部分の慣性モーメントが大きいと全速度に達するまでの起動時間が長くなり、またこの間に電動機に発生する熱損失が大きくなって電動機過熱の原因となる。ことに電動機の回転子の慣性モーメントがその大部分を占めているので、何よりも電動機自身の慣性モーメントを減少することが先決問題である。

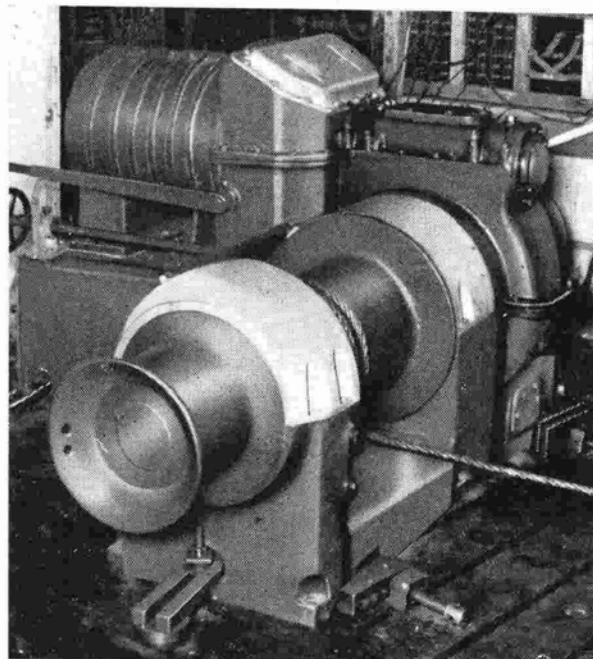
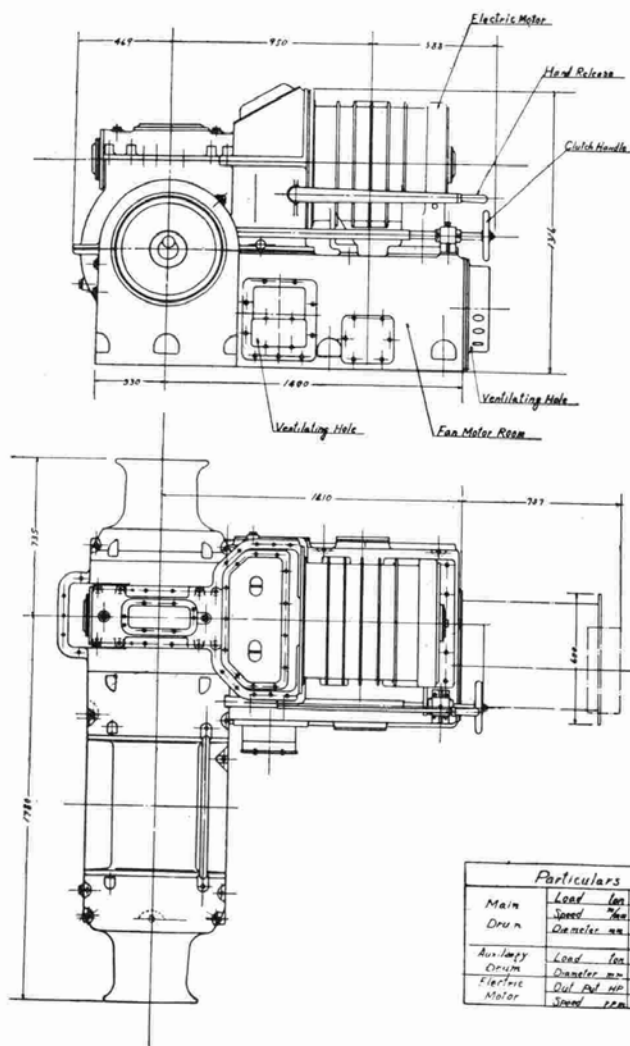
イ. 起動電流を少くし起動回転を大きくした.

カゴ形誘導電動機では起動電流は全負荷電流に対し400%以上が普通であるが、この機械では1ノッチ(24極)の場合170%, 2ノッチ(12極)の場合250%で普通のカゴ形に比べるとはるかに小さく、かつ起動回転力は170%を出している。

したがって制御用接触子の損耗を最小とする。

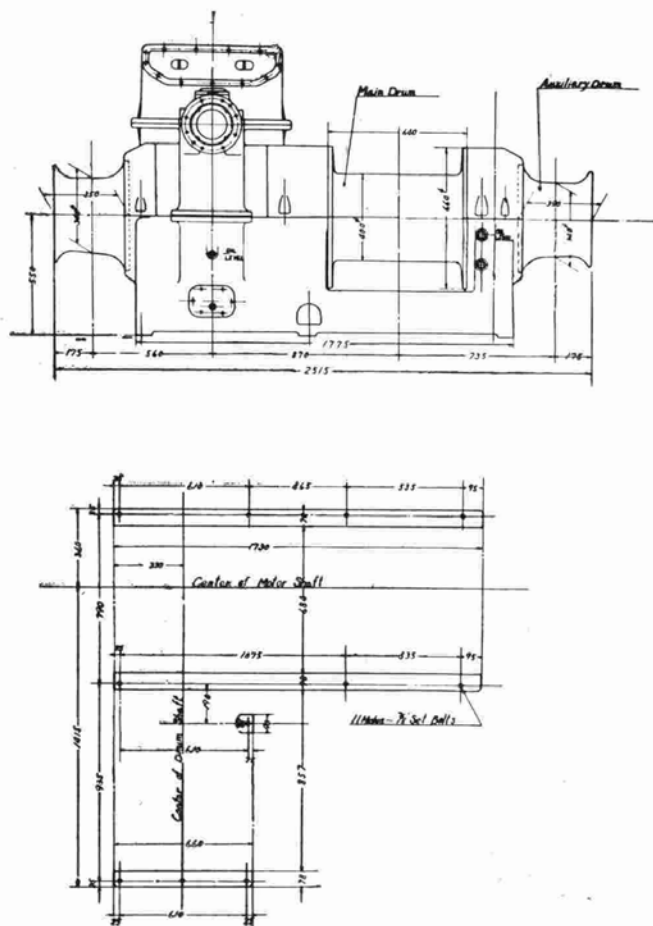
4. 外形寸法図(1図参照)

3 TON AC ELECTRIC WINCH



3トン交流電動揚貨機

3 ton A.C electric winch



1 図 3 トン 交 流 電 動 揚 貨 機 外 形 寸 法 図

5. 作動説明 (2図参照)

制御部分はつぎのものに大別される。

主幹制御器 防水スタンド型として別置

電磁接触器盤 防滴床置型として別置

電磁制動機 靴型として電磁器は台盤内に収納今
回試作の制御回路および制動機は交流による。

ア. 運転準備

- 開閉器 SW_1 SW_2 を閉路する
- 通風機の入口と出口のドアを開くと、ドアスイッチ DS_1 DS_2 が閉路し、電磁接触器 #20 が閉路して通風機用電動機は起動運転をする。
- 主幹制御器が止の位置にあれば無電圧継電器 NVR が励磁され、その接触を閉じる。
- NVR が接点を閉じると直流限時継電器 1-DT 2-DT の反励磁線輪 (1-DT-N 2-DT-N) が励磁され、運転待機となる。

イ. 巻 上

a. 上1ノッチ

主幹制御器を上1ノッチにとると、電磁接触器 #1 #3 が閉路し、 $12/24$ 極用固定子用線輪は△型に接続され、電動機極数は 24 となり低速で起動運転する。なお #1 が閉路すると同時に電磁制動機線輪 MB が励磁され制動機が弛む。またこのノッチでは電流継電器 SC の接点を短絡しているので SC の作動の如何にかかわらず、2-DT の M コイル (2-DT-M) は励磁されており、その接点 2-LT を開路している。

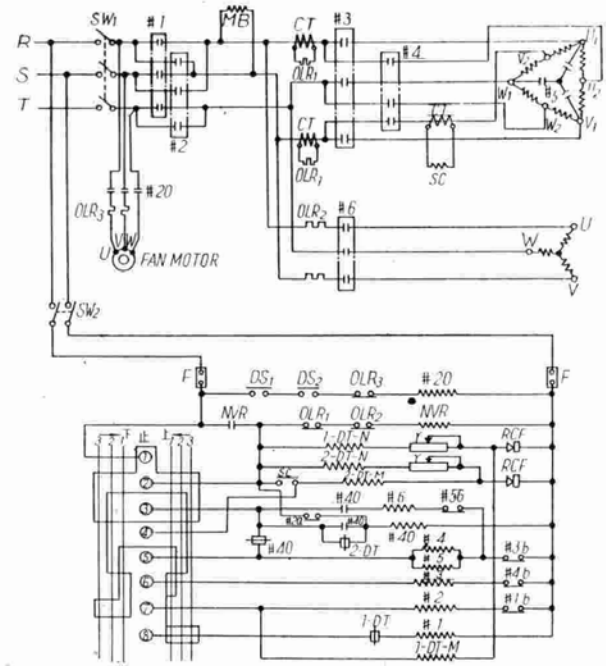
b. 上2ノッチ

上2ノッチにとると #3 は開路し、#1 #4 #5 が閉路し、 $12/24$ 極用固定子線輪は Δ 型に接続され極数は 12 となりさらに速度が上昇する。このノッチが揚貨機としての規定負荷である。この場合も1ノッチと同様に SC は主幹制御器により短絡してあり 2-DT は開路している。

c. 上3ノッチ

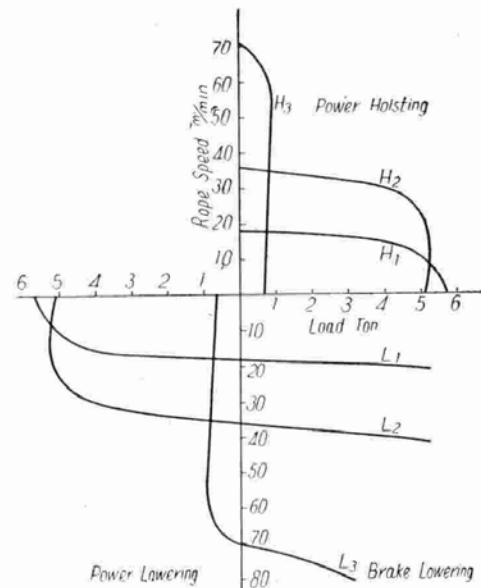
上3ノッチにとると電磁接触器 #4, #5 は開路し #6 が閉路して 6 極となつて運転する。ただしこのノッチは荷重が約 500 kg 以下の時に高速を得るために設けたノッチである。

電流継電器 SC は起動電流によつてビックアップし、電流が一定調整値まで低下した時にドロップアウトするように働き電流が調整値以下にならない間は、その接点 SC は閉路しており、2-DT の接点は開路、継電器 #40 は無励磁 したがつて #6 は開路しており、荷重が約 500 kg 以下の時は、この電流継電器 SC はドロップアウトし、その接点が開路し $DT-2 M$ コイルは無励磁となり一定時間後、その接点 $DT-2$ を閉じて #40 継電器コイルを励磁し、その作動により #4 および #



2 図 接 続 図

Fig.2. Schematic diagram.



3 図 特 性 曲 線

Fig.3. Load-speed characteristic curve.

5 と #6 とを切換えて最高速度にて運転することになる。

したがつて荷重が約 500 kg 以上の時は、たとえ 3 ノッチにとつても SC はビックアップしたままであり第3ノッチの接続とならず第2ノッチの接続で運転を行う。

またたとえ軽負荷の場合でも急激に第3ノッチにとつても一定時間第2ノッチの状態を通り大きな回転力で起動せしめることができる。

ウ. 巻 下

電磁接触器#1の代りに#2が閉路する以外は巻上の場合と同様であり、ただ巻下の時は負荷電流の如何に関らず3ノッチを使用して巻下しうるようになっており、規定負荷を約80m毎分の速度で巻下することができる。

エ. 急激ノッチ

止より上または下の方向への急激ノッチについてはウ項の場合に記してあるが、下から上に急激ノッチをとつた時を本項に記す。下のノッチにおいては1-DT-Mが励磁されて1-DTの接点を開路しているが、上の方向にノッチを進めた結果1-DT-Mが無励磁となり、一定時間後その接点を閉じて#1を閉路せしめ、電動機はその間制動機によつて一旦停止し、さらに巻上方向に回転し荷重が滑るようなことがなく安全である。

オ. 停 止

荷重を或る位置に止めようとするときは、主幹制御器のハンドルを止の位置に戻せば電磁制動機が働いてただちに停止す。

6. 試験成績

ア. 特性曲線

回転数に対する回転力の実測値は3図の如くなる。

イ. 温度上昇試験

揚貨機として色々の負荷状況において温度上昇試験を行つた結果は1表のようになる。

1表 温度上昇

試験条件	線輪1.2 ノッチ用	線輪3 ノッチ用	鉄心 枠	冷却 空気	室温
3t, H2, L2, 10m 1回/分 9時間	27.5	24.5	24	14.5	16.5 6.5
0.5t, H3, L2, 15m 連続引つづき3時間半	48.5	44.5	—	27.5	33.5 10.5
0.5t, H3, L2, 15m 1時間冷却 Fan 停止	51	46	40	32	1.0 9.0
上に引つづきの1時間 但冷却 Fan 運転	27	26	23	14	13 7.0
0.5t, H3, L3, 15m 連続 7時間半	50.5	41.5	45.5	26	20 7.5

温度上昇はいずれも規格値に入っているが、もつとも苛酷な試験は第4番目である。すなわち荷重0.5トンで揚げおろしともに第3ノッチを用いて連続に15mの高さを往復した場合で、これは時3ノッチでは1,200rpmまで加速するに要する時間が長く、この間に発生する熱損失が大きいので、この場合に比べると他の場合、たとえば

揚 3トン 30m/min
降 0.5トン 67m/min) 連続

または揚 } ともに 3トン 30m/min
降 }

等の場合は、温度上昇の点より考えると楽な条件となる。

注 例 (3t, H2, L2, 10m, 1回分, 9時間)

とは3トンの荷重にて揚げ2ノッチ, 降し2ノッチで高さ10mを1分間に1回の割合で9時間連続した場合を示す。

ウ. 起 動 時 間

オシログラムによつて調べると、全速に達するまでの起動時間は

1ノッチにおいて	0.17秒 (3トン)
2 "	0.58秒 (3トン)
3 "	約6秒 (0.5トン)

となり速度上昇率がきわめて良好なことを示している。

7. む す び

交流電動揚貨機として電氣的速度制御を行う方法には

- 巻線型電動機の極数変換と二次抵抗制御の組合せ
- 多段速度籠型電動機
- 交流整流子電動機
- ワードレオナード方式

等が通常考へられるが(ロ)の多段速度籠型電動機を採用し、3項の本電動機の特徴の項にあるように慣性モーメントを減少して起動時間を短かくしかつ起動電流を少くして、しかも起動回転力を大きくする点を考慮して設計し、今回の試作のごとく籠型電動機の本質的欠点を克服すれば、構造は簡単で保守、点検も容易、しかも制御装置が簡単となり、全体的に安価となつて交流電動揚貨機として最も適切なものであると考える。

8. 今後の計画

今回のものは3t×30mのものであるが、この試作をもととして定格3t×36m定荷で約110mのものの計画を進めている。

また5トン揚貨機に対しては平歯車による切換方式とし5t×22m, 3t×36mの二重定格とすれば5トンに対する速度は多少低くなるが、實際上5トンの荷重を吊る場合はあまりないから、電動機の出力をおさえて、しかも5トン揚貨機としての性能を発揮せしめることができる。

3トン揚貨機に引続き、本方式による5トン揚貨機の計画を進めている。

9. 機械部分の特長

- 減速装置はウォーム式を採用しているから音が騒しくない。

ウォームはニッケルクローム鋼を使用し歯の部分は高周波焼入を施し、適当な硬度に調質してある。ウ

ウォームホイールの歯部は良質の磷青銅を用い、車体に焼嵌するとともにハメアイ部分はネジ止めして強固な一体としてある。

これにより、歯の部分摩擦抵抗および磨耗は極度に少く、なおかつ歯にはクラウニングを施し嚙合面への油の吸込を容易にし、歯切後、シェービングにより両者の完全嚙合を期しているの、動力の伝達はききめて円滑に行われ、音響も少く効率もスパーギヤに劣らない。

歯車圈は鑄鉄製で内面は十分に掃除した後耐油塗料が塗布してある。

給油は油槽式になつていたので嚙合面への給油はつねに完全に行われ、放熱面積も十分にとつてあるので過熱することはない。

- ② ウォーム軸ベアリングにはテーパーラベアリングとローラベアリングを使用し、効率の向上を期している。

- ③ ウォーム軸とモータ軸との連結にはフレキシブルカップリングを用いた。

これによりモータの取付取外しの作業は楽となり衝撃力の吸収に役立つ。

フレキシブルカップリング用ゴムとしては特殊構造のものを採用しゴムの摩耗を絶無にして、しかも伝達力の強大なようにしている。

- ④ モータ、ブレーキおよびブレーキマグネット冷却用としてとくにファンを設けた。

ファンモータは取付取外時には、蓋とともに台板内に容易に出し入れができ、かつ完全に水密になつてゐる。

- ⑤ ブレーキはシュータイプ式を採用し、強力なマグネットにより確実に作動する。

構造は新規設計にて台板内にブレーキ全体が収まり外観は非常にスムーズになつてゐる。

ブレーキの各部調整は上部の蓋を取外すのみで簡単に調整でき、またブレーキライニングの取かえも同様上部窓から簡単に作業できる。

ブレーキ装置は完全な密閉室中にあり、海水浸入のためにマグネットのショートやブレーキライニング

の硬化、ピン類の錆び付がない。

前述のとおり、ブレーキは冷却風に曝されているから過熱の事故は全くない。

荷役中の停電等の事故に具えてハンドレリーズハンドルが設けてある。

- ⑥ 巻胴は鑄鋼および硬質鑄鉄を使用しており、永年の使用にも摺り減ることはない。

主巻胴のロープ止金は特殊構造にて取付取外容易、また巻き重ねて行くにつれ、その部分が邪魔になることがないように考へてある。

また主巻胴には新案のクラッチ装置が設けてあり、これにより副巻胴と主巻胴とは別個に運転でき、綱取作業の際主巻胴のロープを一々取外す必要がない。実際に本装置を使用すれば荷役作業段取の能率が増す。

なお本クラッチ装置はとくに掛外し容易なるよう構造に意を払うとともに、嚙合状況を指示する目盛板を設け取扱に安全を期している。

- ⑦ ドラムカバーを設けた点

遠隔操縦を採用するので、ドラム外へロープが外れて巻き付き危害を招くのを防止するため、ドラムカバーを設けた。カバーはとくに取外容易なるよう軽量の耐蝕性アルミニウム合金を使用している。

ウインチは甲板上に設置される必要上、外観の美的なることもまた必要の一要素であるがこれにより形態に一段の精彩を誇つてゐる。

- ⑧ そのほか設計上とくに注意してある点としては

- a. 機械全体が頑丈で寿命が長いこと。
b. 各部は完全な全閉水密型にして、つねに開閉する所は手軽に操作できるよう細心の注意を払つたこと。

- c. 各種安全装置を施し不馴れた人が扱つても破損、危険のおそれが無いようにしたこと。

- d. 分解組立容易なるようにとくに意を払つてあること。

これには十分な工具を用意してある。

- e. 上記各項に申述べたように保守点検が非常に容易なこと。

超音波探傷器による鋼の品質判定について

住友金属工業株式会社製鋼所

河井泰治・田坂鋼二・辻本信一

On the Quality Testing of Steel Products by Super-Sonic Fault Locator

By Taiji Kawai, Koji Tasaka, and Shinichi Tsujimoto

Sumitomo Metal Ind. Co. Steel Works, Osaka

Abstract

In order to perform "Non destructive testing" for various kinds of steel products and semi-products the super-sonic method has been successfully applied in our works. Some of the results obtained both in workshops and in laboratory are summarized as follows.

1. Using wave frequency of 3 Mc, hair cracks, flakes and other minor defects lie inside of large forgings are easily located. For the smaller special steel forged products, it is suitable to apply 5 Mc wave frequency. With the testing results it may be possible not only to determine the quality grade of products, but also to improve the steel making and forging processes.

2. In order to test longer products or coarse grained materials, such as, forged axle, cast steel blooming roll, ingot and other materials as cast or as forged, it is available to use 1—2 Mc waves.

3. Effects of austenitic grain size, heat-treatments and cast structures on the damping effect of super-sonic wave were studied in our laboratory, and with these results we found out that we can evaluate the structure or quality grade of the material to a certain degree.

1. ま え が き

鋼材その他の金属材料の無破壊試験方法としては従来より X 線, γ 線の如き放射線透過法, あるいはマグナフラックス等の磁気探傷法が実用化されているが, これらの方法はいずれも被検査材料がきわめて限られた範囲のものにのみ応用可能であるという憾みがある. すなわち前者は形状がきわめて簡単で厚さの薄いものに限ら

れ, 後者は強磁性材料の表面に現われた欠陥以外は明らかに検知し難い. しかるに近時鋼材に対する性能要求が高まるにつれて材料の検査方法においても外部よりする肉眼的もしくは顕微鏡的検査方法, あるいは上述の検査方法によつて欠陥検出を行うのみでは不十分となつてきた. ここにおいて, 上の要求を満たすべく新に超音波探傷器が時代の脚光を浴びて登場した. 本器はすでにアメリカにおいて 1945 年頃より実用化されており, わが国

でも数社において製作され実用化も各所において着々進められつつあり、鋼材無破壊試験方法の有力な武器として次第に成果をあげて来た。しかし実用化の途についてより未だ日の浅い現状においては使用に際して種々注意を必要とする。すなわちまず第一に本器のきわめて鋭敏な探傷性能から、従来鋼材の使用上何等の支障も生じないと認められているような微小な欠陥をも現出して誇大な判断を下し、ややもすれば角を矯めて牛を殺すの弊に陥る恐れ無しとしない。第二に以上とは逆に被検査材料の材質如何によつては重大な内部欠陥の検知がきわめて困難であつた場合もしばしば経験され、かかる材質のものすなわち超音波減衰性の大きなものにあつてはこれら欠陥を見落すことも考えられる。したがつて超音波試験結果の判断はきわめて慎重を期すべきであり、鋼材欠陥部の切断検査を並行せしめ、その性状と超音波図形との関係に対する確な認識をうる必要がある。これは本探傷器法の重要な基礎の一つをなすものであり、さらにまた次々と全国的に本法が実施される傾向に進みつつある現状から、日本学術振興会においてもその必要を認め第

19 小委員会第3分科会超音波探傷法協議会が設置され26 年4 月 25 日第1 回会議が開催され現在迄にすでに3 回の会議を経、本探傷法の基礎的ならびに実用的研究を進めている。

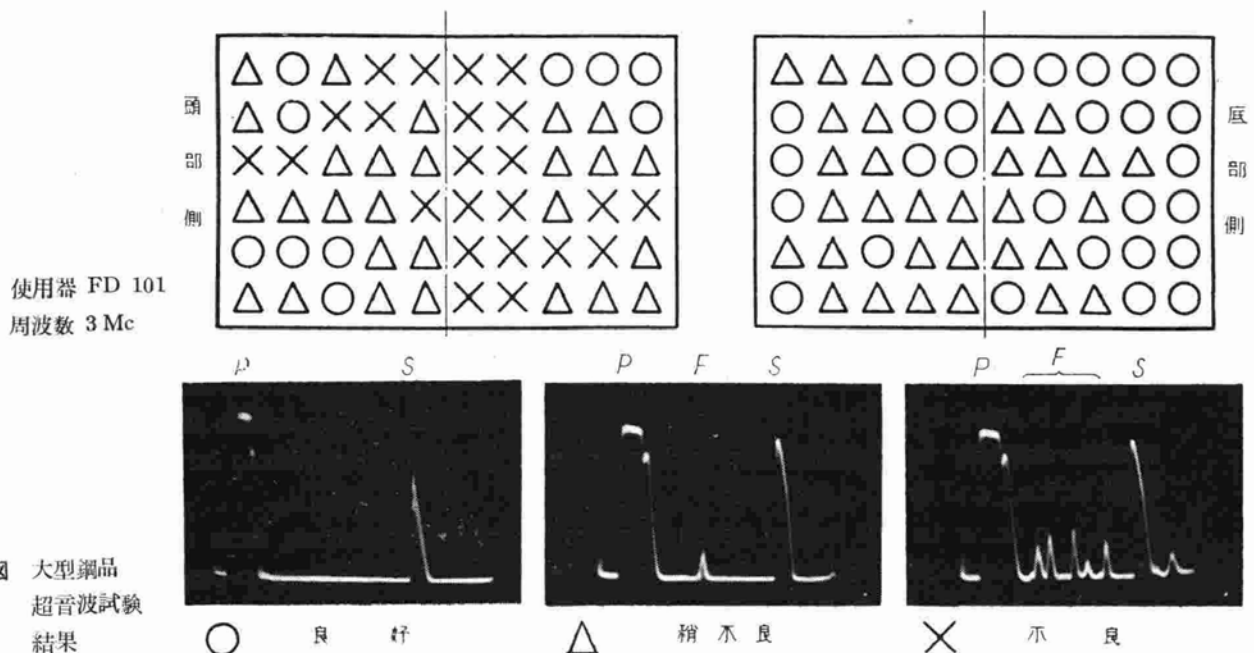
当所においてもすでに昭和 25 年9 月他所に魁て探傷器を入手して以来現在迄約1 年間、随時現場に進出し各種の鍛鑄鋼、圧延品の製品および半成品に対し試験を行い、操作の習熟と共に次第に成果を発揮しつつあり、一方研究室においても超音波探傷により発見せる欠陥の金相的調査あるいは結晶粒度、熱処理その他の判定に興味ある結果が観察されたので以上を総合し、超音波探傷器の応用例につきその概要を述べる。

2. 使用探傷器

使用した探傷器はつきのごとくである。

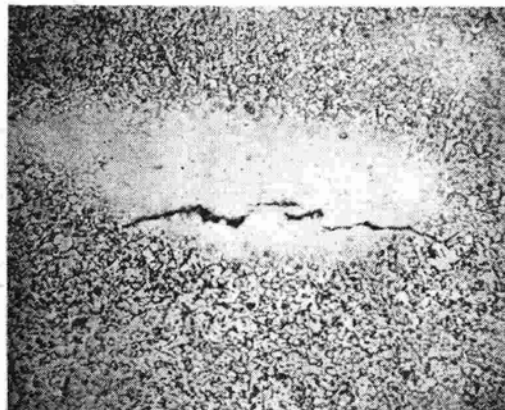
製造者	型式	周波数
三菱電機	FD 101	3.5 および 7 Mc
"	FD 102	1, 1.2, 1.4, 2, 2.5, および 3 Mc

なお超音波探傷法の原理についてはすでに内外の文献に詳しく発表せられているのでここには省略する。

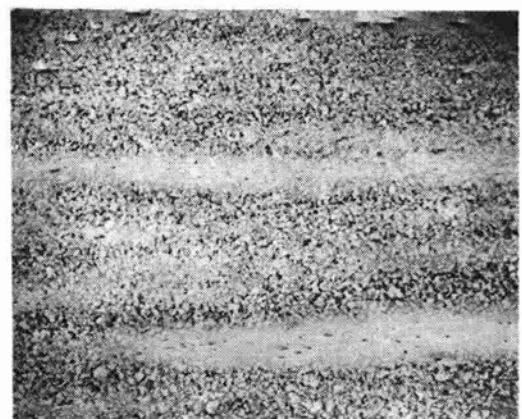


1 図 大型鋼品
超音波試験
結果

Fig. 1.
An example of
defect inspection
on a large steel
forging.



×



Δ

3. 製品、半成品に対する検査例

現在迄に試験を行つたものは各種の大型船用鍛鋼品、外輪、車軸、大小歯車、鍛造用型鋼、輪心、鋤鋼ロール等の中大型の鋤鍛鋼を始め鋼片、鋼塊等であり、重要部品に対しては工程中数回の中間検査を実施し、不良品は努めて切断し、各種の材質試験を行つて欠陥の発生状態を確認し検査規準を作成しつつある。以下超音波探傷器により発見せられた二、三の実例をあげ不良原因を検討した結果を述べる。

ア. 鍛鋼品のゴースト部の欠陥の有無

鍛鋼品のゴースト層の判定は従来サルファープリントの観察によりなされていたが、超音波探傷器を利用し内部のゴースト部の欠陥の有無を発見することが容易に可能である。すなわち毛割等の欠陥が無い場合は 3Mc で何年の欠陥反射が認められず、5 Mc 以上の高周波数で微小な Zig Zag が認められることがある程度であるが、もし微細な亀裂を伴つていれば 3 Mc で明瞭な欠陥反射が認められる。しかして現在迄の結果ではサルファープリントの濃淡すなわち硫黄の偏析の程度と毛割れの有無はほとんど関連がなくむしろサルファープリントで多少偏析の程度は大であつても、塩基性電気炉で脱磷、脱硫された鋼より酸性平炉鋼の方が質的に良好であるといえる。

1 図ははなはだしい不良品について行つた超音波試験結果とこれを切断して欠陥を検討した一例である。すなわち全面について 3 Mc にて超音波試験を行い反射波の

程度により良好○、稍不良△、不良×等の符号を検査箇所に記入し、この結果を総合して判定を行う。この×印の切断試験の結果は顕微鏡組織に示すような気泡偏析が点在しその内部に微細な亀裂が認められる。△印はこれに対してゴースト層に MnS が連鎖状に介在しているが亀裂は認められない。

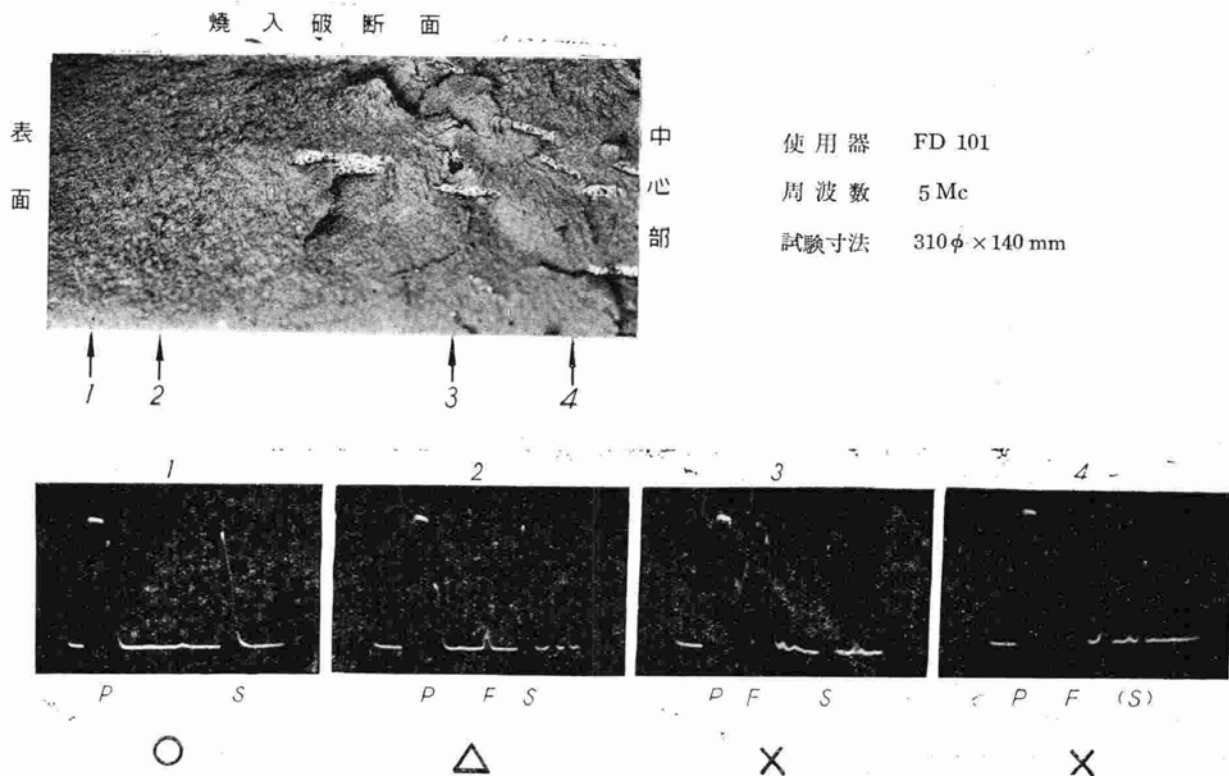
イ. 特殊鋼の白点

2 図は高 $Ni-Cr$ 鋼の鍛鋼品を鍛造後故意に空冷したものの超音波試験ならびに破断面の観察結果を示す。すなわち外周部は何等の欠陥反射が認められないが内部は著るしく欠陥が多く反対面の反射が認められず、破断面の観察とよく一致している。この種の白点は鍛造後の徐冷により完全に除去されることは言を俟たない。

ウ. 車軸の疲労疵検出例

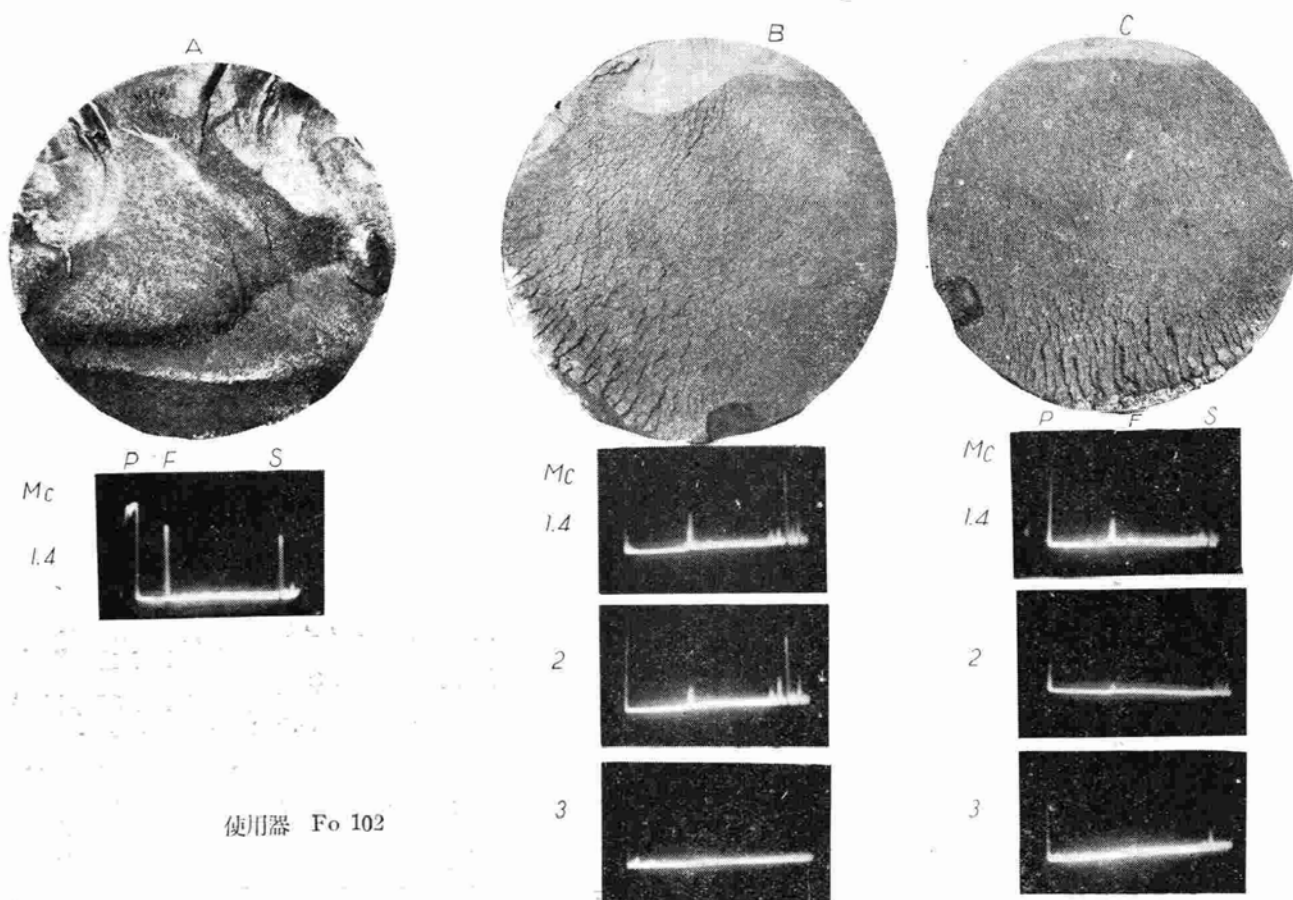
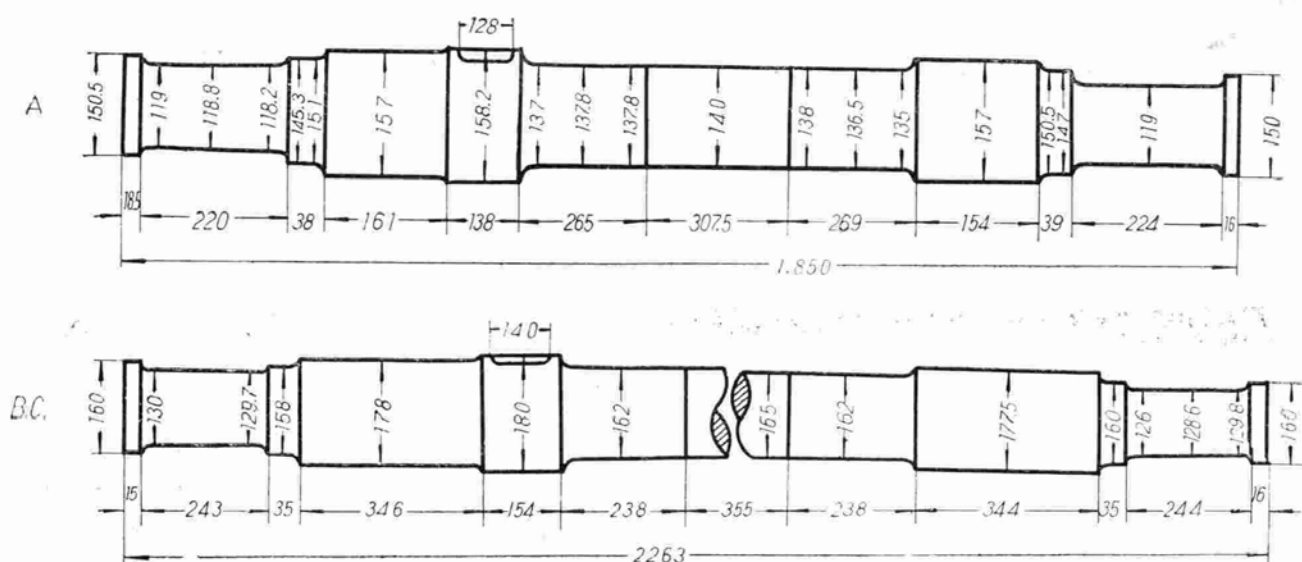
車軸は一般に全長に亘り断面積が一定でなく数カ所に段があり、かつジャーナル端面が却つて面積が小であるので欠陥検出にはかなり熟練を要するが、普通軸と直角の方向に疲労疵が進行し、しかも相当にこの疵が生長してから始めて破断に至るので、定期的に超音波試験を行えば、切損事故を未然に防止することが可能である。

3 図は二、三の疲労疵の検出例を示し疲労疵の発生をきわめて早期に判定し距離目盛によりその位置もかなり正確に検出することができる。周波数は 3 Mc では減衰性が大きて検出が困難な場合が多く 2~1.4 Mc 程度が適当である。これは単に透過性のみならず車軸の形状に対する指向性の相違も大に関係しているからであらう。



2 図 特殊鋼白点検出例

Fig. 2. Super-sonic fault inspection of $Ni-Cr$ steel forgings. Test block was air cooled after forging, then heat treated. Fracture shows many flakes, existing internally.



3 図 車軸疲労疵検査例

Fig. 3. Super-sonic failure inspection of rail road axles. Each fractured section reveals a clear fatigue crack, which was exactly located by wave frequency of 1.4 Mc

エ. 各種の鋼材の欠陥判定に対する周波数の影響

4 図は 29 トン鋼塊のスライサー切断品, 大型鍛鋼品欠陥部および疲労疵のある車軸等に対し周波数を 3, 2, 1.4 および 1 Mc に変化させて観測した結果を示す。

鋼塊の如き粗大な結晶組織に対し 3 Mc では表面に近い微小な巣等の欠陥は知られるが減衰が大で反対面の反射が現われず, パイプの如き内部欠陥の判定ができない。

周波数を低下せしめれば透過性を増し反対面の反射が明瞭に認められ内部欠陥の観察が可能となるが, 微細な

欠陥に対する感度を減じかつ入射波の投入時間を増すので表面近くの欠陥は観察し難い。なお現在の所鋼塊黒皮面では試験が困難であり切断面あるいはグラインダで研磨した面で観察を行っている。

大型鍛鋼品に対しては 5 Mc では結晶粒が微細ならざる限り減衰が大であり, 普通 3 Mc により最も鋭敏な観察をなし得る。さらに周波数を低下すると欠陥に対する感度を減ずる。車軸に対しては 3 Mc で全然不明な小さな疲労疵が 2 Mc で判然と知られる。

4. 超音波透過性および欠陥検出の難易におよぼす表面仕上程度の影響

形状および材質が同一の材料でも超音波入射面の仕上程度が粗くなると超音波可性が大となり、したがって同一の欠陥に対してもその検出が困難となる。軟鋼製丸棒について入射面の仕上程度を種々変えてドリル穴の検出状況、多重反射法による減衰性（後述）の大小を比較した。なお入射面の仕上程度は日本光学製粗さメータにより測定した。5 図に示すように仕上程度が粗くなるにしたがって減衰性は大きくなりドリル穴の検出が困難となるが▽▽迄は十分検出可能である。▽では減衰性かなり大となりドリル穴よりの反射波は著しく小さくなる。へになるとドリルの検出は全く不可能となる。

5. 超音波の減衰性による材質の判定

種々の鋼材より一定厚さの試験板を作り両面を研磨仕上しその片面より垂直に超音波を入射せしめると反対面との間に反射が繰返される。この際超音波のエネルギーは内部の結晶粒界、偏析その他の不連続性により散乱されたがってブラウン管の時間軸に対し繰返反射波が減衰の傾向を示す。もし試験片が一定の厚さ（普通 30mm とした）で一定条件の超音波を入射せしめればその減衰曲線は材料の性状により種々変化する。もちろん現在の超音波試験器では可変条件が多く一定条件をつねに再現することは厳密には不可能であるが、同時に種々の材料について比較することはできる。この性質をその材料の超音波減衰性と仮称し、これにおよぼす結晶粒度、熱処理一次組織その他の影響を調べた。

ア. 圧延外輪の断面についての試験結果

6 図は 30 mm 厚の外輪断面試験片について 3 Mc により各部の減衰性を比較したものである。圧延の儘では鍛練のもととも動いたフランジ部が鍛練の効かない中心部あるいは内側部に比し明らかに減衰性が小であるが、焼鈍すれば大差がなくなる。これは後述のように結晶粒の大きさが大きな影響をおよぼすためでありこの方法により鍛鋼品の各部における鍛練効果ならびに焼鈍効果がある程度評価することが可能である。

イ. 鋳鋼ロールの一次組織の影響

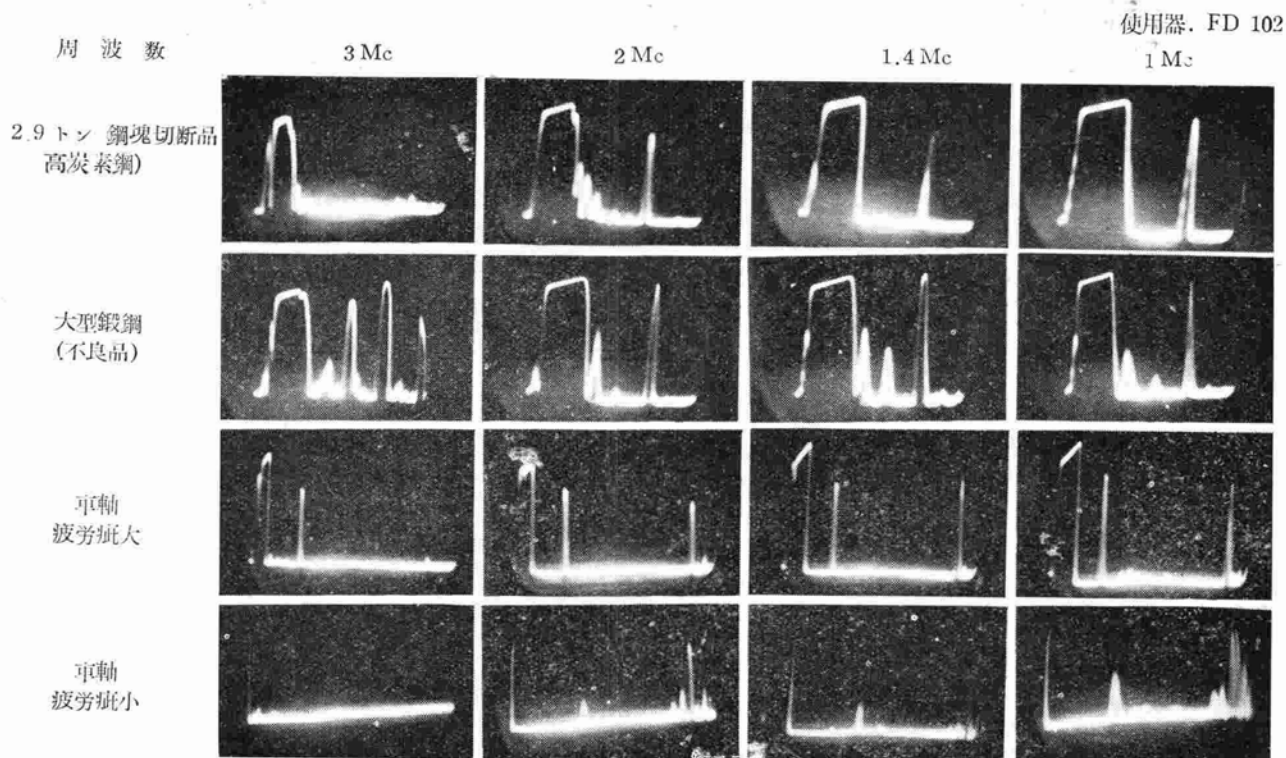
7 図は 350 mm 中特殊鋳鋼ロール焼鈍品の胴部中央断面における減衰性の観察結果であり、緻密な外殻部は内部の自由品部に比しはるかに減衰性が小であることがわかる。

ウ. 粒状黒鉛鋳鉄の黒鉛組織の影響

8 図のように黒鉛の球状化が完全なものは不完全なものに比し減衰が小であり、片状黒鉛の普通鋳鉄は減衰が著しく大である。減衰性の順位は多数の試料において球状化のそれと非常に良く一致した。この方法により粒状鋳鉄の黒鉛組織の判定が可能である。

エ. オーステナイト結晶粒度の影響

外輪材を種々の温度で焼鈍炉冷し超音波減衰性とオーステナイト粒度を比較対照すれば 9 図の如く焼鈍温度の上昇に伴い結晶粒が成長し減衰が大となることが知られる。ただし焼入硬化すれば一例をあげたように著しく減衰が小となる。粒度と反覆反射回数との関係を図示すれば 10 図のように硬度がほぼ一定であれば同一材料については一定曲線上に乗ることが知られる。



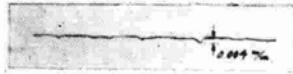
4 図 種々の供試品に対する各周波数の性能比較

Fig. 4. Effect of wave frequency on testing several kinds of materials.

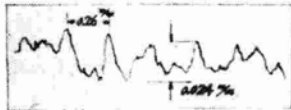
仕上程度

粗

W



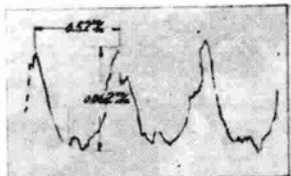
W



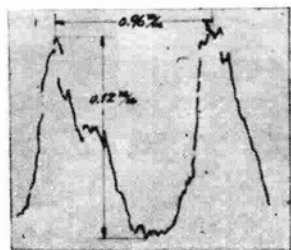
V



V



~



直接波

使用器 FD 112. 周波数 3 Mc

試料寸法	ドリル穴	穴の位置
(A) 80φ × 200	2.5φ	上部より 150 mm
(B) 80φ × 100	2.5φ	// 70 mm

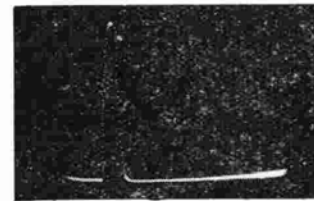
5 図 超音波透過性におよぶ表面仕上程度の影響

Fig. 5. Damping effect of super-sonic waves due to degree of surface finish.

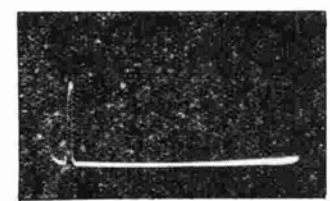
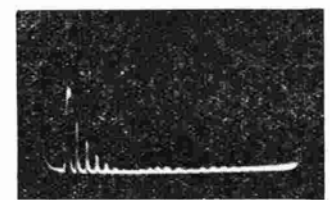
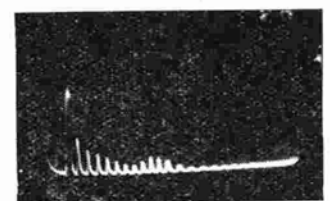
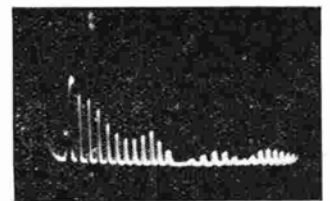
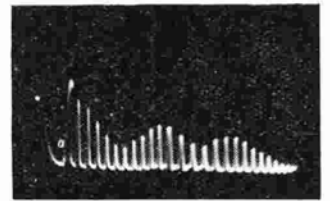
オ. 焼入, 焼戻および焼入冷却速度の影響

30 mm 厚の外輪材を 950°C より種々の冷速で硬化せしめたもの, および油冷したものを種々の温度で焼戻したもののについて硬度と反覆反射回数の関係を図示すれば 11 図の如く, 不完全硬化のものは減衰が大で硬度の上昇と共に透過性を増す. 一方油冷したものを焼戻すれば硬度は焼戻温度に対応して低下するが, 減衰性はわずかに増加するのみではほぼ一定である. すなわち同一硬度であつても不完全硬化のものは調質されたものに比して減衰が大きい. この性質を利用して材料の熱処理状態を判定

A ドリル孔検出状況



B 多重反射減衰性



することがある程度可能である. 特殊鋼の熱処理においても同様な現象が認められる.

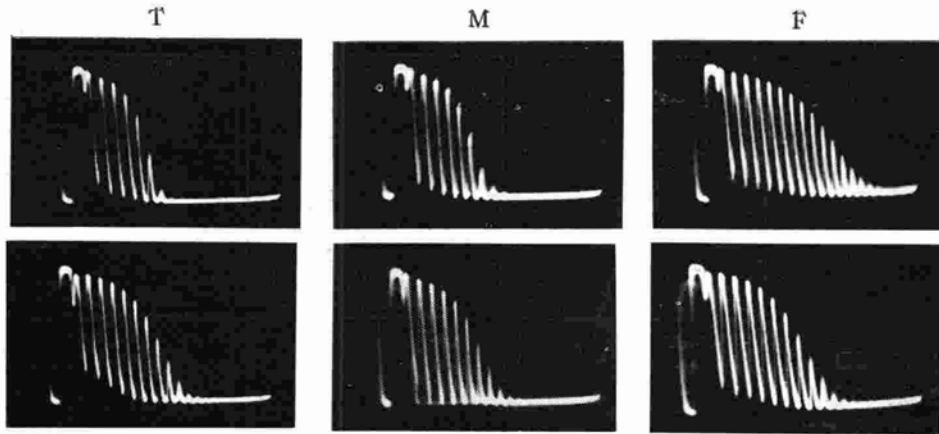
以上の減衰性に対する周波数の影響はいうまでもなく周波数が大である程敏感であり, 材質の差異が顕著に観察される.

6. 結 言

ア. 各種の鍛鋼品の焼鈍および熱処理品に対しては 3 Mc, 比較的小物の熱処理に対しては 5 Mc の周波数を使用して欠陥の有無, 程度および位置を鋭敏に観察しうる.

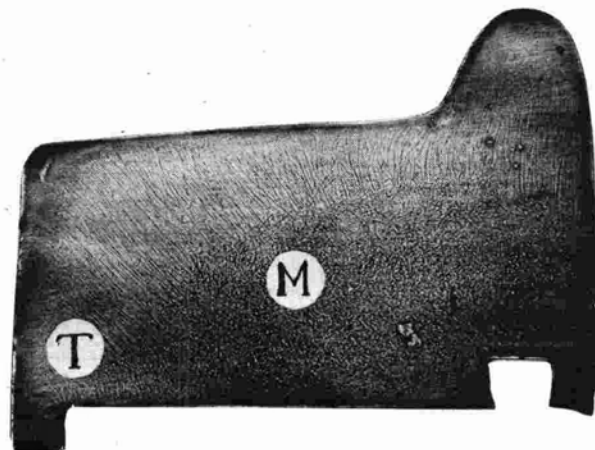
圧延のまま

850°C 焼鈍



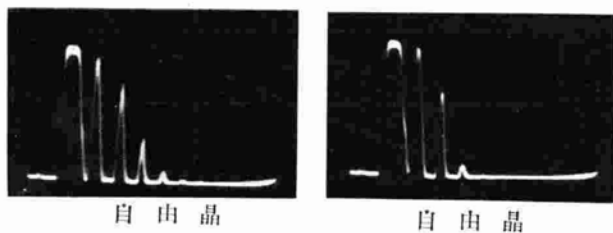
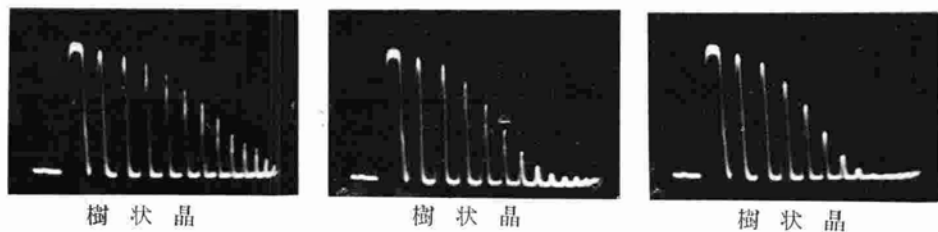
6 図 圧延外輪の各部における
超音波減衰性の比較

Fig. 6. Damping effect of super-sonic wave at several portions of a steel type.

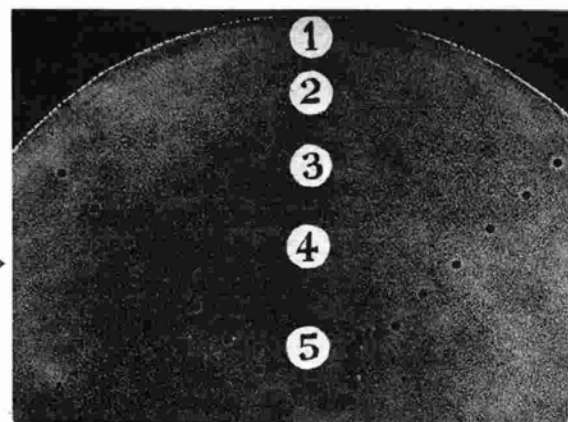


使用器 FD 101
周波数 3 Mc
試料の厚さ 30 mm

使用器 FD 101
周波数 3 Mc
試料 345 mm ϕ $\times$ 49.5



胴部中央部切断面マクロ組織→



7 図 高炭素特殊鋼ロールの一次組織
と超音波減衰性との関連

Fig. 7. Relation between primary structure of a cast steel roll and damping effect of super-sonic wave.

イ. 車軸の如き長尺物あるいは鍛造のままの鋼片等は比較的減衰が大であるから 2 Mc 付近の周波数が適當である。

ウ. 鋼塊および大物鋳鋼品でも表面状態が良好であれば 1~2 Mc である程度試験が可能である。

エ. 検査面の仕上状態は▽▽以上が適當である。▽では減衰大となり欠陥の検査はやや困難となる。△になると全く試験不可能である。

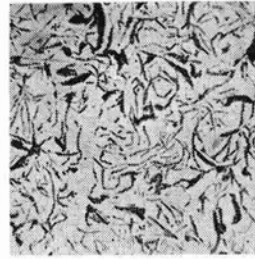
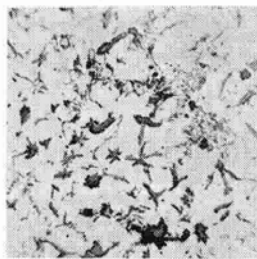
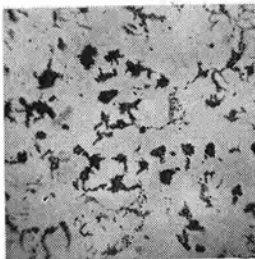
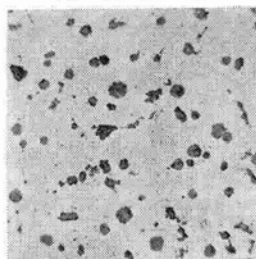
超音波探傷器による鋼の品質判定について・河井・田坂・辻本

球状黒鉛

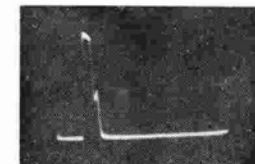
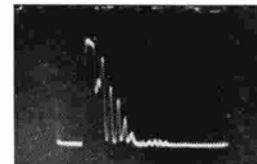
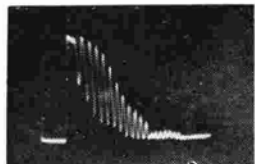
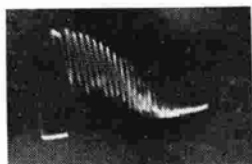
不完全球状黒鉛

擬片状黒鉛

片状黒鉛



使用器 FD 101
周波数 3 Mc
試料の厚さ 30 mm



8 図 粒状黒鉛鋳鉄の黒鉛組織と超音波減衰性との関連

Fig. 8. Influence of graphite shape of nodular or ordinary cast iron on the damping effect of super-sonic wave.

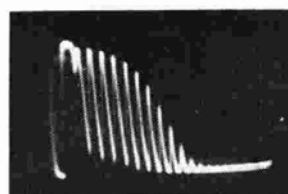
9 図 高炭素鋼の焼鈍温度の粒度および超音波減衰性におよぼす影響

Fig. 9. Influence of grain size of a high carbon steel annealed at various temperature on the damping effect super-sonic wave.

使用器 FD 101
周波数 3 Mc
試料の厚さ 30 mm

焼鈍 850°C G=6.5

950°C G=5.5



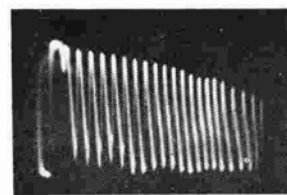
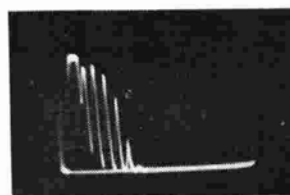
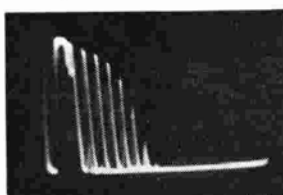
B.H.N 234

241

1, 150°C G=4.0

焼鈍 1, 250°C G=2

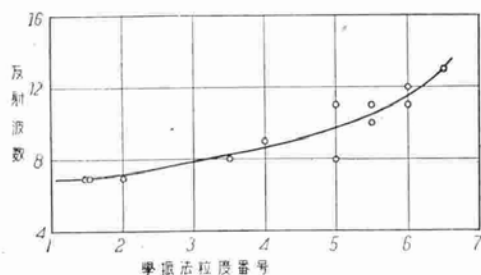
焼入(油) 950°C



B.H.N 229

229

354



10 図 結晶粒度と反対波回数との関係

Fig. 10. Relation between anstencitic grain size and number of successive super-sonic reflections.

オ. 中間検査により不良品の工数を節減するのみならず、熔解、鍛造、熱処理等の作業経過と超音波試験成績とを対照して検討すれば、欠陥発生原因を把握し製造工程の改良に大きな役割を演ずることができる。

カ. 一次組織の不同、鍛練効果、結晶粒の大きさ、熱処理の良否等は限定された条件下で超音波減衰性の差異により判定しうる。また粒状鋳鉄の黒鉛組織、チルド鋳物のチル層、工具鋼における炭化物の分布等もある程度の判定がなしうるものと思われる。

なお本試験の実施に対して新三菱重工業有馬技師およ

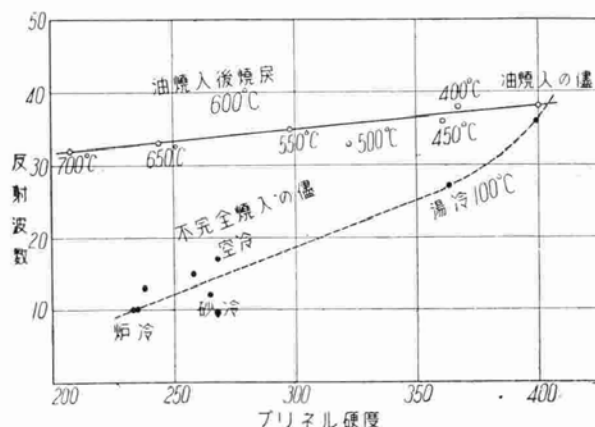


Fig. 11. Relation between brinell hardness caused by various heat treatments of high carbon steel and number of successive super-sonic reflections.

び三菱電機研究所尾島試作課長、近藤技師より多くの好意あるご示唆を戴いたことを厚く御礼申上げる次第である。

250 kV 117,000 kVA 超高压用変圧器

伊丹製作所

田 宮 利 彦 ・ 村 上 有

250 kV 117,000 kVA Transformer

By Toshihiko. Tamiya. Tamotsu. Murakami.

Itami. Works

Abstract

The three phase 250 kV, 117,000 kVA capacity transformer which is installed at the Hirakata Substation, the receiving end of the 250 kV Shin-Hokuriku-Kansen is the highest voltage and also the largest capacity unit manufactured in our country. Besides being the highest voltage and largest capacity, in this unit is incorporated many new and special characteristics which may be described as follows. One of the special feature being that in this unit the neutral point is solidly grounded, an experience never yet practiced in our country. Another feature that may be of interest is in the method of insulating the high tension side coils. Here a combination of graded and reduced insulation is adapted. The transformer is a form-fit type and as a consequence, the weight, the oil required, and the floor space occupied by this unit is very much less than a conventional type. For the assembling of the unit a crane of 15 ton capacity suffice.

Again, for the drying a new method of induction heating was practiced.

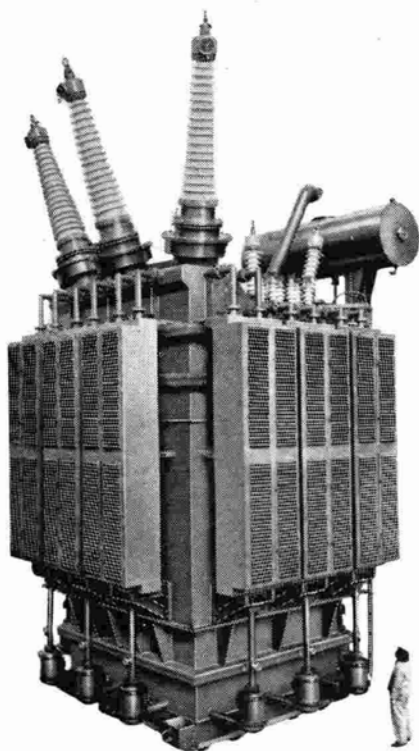
This new record making unit was completed at our Itami works and very satisfactory test results were obtained. It is the purpose of this paper to introduce this record making transformer giving detailed descriptions with photographs and literatures for the interest for these concerned.

1. ま え が き

従来 140 kV 級送電を最高としたわが国電力界において、一躍超高压 250 kV として計画された関西電力株式会社の新北陸幹線はすでに一部を残して完成を見ており、この受電端枚方変電所にはわが社伊丹製作所において昨年 12 月に完成された三相 250 kV 117,000 kVA 変圧器 2 台が設置された。

新北陸幹線は富山県新愛本変電所を起点とし、途中成出発電所を経て大阪近郊の枚方変電所に至る 320 km の

送電線で、その送電々圧は現在世界最高の Hoover Dam 287.5 kV に次いで高く、中性点接地方式としてわが国初めての直接々地方式の採用を見た画期的な送電線である。したがってこの受電端に用いられる 117,000 kVA 変圧器も電圧および容量の点で記録品であるばかりでなく、以下に述べるような幾多の特筆すべき特長を有するものである。数々の新方式を採り入れたこの変圧器に対しては、設計、工作に万全の考慮を払い、受注以来わが社伊丹製作所技術陣の総力をあげて製作に邁進した結果、きわめて好成績裡に完成して、電力界に多大の



1 図 完成した 117,000 kVA 変圧器

Fig. 1. Completed 117,000 kVA transformer, 3 phase, 60 cycles, 250 kV FOA shell Form-fit construction.

寄与をすることができることは喜びに堪えない。

1 図は完成した変圧器の外観を示す写真である。

2. 定格および重量その他

三相	60	～	外鉄 Form-fit 型	送油風冷式
電圧	一次	250—237.5—225 kV	△	
	二次	77 kV	△	
	三次	10.5 kV	△	
容量	一次	90,000 kVA		
	二次	99,000 kVA		
	三次	45,000 kVA		
等価容量		117,000 kVA		
一次	中性点直接々地	低減絶縁および段絶縁方式		
重量		195,000 kg		
油量		48,000 l		
総重量		238,000 kg		
外形寸法	幅	5,900 mm	奥行	6,800 mm
	高さ	10,770 mm		

3. 構造

ア. 絶縁方式

絶縁方式としては外鉄型の標準絶縁構造であるサージブルーフ型としているほか、とくに中性点直接々地の利点を発揮した方式を採用している。

従来わが国の高電圧送電線においては通信線への誘導

障害の見地から中性点直接々地方式は禁止されており、高抵抗または消弧線輪接地がもつばら用いられている。したがって変圧器の絶縁は線路側より中性点に至るまで同一の絶縁を施したいいわゆる **Full Insulation** が採用されている。今回の新北陸幹線においてはアメリカでもつとも多く用いられている中性点直接々地方式が初めて採用されたので、この変圧器に対して次に述べる低減絶縁および段絶縁を実施することができた。

(1) 低減絶縁方式 (Reduced Insulation)

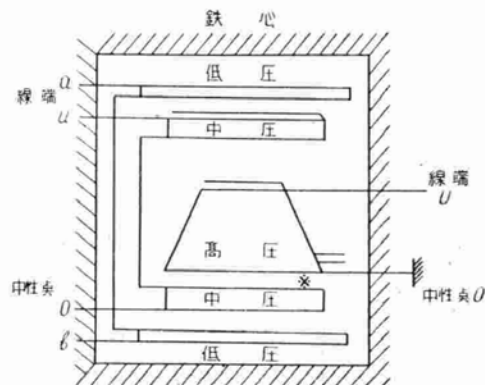
新北陸幹線は送電々圧 250 kV なるにかかわらず、中性点直接々地式を採用したことによりこの変圧器の絶縁階級は一級下の 200 号としたいいわゆる低減絶縁方式を採用している。

中性点を直接々地すれば一線地絡時に健全相の電圧上昇が小さく、したがって許容端子電圧の低いすなわち制限電圧の低い避雷器を採用することができ、これと協調して変圧器の絶縁階級を低減し得るのである。

この低減絶縁はアメリカにおいて P. Sporn 氏がつとに提唱している方式であつて、1934 年に American Gas and Electric Co. が 138 kV 系統で 115 kV 級変圧器を使用したのが最初で、最近 Grand Coulee 発電所で 230 kV 変圧器に 196 kV 絶縁を採用している。アメリカにおいても低減絶縁は直接々地系統の最近のプラクティスで次第に普及せんとする傾向にあるが、この方式がわが国初めての超高压直接々地系統に対して、十分な討議が行われた結果採用されることになったもので、低減絶縁により節減される建設費はきわめて大きい。

(2) 段絶縁方式 (Graded Insulation)

この変圧器の高圧中性点は直接々地され、その対地電圧はほとんど上昇しないので、中性点の絶縁は 10~30 kV 程度で差支えなく、また外鉄型サージブルーフ構造においては線路端から衝撃電圧が侵入した場合、巻線各部の内部電位振動はきわめて小さいので、線路端子から中性点に至るに従い次第に絶縁を低下させたいいわゆる段絶縁を施すことができた。ただし中性点の絶縁は後述するように絶縁試験のためとくに 70 kV 級としている。



2 図 コイル 1 相分 1 配列 (※印箇所 70 kV 級絶縁)

Fig. 2. Arrangement of coil (1 phase).

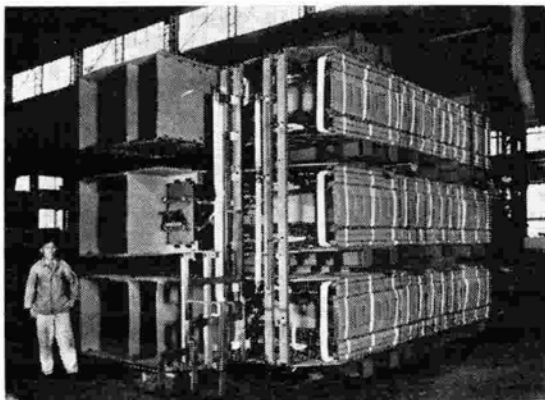
2 図は変圧器の巻線配列と段絶縁の状況を示す略図で高圧は8枚のコイルよりなりその1枚1枚は大きさが異なっており、中性点に近いコイル程その形状が大きくなり、取囲まれた鉄心との間の絶縁距離が小さくなっている。外鉄型変圧器においては段絶縁をきわめて容易に、かつ有効に実施しうるもので、低減絶縁と相俟つて重量、油量ならびに価格を大幅に減少せしめている。

なお最近当社で外鉄型変圧器に実施している中性点絶縁低下は上記段絶縁とは異なり、巻線の内部は Full Insulation 変圧器と同一であり、中性点側の絶縁のみ低下した方式で高抵抗または消弧線輪接地の場合にも適用しうるものである。

(3) サージブーフ構造 (Surge Proof)

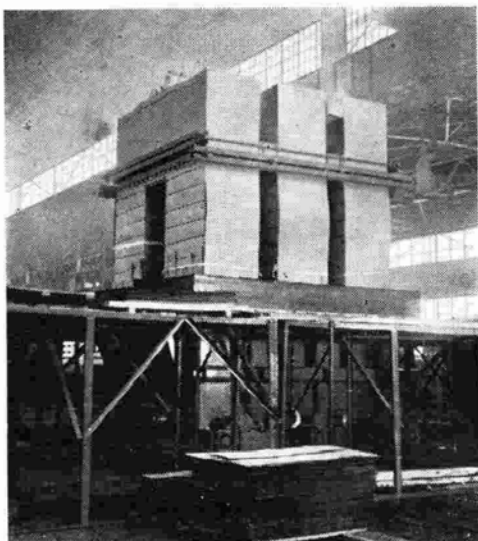
外鉄型変圧器においてとくに対雷強度を強化したいいわゆるサージブーフ型については、従来しばしば発表されているので詳細は省略するが、要するに内部電位振動を抑圧して衝撃電圧に対し割合に少ない材料で十分合理的な絶縁をもたせたものである。

3 図に組立を終った3相分の巻線を示す。



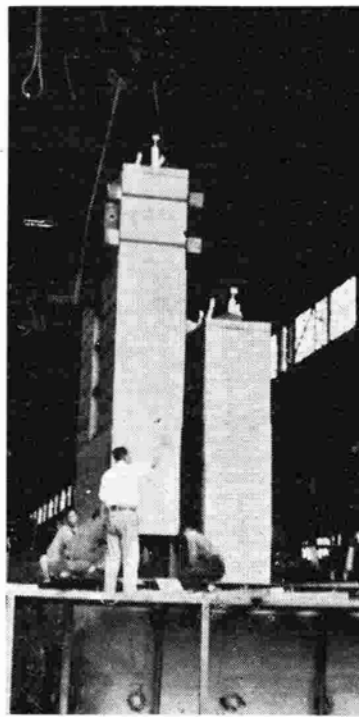
3 図 巻線組立 (3相分仮組立状態)

Fig. 3. Complete coil and insulation assembly.



4 図 鉄心積み途中の 117,000 kVA 変圧器

Fig. 4. Assembling the punchings around the coils.



5 図 コイル立て

Fig. 5. Setting the coil and insulation assembly in place in the bottom section of the tank.

イ. タンクの構造—Form-fit Tank

タンクは外鉄型変圧器独特の Form-fit Tank を採用している。Form-fit とはその名の示すとおり、変圧器のタンクを中身にぴったり適合するように造つたもので、外鉄型変圧器の特長を極度に発揮した最新型構造である。

外鉄型変圧器の中身の水平断面は大体正方向に近い短形であつて、コイルは絶縁物によつて完全に包まれたらうと鉄心に囲まれているので、外力をうけて損傷する心配は全然なく、また絶縁上の距離は全く不要である。従来の外鉄型変圧器において鉄心を締めるために上下端枠間に用いていた鉄心締付ボルトは省略せられ、鉄心はタンクの内側に溶接された溝型鋼によつて上部から押えて締付られる。したがつて中身すなわち鉄心とタンク内側とは単に組立上の余裕と油溝の寸法があればよく、この間隙は極度に縮小されている。

117,000 kVA 変圧器のタンクは上中下三つの部分に分れており、下部タンクが同時に鉄心とコイルを支える下部端枠および脚を兼ねている。この上に絶縁組立を終つたコイルを直立し、コイルの周囲の端枠を兼ねた下部タンクの上に鉄心を積み(4 図)、タップ切換器などを取付け中身組立を終つた後、中部タンクと上部タンクとを上部から中身のクサビに接して摺り降すようにして被せ、各タンクの接合部分を溶接している。このように本体は下部より順次に組立てられるので、従来の変圧器のように中身全重量を吊つてタンクに納める必要はなく、最大吊上重量としてはコイル 1 相分の 15 トンに過ぎない。(5 図)

上述の構造より明らかなように Form-fit 型を採用したことにより、重量、油量および外形寸法の減少は著しく、とくに油量は送油風冷式の採用と相俟つて 48,000 l という少量で、これは普通型にした場合約 80,000 l となるのに比べて 40 %も節減されている。

タンクが全溶接構造となっておりパッキンを使用しないことも Form-fit 変圧器の特長で油洩れの心配がないばかりでなく弛む箇所がないから締付直す必要がない。もちろん蓋上の金管取付部、タップ切換器部分およびマンホールカバーなどは従来どおりパッキンを使用しているので、マンホールから変圧器内部に入つて套管のリード接続、タップ切換器の点検などを行うことは普通型と変りない。なおこれらのパッキンとしてはもつとも優れた特性の耐油性人造ゴムを原料としたコルクネオプレンを使用しているから耐久力、大で絶対に油洩れがない。

Form-fit 変圧器はすべてサージブルー型絶縁構造を採用しているの、商用周波電圧はもちろん、衝撃電圧に対して絶対破壊しない確信を有するものであるが、もし万一事故が起つて中身を点検修理する必要がある場合は、タンク接合部の溶接箇所をガスまたは air chisel で切断して簡単に分解することができる。この変圧器においては工場組立に際して一度溶接完成し、試験を終了して後溶接を切つて分解輸送を行い、現場組立にてふたたび溶接を実施した。

この変圧器はセルフタンクで真空乾燥ならびに真空注油を行うため、とくに真空に対する強度を大ならしめる必要があつたが、下部タンクは中身全重量を支える下部端枠を兼ねているので、その方から十分の強度を要し、中部タンクは外圧に対して鉄心により支えられているので真空に対する強度が大であり上部タンクのみ補強すればよい訳で、形状は長方形となるのかかわらず比較的簡単な外部よりの補強により十分な真空強度を保たせることができた。すなわち真空注油の際には使用した真空ポンプの能力いつばいの 7 mm Hg まで真空を引いた。

ウ. 冷却方式

冷却方式としては大容量変電所用変圧器として最適の送油風冷式を採用している。1 図の外観写真に見られるように、送油風冷式冷却器 12 組が直接変圧器本体に取付けられ、このうちの 1 組は予備となつている。各冷却器は 12 尺 U フイン管放熱器 1 個、3 HP 送油ポンプ 1 個および $1/2$ HP 送風機 8 個より成つている。U フイン管放熱器は送油風冷式の場合にわが社の標準として採用している構造で、引抜鋼管の周囲に銅線を鎖状に巻きつけたうえ、亜鉛メッキして相互に密着せしめた放熱管を従来の放熱管の代りに上下のヘッダに多数取付けたものである。このようにすれば放熱面積は著るしく増加するうえに、送風機によつて風を吹きつけば針金の錯雑した配列によつて流れる空気を掻き乱していわゆる乱流を起すので、熱気のフィルムを除去して冷却効果が他の型に

比べてはなはだしく大きくなるものである。送油ポンプは電動機とポンプとが一体となつて同一ケーシング内に納められ、完全に全閉型となつていたので、軸の部分から油の洩れる心配がなく、取付も変圧器タンクに直結できて床面積が節減されている。送風機は放熱器前面に直接取付け放熱管の油流と直角に送風するようになつており、屋付用であるが外界からの異物を避けるために特別の鑑戸を設けた送風機箱に納められている。

上述のように冷却器を変圧器本体に直接取付けているので、床面積を少くし、かつ組立も容易になつている。また分割型としているので、送油ポンプおよび送風機の運転に対する安全度は高い。すなわち 1 個か 2 個の送油ポンプあるいは数個の送風機が停止しても全冷却効果にはほとんど影響ない。ただ停電による送油ポンプまたは送風機全停の場合には、冷却効果が激減するから連続運転能力はないが、油の自然対流はポンプを経て自由に行われ自冷として使用できるので、数時間の運転ならば差支えなく、その間に電源が恢復または不良の個所の修理や取替えもできるから負荷を制限する必要はない。

送油ポンプおよび送風機の運転停止は配電盤室で行うことができ、送油ポンプおよび送風機 1 個毎の開閉器、保護装置としての送油継電器、熱動過負荷継電器、電磁接触器などを取付けた分電盤が、変圧器本体近くの同期調相機補助機室に設けられる。

エ. 窒素封入装置

油の劣化を防止するために当社標準の窒素封入装置を備えている。この装置は高圧窒素ボンベと自動的に開閉する 3 個の減圧弁とより成り、140 気圧のボンベから 3 段に減圧して 0.05 気圧以下とし、コンサーベータ上部に連絡されている。周囲温度の変化および負荷の変動により、この窒素ガスの圧力が 0.05 気圧以下に低下したときは自動的に窒素ガスが供給され、反対に圧力が上昇したときはべつに設けた U 字型水銀管による圧力調整器によつて保持し圧力が 0.37 気圧以上になると大気中に窒素ガスが放出される。したがつて窒素室の圧力は 0.05 ~ 0.37 気圧の範囲で窒素ガスが出入なく密閉された状態となる。

保護装置としては警報接点を有する高圧ゲージおよび低圧正負圧力計（連成計）を付属して、コンサーベータ上部の窒素圧力が 0.4 気圧以上になつたとき、また負圧が -0.10 気圧以下になると警報を発するようになつている。またボンベの圧力が 140 気圧から 15 気圧に低下したときに警報を出してボンベの取替えの準備をせしめる。

コンサーベータ上部に封入された窒素ガス圧力の変化の少い程窒素ガスの消耗が減少するので、コンサーベータもほぼ同容積の窒素タンクを設け、30°C 以内の油温の変化に対しては窒素ガスの呼吸作用を行わないようにしている。

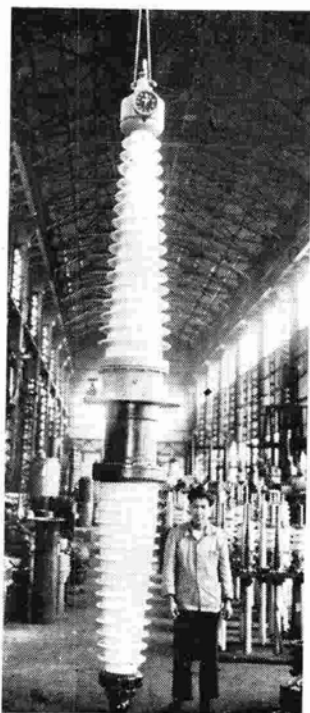
このように窒素封入装置付変圧器では、タンク内には

水分も酸素も入らないので、油は濁つたりスラッジを生じたりしない。したがって油の沂過補給の手間が省け、かつ油の冷却効果および絶縁耐力は長年経つても減じない。すなわち油は最初の新しいときと同じであつて、劣化を完全に防ぐことができ、従来のように油の点検や沂過等の手数が省け変圧器の保守は大変楽になる。

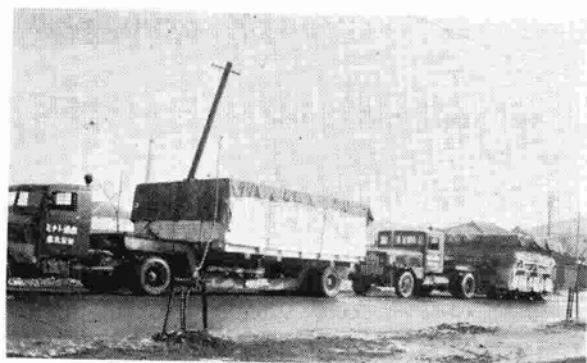
オ. 套 管

高圧線路側套管は 200 kV 用、高圧中性点側および中圧側套管は 70 kV 用の油入コンデンサブッシングを使用しているが、いずれも下部蓄電器部分にも碍管をかぶせて油入完全密封構造とした最新型のいわゆる O 型套管を採用している。200 kV 套管の頭部膨脹室にはダイヤル型油面計を用い油面表示を容易ならしめており、これは套管にダイヤル型油面計を使用した最初のものである。

高圧套管には套管型変流器を付属しているが、取付けに便なるようフランジを 2 段としカバー上で取付けられるようにしている。6 図は 200 kV 套管を示す。



6 図 230 kV 套管
Fig. 6. 230 kV condenser bushing of Type O new design.



7 図 輸送中のコイル (左方) および下部タンク
Fig. 7. Coil and bottom section of the tank during shipping.

250 kV 117,000 kVA 超高压用変圧器・田宮・村上

4. 輸送現場組立および乾燥

ア. 輸 送

変圧器本体は 150 トンに近く、汽車および陸運とも輸送重量の制限から組立輸送はできないので、工場試験終了後解体して、タンクは上中下三つに分け、コイルは 1 相毎に分けて直接工場からいずれもトラックで運搬し、他の部品はすべてトラック輸送した。7 図は木箱に納めたコイルと下部タンクの輸送状況を示す写真であり、

1 表にタンクおよびコイルの荷造重量と寸法とを示す。

1 表

	荷造重量 (kg)	荷造寸法 (cm)
上 部 タ ン ク	9,000	410×300×430
中 部 タ ン ク	10,000	410×300×430
下 部 タ ン ク	10,000	410×210×430
コ イ ル 1 相	20,000	325×180×590

イ. 現 場 組 立

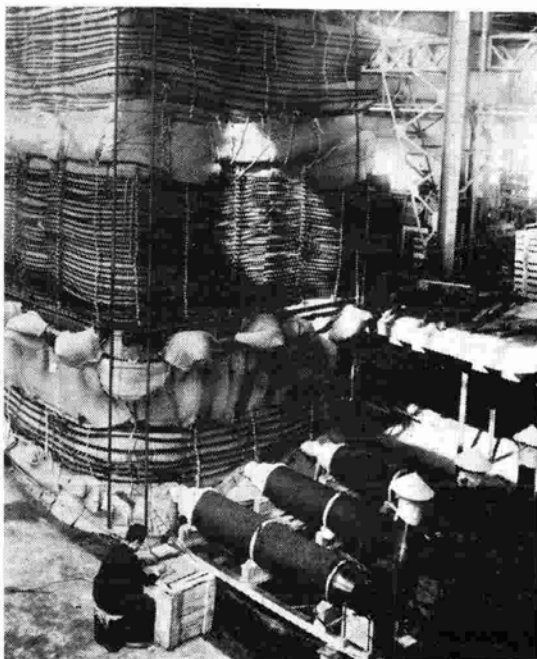
現場組立は組立室内のトラバーサの上で、工場組立の場合と全く同じ方法で行われた。すなわち 3.1 に述べたとおり、本体は下部から順次に組立てられるので、吊上重量の最大はコイル 1 相分 15 トンであつて、組立室に設備された起重機の容量は 20 トンである。このように起重機を小容量にできるために、組立室の建設費はきわめて節減されている。

本体の組立を終つた後その場で乾燥を行い、放熱器、套管、コンサーベータなどを取付けて、トラバーサにより据付場所に運ばれた。

ウ. 乾 燥

従来の変圧器においてはタンク内部の中身の外側に蒸気管を配置して蒸気加熱乾燥を行うのが普通であるが、Form-fit 変圧器ではタンクと中身との間隙が極度に縮小されているので、タンク内に蒸気管を配置することができない。したがって変圧器の乾燥を如何にして行うかは最初からの重大な問題であつて、各種の乾燥法が考えられ慎重な検討が加えられた結果、誘導加熱によるタンク加熱の方式を初めて採用することに決した。その間誘導加熱に関する色々な実験を行い、また伊丹製作所の大電力遮断試験設備用として製作された単相 150 kV 25,000 kVA Form-fit 変圧器に試験的に実施して貴重な経験を得、確信をもつてこの変圧器の乾燥を行つたのである。

この方法は 8 図の写真に見られるように、保温したタンクの上に電線を巻きつけ、これに単相 60 ~ 200 V の電源から 200 A 程度の電流を流して誘導加熱によりタンクを 100 °C 程度に加熱する。これと同時に予備乾燥のときは熱風乾燥を併用したが、この熱風乾燥も従来の方式と異つて同じく誘導加熱を利用した特殊熱風乾燥器を使用して行つた。乾燥器は保温した鋼板円筒の周囲に



8 図 乾燥中の 117,000 kVA 変圧器

(誘導加熱によるタンク加熱と誘導加熱を利用した熱風乾燥用)

Fig. 8. 117,000 kVA transformer in drying combined with the induction heating of tank wall and hot air blast by induction heating.

電線を巻き、これに单相 60~200 V で 100 A 程度の電流を流して誘導加熱により円筒を加熱し、送風機から送り込まれた空気が円筒内を通る間に間接的に加熱されるようにした装置である。その乾燥器 3 台を用いタンク下部から最高 110°C の熱風を送り込み上部カバー上のマンホールを開いて排気した。予備乾燥を終った後、各タンクの接合部を溶接し、熱風を停止してタンクの誘導加熱のみにより真空乾燥を行った。

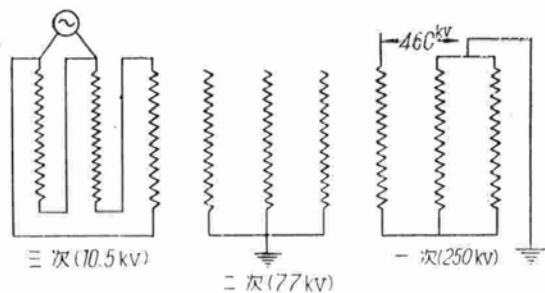
上述の方法により乾燥を実施した結果は予期以上に良好な結果を得、乾燥日数は常規の方法によるよりも短縮することができた。

なおこの乾燥法は Form-fit 変圧器のみならず、一般の変圧器に適用しうるものと考える。

5. 試験結果

ア. 特性

- (1) 銅損 一次 225 kV) 二次, 三次全負荷 75°C で 450.5 kW (保証値 472 kW)
- (2) 鉄損 271 kW (" 275 kW)
- (3) 効率 一次, 二次 90,000 kVA 225 kV 75°C で
 - 100 % 負荷 99.322 % (保証値 99.39 %)
 - 75 % 負荷 99.318 % (" 99.29 %)
 - 50 % 負荷 96.214 % (" 99.19 %)
 - 25 % 負荷 98.716 % (" 98.69 %)



9 図 交流絶縁試験 結線図

Fig. 9. Connection diagram of low frequency insulation test induced from the 10.5 kV side by 180 cycles source.

(4) 電圧変動率

一次, 二次 90,000 kVA 225 kV 75°C で
 力率 100 % のとき 0.975 (保証値 1.0%)
 " 80 % " 7.196 (" 7.5%)

(5) 無負荷電流

1.6 % (保証値 2.3 %)

(6) インピーダンス

一次, 二次 90,000 kVA 基準にて
 250/77 kV 10.05 % (保証値 10.0 %)
 237.5/77 kV 10.33 %
 225/77 kV 10.9 %
 一次, 三次 45,000 kVA 基準で
 250/10.5 kV 8.17 % (保証値 8.2 %)
 237.5/10.5 kV 8.37 %
 225/10.5 kV 8.64 %
 二次, 三次 45,000 kVA 基準で
 77/10.5 kV 2.58 % (保証値 2.8 %)

4. 交流絶縁耐力試験

一次 250 kV 側は段絶縁を施しているので加圧試験は実施できない。したがって 9 図に示すように一次側の二端子を一括して接地し、三次側より 180~1,000 kVA の発電機を用いて励磁して、一次の接地されない端子に 200 kV 級の試験電圧 460 kV を誘起させる方法を取り、それぞれの端子を変えてこれを 3 回実施した。この場合中性点の対地電圧は $\frac{460}{3} = 153$ kV となるので、中性点側の絶縁はこの試験を行うためにとくに 70 kV 級としている。

なおこの試験において三次側から印加した電圧は定格電圧の 2 倍をやや超えるので、一次二次三次各巻線とも誘導試験が同時に行われたことになった。

二次側巻線に対する加圧試験は、充電電流が大きく、350 kV 350 kVA の試験用変圧器では容量が足りないのので、とくに最近新設された大電力試験所の 50,000 kVA 発電機を用い、同じく 150 kV 25,000 kVA 変圧器を過励磁して 160 kV を発生せしめ印加した。

ウ. 衝撃電圧試験

変圧器衝撃電圧試験規格 (JEC-110) にしたがって試験を行った。試験電圧は2表のとおりである。

2 表

	絶縁階級 (号)	全 波 (kV)	截 断 波 (kV)
一 次 巻 線	200	1,050	1,210
二 次 巻 線	70	400	460
三 次 巻 線	10	90	105

二次および三次巻線については従来も変りないので記録を省略し、超高压であり段絶縁を施している一次巻線についてのみ簡単に試験結果を述べることとする。3 表は試験項目と印加電圧を示すものである。

3 表

	試 験 項 目	印加電圧 (kV)	図 番
(1)	U相印加全波試験	1,130	
(2)	V相 "	1,070	
(3)	W相 "	1,070	10 図
(4)	三相一括印加全波試験	1,050	11 図
(5)	U相印加截断波試験	1,240	"
(6)	V " "	1,240	
(7)	W " "	1,240	

中性点はすべて直接々地されている。

代表的なオシログラフとして (3) (4) (6) の場合の印加波形と中性点側接地電流波形を10図ないし 12 図に掲げる。U相印加全波試験の10図電流波形に見られる始めの高周波振動は直列静電容量を経て流れる充電々流で、電圧の立上りの急峻波頭部分によるものである。11図の一括印加の場合にはこの高周波分が減衰している。

試験の結果は全然異常はなく、コロナ音も全く認められなかった。

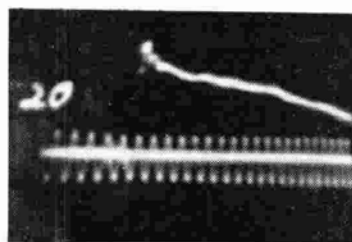
エ. 過渡現象直視装置による試験

(1) 中圧および低圧巻線誘起電圧の測定

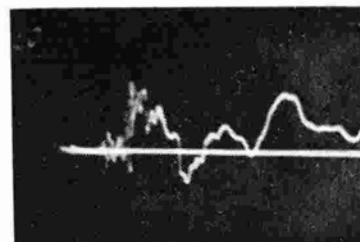
高压巻線に衝撃波が侵入したとき、中圧巻線に誘起される電圧、および中圧巻線に衝撃波が侵入したとき、低圧巻線に誘起される電圧が問題となるので、過渡現象直視装置を使用してこの電圧を測定した。

高压一端印加の場合非接地中圧端子に誘起される電圧は、印加波の 14 % が最大であり、三相一括印加の場合には 17 % が最大であつて、予想外に小さかつた。低圧巻線は高压巻線との間に中圧巻線が配置されているので、高压から低圧への誘起電圧はきわめて小さい。

つぎに中圧一端印加の場合、非接地の低圧端子に誘起



(a) 印 加 電 圧

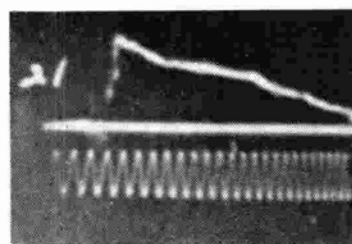


(b) 中 性 点 電 流

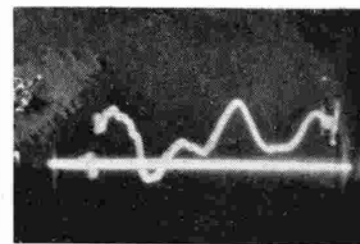
10 図 U 相印加全波試験

Fig. 10. Full wave impulse test applying voltage to the U phase terminal.

(a) applied voltage. (b) neutral current.



(a) 印 加 電 圧

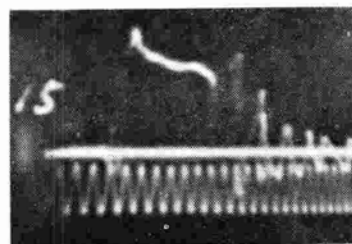


(b) 中 性 点 電 流

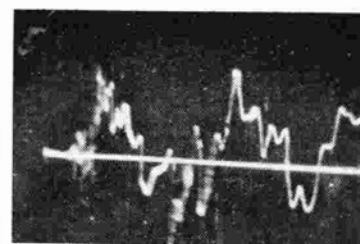
11 図 一括印加全波試験

Fig. 11. Full wave impulse test applying voltage to U, V, W, terminals at the same time.

(a) applied voltage. (b) neutral current.



(a) 印 加 電 圧



(b) 中 性 点 電 流

12 図 U 相印加截断波試験

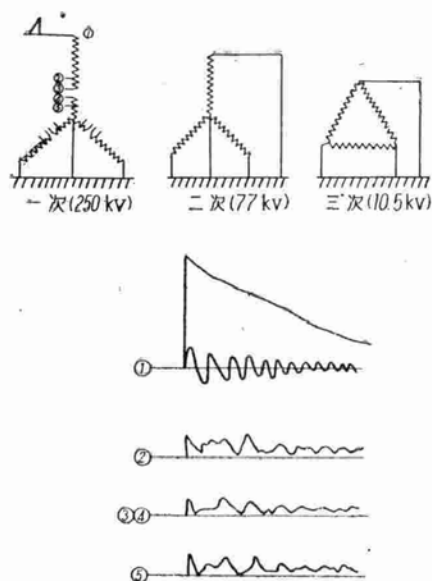
Fig. 12. Chopped wave test applying voltage to U phase terminal.

(a) applied voltage. (b) neutral current.

される電圧は最大 20 % であり、三相一括印加の場合には 32 % に達する。この電圧は低圧の試験電圧 90 kV を超える約 130 kV になるが、低圧巻線は 20 kV 級の絶縁を施しているので問題ない。しかし低圧回路に接続される機器を保護するため 10 kV 避雷器を低圧端子に付属している。なお低圧側に同期調相機が接続されれば同機のサージインピーダンスは小さいのでほとんど接地された形となり、低圧に誘起される電圧はほとんど零に近くなる。

(2) 高压巻線のタップにおける電位振動

高压巻線の線路端から衝撃電圧を印加した場合、タップに現われる電位振動を各種の結線について測定した。13図はその一例を示すもので、U相から印加し中性点お



13 図 巻線内部電位振動

Fig. 13. Transient voltage oscillation in transformer windings.

よび他の二端子を接地した場合、U相の各タップにおける電位振動波形である。同じ結線でタップの接続を変えた場合の各タップにおける最高電圧は 4 表 のようになり、印加波の 23 % が最大であつて巻線内部の電位振動のきわめて小さいことを示している。

4 表

	タ ッ プ ③-④接続	タ ッ プ ③-⑤接続	タ ッ プ ②-⑤接続
タ ッ プ ②	21 %	21 %	17 %
③	19 %	15 %	17 %
④	19 %	23 %	15 %
⑤	17 %	23 %	17 %

なおU V W一括印加した場合に各タップにおける振動波形および電圧最大値は、上記一端印加の場合と全く同じである。

オ. 温度上昇試験

三相変圧器 1 台で一次二次とも 11 結線のため通常の方法では全損失を供給して試験することができないので、次の方法により温度上昇試験を行つた。すなわち一次巻線あるいは三次巻線を短絡し、二次より三相 50,000 kVA 発電機を用いてインピーダンス電圧を加え、二巻線ごとに銅損のみを供給して次の四段階に実施した。

- ①二次三次 45,000 kVA 銅損 111.5 kW
(全損失の 15.5 %)
- ②一次二次 90,000 kVA 銅損 344 kW
(全損失の 48 %)
- ③一次二次 99,000 kVA 銅損 416 kW
(全損失の 58 %)
- ④一次二次124,000 kVA 銅損 721.5 kW
(全損失に相当)

全負荷運転時の油の温度上昇は④の試験により求められ、①②③はそれぞれ三次、一および二次巻線の油と巻線との温度差を求めるために行つたものである。したがつて①②③の場合のそれぞれの最終状態において、抵抗法による巻線の温度上昇を求め、これとそのときの油温度との差を知ればよい。この場合油の温度そのものはほとんど関係ないが、大略④の場合に近づけるために、①においては送風機を全部停止して放熱器 11 個を自冷式として試験し、②は 5 組、③は 6 組の放熱器を使用した。各場合における巻線と油の温度差は全負荷運転時におけるものを求める必要があるので、油ポンプはいずれの場合にも 11 台を運転した。④の場合は予備の 1 組を除いて 11 組の放熱器を使用した。

試験の結果は

一次巻線と油との温度差	8.9°C (39.4—30.5°C)
二次巻線	9.8°C (40.8—31°C)
三次巻線	1.4°C (44.7—30.7°C)
油の温度上昇	32.5°C

したがつて

一次巻線の温度上昇	32.5+8.9=41.4°C
二次巻線	32.5+9.8=42.3°C
三次巻線	32.5+14=46.5°C

温度上昇の保証値、巻線 55°C、油 50°C に比べきわめて低い結果となつた。

三相変圧器でしかも大容量の場合の温度上昇試験はきわめて困難で、通常は上述の②の場合のみを行うのが普通であるが、アメリカで多く用いられているいわゆる短絡法 (Shor Circuit Method) を初めて試みて、上述のようなもつとも完全な試験を実施した。

6. む す び

この変圧器はわが国における最高電圧、最大容量の記録的変圧器であるばかりでなく、既述したとおり段絶縁および低減絶縁方式、Form-fit 構造、誘導加熱乾燥法の採用など、従来の変圧器に見られない数々の新方式を実施した画期的なものである。したがつて設計、工作ならびに試験には各種の困難な問題に遭遇したが、工場をあげて一致協力しこれら難問題を一つ一つ解決して行つた。受注以来工程がきわめて順調に進捗し、上記のような優秀な成績をもつて試験を終了することができたのは、ひとえに図面の作製・材料の手配・工程計画・部品の製作・組立・試験とそれぞれの衝に当たられた方々の非常な熱意と努力の賜で、ここに深く感謝の意を表し、ともに喜びに堪えない次第である。

またこの記録的変圧器製作の機会を与えられた旧日本発送電および関西電力のご関係の方々に深甚の謝意を捧げる。

待望久しかつた超高圧送電の実現を見、電源開発が活潑に行われんとして、今後ますます電力界の発展が期待されているとき、その一端を担うわれわれは製作技術に対する一層の研鑽を約して筆をおく次第である。

★同期機過渡現象の解析(2)

研 究 所

潮 恒 郎

Analysis of Transient Phenomena in Synchronous Machines

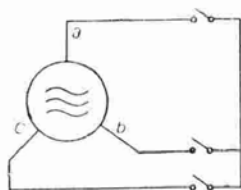
By Tsunerou Usio

Engineering Laboratory

第4章 発電機単機の突発短絡現象

本章においては第1章の応用例として、 (x, y, o) 系により、発電機の突発短絡現象の解析を示す。従来周知の結果の反覆であるが、解析方法の妥当性を確認し、既成の概念を整理する意味で付記するものである。

ア. 三相突発短絡



1 図 三相突発短絡

Fig. 1. Three phase sudden short circuit.

まず次過渡状態のみを考えると、(26)~(28)式を用いる。外部回路条件としては、

$$V=0 \quad i_o=0 \quad \therefore v_o=0 \quad \dots\dots\dots(74)$$

$$\Delta V = - \begin{bmatrix} v_{ox} \\ v_{oy} \end{bmatrix} = - \frac{v_1}{2} \begin{bmatrix} e^{j(\tau - \frac{\pi}{2})} \\ -e^{j(\tau - \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(75)$$

であつて、短絡は $\tau=\varphi$ において起るものとする。そこで

$$\frac{d}{d\tau} \xi_1 i_x + \xi_2 e^{2j\tau} i_y = - \frac{v_1}{2} e^{j(\tau - \frac{\pi}{2})} \quad (76)$$

$$\frac{d}{d\tau} (\xi_1 i_y + \xi_2 e^{-2j\tau} i_x) = - \frac{v_1}{2} e^{-j(\tau - \frac{\pi}{2})} \quad (77)$$

$\tau=\varphi$ において $i_x=0, i_y=0$ なる条件を入れて両辺を積分し i_x, i_y を求めれば、

$$i_x = \frac{-v_1}{2j(\xi_1^2 - \xi_2^2)} \left\{ \xi_1 \left(e^{j(\tau - \frac{\pi}{2})} - e^{j(\varphi - \frac{\pi}{2})} \right) + \xi_2 \left(e^{j(\tau + \frac{\pi}{2})} - e^{j(2\tau - \varphi + \frac{\pi}{2})} \right) \right\} \quad \dots\dots(78)$$

$$i_y = \bar{i}_x \quad \dots\dots\dots(79)$$

これより

$$i_a = i_x + i_y = \frac{v_1 \cos \tau}{\xi_1 + \xi_2} + \frac{v_1 \xi_2}{\xi_1^2 - \xi_2^2} \cos(2\tau - \varphi) - \frac{v_1 \xi_1}{\xi_1^2 - \xi_2^2} \cos \varphi \quad \dots\dots\dots(80)$$

これが短絡電流を与える式である。この場合について、各種の時定数について考えて見よう。まず

$$\text{基本波分振巾} = \frac{v_1}{\xi_1 + \xi_2} = \frac{v_1}{x_d''}$$

$$\text{直流分振巾} = - \frac{v_1 \xi_1 \cos \varphi}{\xi_1^2 - \xi_2^2} = - \frac{x_d'' + x_q''}{2x_d'' x_q''} v_1 \cos \varphi$$

$$\text{第2高調波分振巾} = \frac{v_1 \xi_2}{\xi_1^2 - \xi_2^2} = \frac{x_d'' - x_q''}{2x_d'' x_q''} v_1$$

この基本波分は周知のとおり、次過渡時定数 T_d'' で v_1/x_d' に向つて減衰し、さらに T_d' で v_1/x_d に向つて減衰する。また直流分および第2高調波分は電機子時定数 T_a により減衰する。そこでまず T_d' から考えると直軸電流過渡現象に対しては、制動巻線は開路と見做しうから、この場合の界磁電流は、

$$\Delta i_f = -\frac{3}{2} \frac{m}{l_f} \frac{v_1}{\xi_1 + \xi_2} (1 - \cos(\tau - \varphi)) \dots\dots(81)$$

となり、そこで短絡時の見掛けの界磁インダクタンスを l_f' とすれば、

$$l_f \cdot i_{f0} = l_f' (i_{f0} + \Delta i_f) \dots\dots\dots(82)$$

$$\text{ただし、} i_{f0} = \text{無負荷界磁電流} = -v_1/m \dots\dots\dots 83)$$

そこで直軸分のみに着目し、

$$l_f' = l_f \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \frac{m^2}{l_f} \frac{1}{\xi_1 + \xi_2}} = l_f \frac{x_d'}{x_d} \dots\dots\dots(84)$$

$$l_f/r_f = T'_{ad} \dots\dots\dots(85)$$

とすれば、

$$T_a' = T_{ad}' \frac{x_d'}{x_d} \dots\dots\dots(86)$$

となる。

つぎに同じ要領で T_a'' を制動巻線回路の場合に適用して求めることができる。途中を省略して結果のみを示せば、

$$T_a'' = \frac{\lambda_0 + \frac{1}{2}\lambda}{\pi^2 r_d \theta} \frac{x_d''}{x_d'' + \frac{3}{2} \frac{\mu(\mu - \frac{m_4}{A_f} \mu_1) \pi^2}{\lambda_0 + \frac{1}{2}\lambda}} \dots\dots(87)$$

つぎに電機子回路の時定数であるが、これは (26)～(28) の基本式において、 i_y を消去すれば、

$$(\xi_1^2 - \xi_2^2) i_x = \xi_1 \phi_x - \xi_2 e^{2j\tau} \phi_y \dots\dots\dots(88)$$

となり、これより電機子回路インダクタンスは、

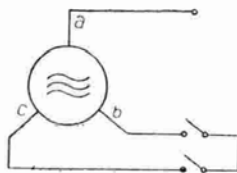
$$l_a = \frac{\xi_1^2 - \xi_2^2}{\xi_1} \dots\dots\dots(89)$$

したがって、

$$T_a = \frac{\xi_1^2 - \xi_2^2}{\xi_1 r} = \frac{2x_d'' x_q''}{(x_d'' + x_q'') r} \dots\dots\dots(90)$$

と与えられることになる。

イ. 二相線間短絡



2 図 二相線間短絡

Fig. 2. Phase to phase short circuit.

bc 相に突発線間短絡を生ずるとしよう。しかるとき

$$V = \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \end{pmatrix} = \frac{v_a + 2v_b}{3} A_0 + \frac{v_a - v_b}{3} A_1 + \frac{v_a - v_b}{3} A_2 \quad (91)$$

また、 $\alpha^2 i_x + \alpha i_y = -\alpha i_x - \alpha^2 i_y = i_s \dots\dots\dots$ 短絡電流 (92)

なる関係がある。ゆえに

$$i_x = -i_y \quad i_s = -j\sqrt{3} i_x \dots\dots\dots(93)$$

したがって、(27)、(28) 式より

$$\frac{d}{d\tau} (\xi_1 i_x - \xi_2 e^{2j\tau} i_x) = \frac{v_a - v_b}{3} - \frac{v_1}{2} e^{j(\tau - \frac{\pi}{2})} \quad (94)$$

$$\frac{d}{d\tau} (-\xi_1 i_x + \xi_2 e^{-2j\tau} i_x) = \frac{v_a - v_b}{3} \cdot$$

$$\cdot -\frac{v_1}{2} e^{-j(\tau - \frac{\pi}{2})} \dots\dots\dots(95)$$

(94)、(95) 式より v_a 、 v_b を消去し、かつ $\tau = \varphi$ において $i_x = 0$ なる条件のもとに積分すれば、

$$i_x = -\frac{v_1 (\sin \tau - \sin \varphi)}{2j(\xi_1 - \xi_2 \cos 2\tau)} \dots\dots\dots(96)$$

したがって、

$$i_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{v_1 (\sin \tau - \sin \varphi)}{(\xi_1 - \xi_2 \cos 2\tau)} \dots\dots\dots(97)$$

97) 式を Fourier 級数に展開するにはたとえば、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\sqrt{3} v_1 (\sin \tau - \sin \varphi)}{2(\xi_1 - \xi_2 \cos 2\tau)} e^{jn\tau} d\tau \\ &= \frac{\sqrt{3} v_1}{2} \frac{1}{2\pi j} \oint \frac{2 \left(2 \sin \varphi \cdot Z - \frac{1}{j} Z^2 + \frac{1}{j} \right) Z^n}{\xi_2 (Z^4 - 2 \frac{\xi_1}{\xi_2} Z^2 + 1)} dZ \end{aligned}$$

を各正負整数の n について求めれば得られ、留数の計算は省略するが、結局

$$\begin{aligned} i_s &= \frac{\sqrt{3} v_1}{x_d'' + \sqrt{x_d'' x_q''}} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^{n-1} \sin(2n-1)\tau \\ &- \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{v_1 \sin \varphi}{\sqrt{x_d'' x_q''}} (1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n \cos 2n\tau) \dots\dots(98) \end{aligned}$$

ただし

$$\alpha = \frac{\xi_1}{\xi_2} - \sqrt{\left(\frac{\xi_1}{\xi_2} \right)^2 - 1} = \frac{\sqrt{x_d''} - \sqrt{x_q''}}{\sqrt{x_d''} + \sqrt{x_q''}}$$

以上明らかなように、 $x_d'' \neq x_q''$ の場合高調波分が発生し、そのうち直流分ならびに偶数高調波分は短絡瞬時の電機子回路の鎖交磁束にもとずき発生するもので、電機子回路の時定数によりすみやかに減衰する。

いま短絡電流基本波分につき、これを通常の対称座標法の式と比較して見るならば、

$$x_2 = \sqrt{x_d'' x_q''} \dots\dots\dots(99)$$

とせねばならない。さきに述べたとおり、 x_2 は凸極機に関する限り一義的に定まらないものである。

なお、線間短絡において、健全相に発生する電圧を計算して見よう。これは (81) 式を基本式に代入し、

$$v_a = v_1 \sin \tau + v_x + v_y \dots\dots\dots(100)$$

を求めれば良い。この場合、 $v_x + v_y$ は $\varphi = \frac{\pi}{2}$ において最大となり、

$$(v_x + v_y) \varphi = \frac{\pi}{2} = v_1 \frac{\xi_2}{\xi_1} \cdot$$

$$\frac{\cos \tau \sin 2\tau (1 - \frac{\xi_2}{\xi_1} \cos 2\tau) - 2(\sin \tau - 1)(\frac{\xi_2}{\xi_1} - \cos 2\tau)}{(1 - \frac{\xi_2}{\xi_1} \cos 2\tau)^2}$$

v_a の最大値を求めると $\frac{\partial v_a}{\partial \tau} = 0$ より $\tau = \frac{3\pi}{2}$ となりしたがって、

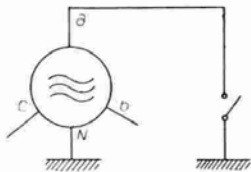
$$v_a \max = -v_1 \frac{\xi_1 - 3\xi_2}{\xi_1 + \xi_2} = -\left(2 \frac{x_q''}{x_d''} - 1\right) v_1 \dots (101)$$

すなわち、 $\varphi = \frac{\pi}{2}$ において短絡せられた場合に、それから半周期後に最大電圧が発生し、その大きさは短絡前の

$$\left(2 \frac{x_q''}{x_d''} - 1\right) \text{ 倍}$$

となる。制動巻線を有する場合、過電圧が非常に抑制せられることは明瞭である。なおこれは負荷遮断時、または一線断線時の異常電圧と本質的に同一のもので、単相再投入等を行う際に問題となるが、その詳細は別の報告を参照せられたいと思う。(12,13)

ウ. 一相中性点間短絡



3 図 一相中性点間短絡

Fig. 3. Phase to neutral short circuit.

この場合には a 相短絡として、

$$I = i_a \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{i_a}{3} (A_0 + A_1 + A_2) \dots (102)$$

$$\text{すなわち、} i_o = i_x = i_y = \frac{i_a}{3} \dots (103)$$

$$\text{また } v_a = 0 \text{ より、} v_x + v_y + v_o = -v_1 \sin \tau \dots (104)$$

$$\text{ゆえに (26)~(28) 式より} \quad \frac{d}{d\tau} (x_o + 2\xi_1 + 2\xi_2 \cos 2\tau) - \frac{i_a}{3} = -v_1 \sin \tau \dots (105)$$

$\tau = \varphi$ において $i_a = 0$ なる条件のもとに、

$$i_a = \frac{2v_1 (\cos \tau - \cos \varphi)}{x_o + 2\xi_1 + 2\xi_2 \cos 2\tau} \dots (106)$$

これを高調波級数に展開すれば、

$$i_a = \frac{3v_1}{x_d'' + \frac{1}{2}x_o + \sqrt{\left(x_d'' + \frac{1}{2}x_o\right)\left(x_q'' + \frac{1}{2}x_o\right)}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_2^{n-1} \cos(2n-1)\tau - \frac{3v_1 \cos \varphi}{2\sqrt{\left(x_d'' + \frac{1}{2}x_o\right)\left(x_q'' + \frac{1}{2}x_o\right)}} \cdot \left(1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_2^n \cos n\tau\right) \dots (107)$$

ただし、

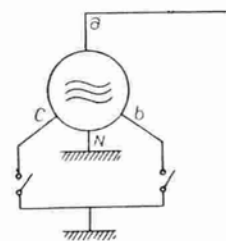
$$\alpha_2 = \frac{\sqrt{x_q'' + \frac{1}{2}x_o} - \sqrt{x_d'' + \frac{1}{2}x_o}}{\sqrt{x_q'' + \frac{1}{2}x_o} + \sqrt{x_d'' + \frac{1}{2}x_o}} \dots (108)$$

この場合には基本周波数の短絡電流に対して対称座標法の式を適用すれば、

$$x_2 = \sqrt{x_d'' + \frac{x_o}{2}} \sqrt{x_q'' + \frac{x_o}{2}} + \frac{x_o}{2} \dots (109)$$

とせねばならない。電圧についての計算は省略する。

エ. 二線中性点間短絡



4 図 二相中性点間短絡

Fig. 4. Double phase to neutral short circuit.

短絡相を bc 相とすれば、

$$V = v_a \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{v_a}{3} (A_0 + A_1 + A_2) \dots (110)$$

$$i_a = 0 \quad i_o = -(i_x + i_y) \dots (111)$$

(26)~(28) 式に代入すれば、

$$\frac{d}{d\tau} \left\{ (\xi_1 + x_o) i_x + (\xi_2 e^{2j\tau} + x_o) i_y \right\} = -\frac{v_1}{2} e^{j(\tau - \frac{\pi}{2})} \dots (112)$$

$$\frac{d}{d\tau} \left\{ (\xi_1 + x_o) i_y + (\xi_2 e^{-2j\tau} + x_o) i_x \right\} = -\frac{v_1}{2} e^{-j(\tau - \frac{\pi}{2})} \dots (113)$$

$\tau = \varphi$ において $i_x = i_y = 0$ なる条件のもとにこれを解き i_x および i_y を求め、これより $i_o = i_s$ を求めれば、

$$i_o = -\frac{(\xi_1 - \xi_2) \cos \tau + \xi_2 \cos(2\tau - \varphi) - \xi_1 \cos \varphi}{\xi_1^2 - \xi_2^2 + 2\xi_1 x_o - 2\xi_2 x_o \cos 2\tau} v_1 \dots (114)$$

この場合にも高調波級数に展開が可能であるが、その各高調波系数は

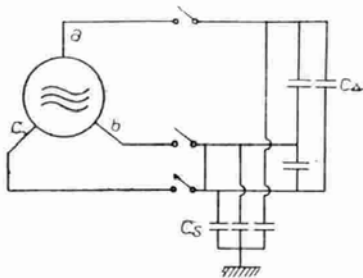
$$\alpha_3 = \frac{\sqrt{x_d''(x_o + \frac{x_d''}{2})} - \sqrt{x_q''(x_o + \frac{x_d''}{2})}}{\sqrt{x_d''(x_o + \frac{x_d''}{2})} + \sqrt{x_q''(x_o + \frac{x_d''}{2})}} \dots (115)$$

の累となる。

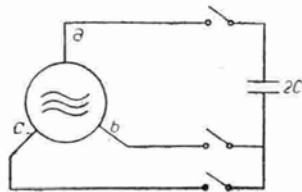
第5章 無負荷送電線路に接続せる凸極機の過渡現象

凸極機，とくに制動巻線を有しないものが無負荷送電線路に接続せる場合，これが不平衡短絡事故を発生するとしはば高調波過電圧を発生して大きな事故を並発する。これは機器リアクタンスと線路リアクタンスが共振を起すためである。この現象を一例として外部インピーダンスを有する場合の過渡現象解析方法を示す。

ア. 線間短絡



5 図 線間短絡
Fig. 5. Line to line short circuit.



6 図 線間短絡等価回路
Fig. 6. Equivalent circuit of line to line short circuit.

5 図のような線間短絡を起す場合，6 図のように簡単に置換ができる。ただし，

$$C = C_d + \frac{C_s}{3} \quad \dots\dots\dots(116)$$

$$\text{そこで， } v_a - v_b = v_a - e = -\frac{i_a}{2pC} \quad \dots\dots\dots(117)$$

より

$$v_x = v_y = -(i_x + i_y)/6pC \quad \dots\dots\dots(118)$$

$$v_o = 0$$

したがって基本式に代入して，演算子式に書き直せば，

$$\begin{pmatrix} p^2 \xi_1 + \frac{1}{6C} & \frac{1}{6C} \\ \frac{1}{6C} & p^2 \xi_1 + \frac{1}{6C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} + p^2 \xi_2 L \begin{pmatrix} e^{2j\tau} i_y \\ e^{-2j\tau} i_x \end{pmatrix} = -\frac{v_1}{j} p^2 e^{-p\varphi} \begin{pmatrix} \frac{e^{j\varphi}}{p-j} \\ -\frac{e^{j\varphi}}{p+j} \end{pmatrix} 1 \quad \dots\dots\dots(119)$$

たとえば L・A・Pipes の方法でこれを解くにはつぎのように書き直して逐次代入法を行うのである。

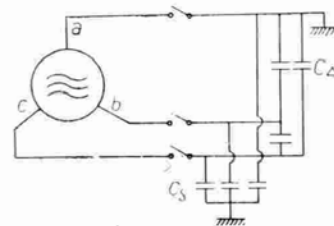
$$\begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} = \frac{1}{\xi_1(p^2 \xi_1 + \frac{1}{3C})} \begin{pmatrix} p^2 \xi_1 + \frac{1}{6C} & \frac{1}{6C} \\ \frac{1}{6C} & p^2 \xi_1 + \frac{1}{6C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{v_1}{j} e^{-p\varphi} \frac{e^{j\varphi}}{p-j} \\ -\frac{v_1}{j} e^{-p\varphi} \frac{e^{j\varphi}}{p+j} \end{pmatrix} + \xi_2 L \begin{pmatrix} e^{2j\tau} i_y \\ e^{-2j\tau} i_x \end{pmatrix} \quad (120)$$

ただし，L は Laplace 変換を示す。計算は相当に複雑であるが，(120) 式より明らかなとおり，共通の operator として $\frac{1}{p^2 \xi_1 + \frac{1}{3C}}$ を有する。この p 平面上の極となる点が共振点となるのであつて，これは共振周波数を n とすれば，

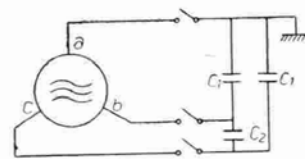
$$n = \frac{1}{\sqrt{3C \xi_1}} = \frac{1}{\sqrt{(x_d'' + x_d'')/2 \cdot (3C \Delta + C_s)}} \quad \dots\dots\dots(121)$$

となるのである。

イ. 一線地絡



7 図 一線地絡
Fig. 7. Line to ground short circuit.



8 図 一線地絡等価回路
Fig. 8. Equivalent circuit of line to ground short circuit.

7 図に見るような一線地絡は，8 図のような回路に書き直すことができる。ただし

$$\begin{aligned} C_1 &= C_d + C_s \\ C_2 &= C_d \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(122)$$

しかるとき回路条件から

$$V = v_g, A_0 + \begin{pmatrix} 0 \\ v_b - v_a \\ v_c - v_a \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(123)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ v_b - v_a \\ v_c - v_a \end{pmatrix} = -\left(\frac{\eta_1}{p} i_x + \frac{\eta_2}{p} i_y\right) A_1 - \left(\frac{\eta_2}{p} i_x + \frac{\eta_1}{p} i_y\right) A_2 - \frac{1}{3pC_1} (i_x + i_y) A_0 \dots\dots\dots (124)$$

ただし、

$$\eta_1 = \frac{2C_1 + C_2}{3C_1(C_1 + 2C_2)} \quad \eta_2 = \frac{C_2 - C_1}{3C_1(C_1 + 2C_2)}$$

これより、基本式に入れて前と同様に解けば、

$$\begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} = \frac{-p^2}{(p^2\xi_1 + \eta_1 - \eta_2)(p^2\xi_1 + \eta_1 + \eta_2)} \cdot \begin{pmatrix} p^2\xi_1 + \eta_1 & -\eta_2 \\ -\eta_2 & p^2\xi_1 + \eta_1 \end{pmatrix} \times \left[\frac{v_1}{j} e^{-p\tau} \begin{pmatrix} e^{j\varphi} \\ \frac{p-j}{p+j} e^{-j\varphi} \end{pmatrix} + \xi_1 \cdot L \begin{pmatrix} e^{2j\tau} i_y \\ e^{-2j\tau} i_x \end{pmatrix} \right] \dots\dots\dots (125)$$

この場合は共振周波数を二つ有し、

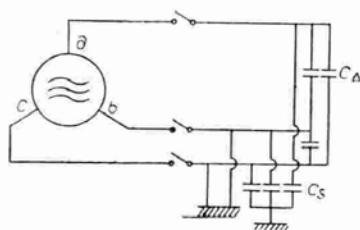
$$n^2 = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\xi_1} = \frac{1}{\left(\frac{x_{d1}'' + x_{q1}''}{2}\right) C_s + 3C_\Delta} \dots\dots\dots (126)$$

および

$$n^2 = \frac{\eta_1 + \eta_2}{\xi_1} = \frac{1}{\left(\frac{x_{d1}'' + x_{q1}''}{2}\right) (3C_s + 3C_\Delta)} \dots\dots\dots (127)$$

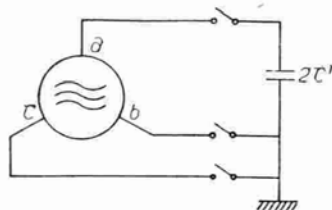
となる。

ウ. 二線地絡



9 図 二線地絡

Fig. 9. Double line to ground short circuit.



10 図 二線地絡等価回路

Fig. 10. Equivalent circuit of double line to ground short circuit.

この場合には、9 図のような条件は 10 図のように書

きかえられ、 $C' = C_\Delta + \frac{1}{2}C_s$ となる。したがって式の形は全く 5・ア の場合と同様になり、共振周波数を求めると

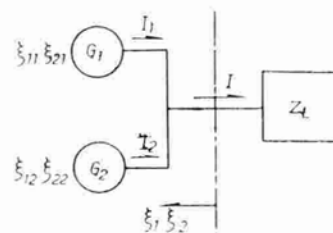
$$n^2 = \frac{1}{3\xi_1 C'} = \frac{1}{\left(\frac{x_{d1}'' + x_{q1}''}{2}\right) (3C_\Delta + \frac{3}{2}C_s)} \dots\dots\dots (128)$$

以上に示すとおり、いずれの場合にも、逆相リアクタンス $(x_{d1}'' + x_{q1}'')/2$ が共振にあずかっている。

第 6 章 同期機の並列接続と変圧器への接続

最後に同期機が運転される場合つねに行われる並列接続あるいは Δ -Y 変圧器への接続を考えて見る。

ア. 同期機の並列接続



11 図 並列運転
Fig. 11. Parallel operation.

リアクタンスの異なる 2 台またはそれ以上の同期機の並列運転状態の等価リアクタンスを考えて見る。11 図において G_1 に対しては

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\tau} (\xi_{11} i_{x1} + \xi_{21} e^{2j\tau} i_{y1}) &= v_x \\ \frac{d}{d\tau} (\xi_{11} i_{y1} + \xi_{21} e^{-2j\tau} i_{x1}) &= v_y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (129)$$

また G_2 に対しては

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\tau} (\xi_{12} i_{x2} + \xi_{22} e^{2j\tau} i_{y2}) &= v_x \\ \frac{d}{d\tau} (\xi_{12} i_{y2} + \xi_{22} e^{-2j\tau} i_{x2}) &= v_y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (130)$$

また

$$\left. \begin{aligned} i_x &= i_{x1} + i_{x2} \\ i_y &= i_{y1} + i_{y2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (131)$$

これらの式より i_{x1} , i_{x2} , i_{y1} , i_{y2} を消去して、 i_x , i_y についての式を立て、かつ ξ_{11} , ξ_{12} , ξ_{21} , ξ_{22} を x_{d1}'' , x_{d2}'' , x_{q1}'' , x_{q2}'' で置きかえれば、

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\tau} (\xi_1 i_x + \xi_2 e^{2j\tau} i_y) &= v_x \\ \frac{d}{d\tau} (\xi_1 i_y + \xi_2 e^{-2j\tau} i_x) &= v_y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (132)$$

ただし、

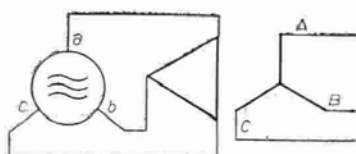
$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{x_{d1}'' x_{d2}''}{x_{d1}'' + x_{d2}''} + \frac{x_{q1}'' x_{q2}''}{x_{q1}'' + x_{q2}''} \right) \\ \xi_2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{x_{d1}'' x_{d2}''}{x_{d1}'' + x_{d2}''} - \frac{x_{q1}'' x_{q2}''}{x_{q1}'' + x_{q2}''} \right) \end{aligned}$$

となる。すなわち、等価リアクタンスは、

$$\left. \begin{aligned} x_d'' &= \xi_1 + \xi_2 = \frac{x_{d1}'' x_{d2}''}{x_{d1}'' + x_{d2}''} \\ x_q'' &= \xi_1 - \xi_2 = \frac{x_{q1}'' x_{q2}''}{x_{q1}'' + x_{q2}''} \end{aligned} \right\} \quad (133)$$

となり、各機の直並に横リアクタンスを並列にしたものが、等価の直並に横リアクタンスとなる。これは多機になつても同様である。通常の対称座標法で行うように逆相リアクタンスをそのまま並列にしたのでは不可なることに注意すべきである。

1. Δ -Y の変圧器を通した場合の等価特性



12 図 Δ -Y 変圧器の接続
Fig. 12. Connection of Δ -Y transformer.

Y側の (x, y, o) 系による電流および電圧を

$$\begin{pmatrix} i_x h \\ i_y h \\ i_o h \end{pmatrix} \text{ および } \begin{pmatrix} v_x h \\ v_y h \\ v_o h \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (134)$$

とすれば、これと発電機回路との変換テンソルは、

$$C = C_{(xyo)}^{(abc)} \cdot C_{\Delta}^Y \cdot C_{(abc)}^{(xyo)} \quad \dots\dots\dots (135)$$

ただし、 $C_{(abc)}^{(xyo)}$ 等は前に第3章で述べたもので、また

$$C_{\Delta}^Y = k \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (136)$$

これは変圧器の変換テンソルで、 k は巻線比である。そこで C を計算すると、

$$C = k \begin{pmatrix} 1-a^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1-a & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (137)$$

そこで、インピーダンステンソルの変換をすれば、

$$\begin{aligned} C_t^* & \cdot \begin{pmatrix} p\xi_1 & p\xi_2 e^{2j\tau} & 0 \\ p\xi_2 e^{-2j\tau} & p\xi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot C \\ &= 3k^2 \begin{pmatrix} p\xi_1 & p\xi_2 e^{2j(\tau - \frac{\pi}{6})} & 0 \\ p\xi_2 e^{-2j(\tau - \frac{\pi}{6})} & p\xi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (138) \end{aligned}$$

この結果より見ると、発電機の動作を高圧側で考える

場合には、各リアクタンスを高圧側に換算した値、すなわち

$$\begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix} \rightarrow (\sqrt{3}k)^2 \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix}$$

を用い、また時間を $\tau \rightarrow \tau - \frac{\pi}{6}$ にずらして発電機単機の場合と同様に考えて良いのである。

むすび

以上、同期機主として凸極発電機の過渡現象に対する解析方法の一例の概要を示した。解析は定速度回転時の電圧ならびに電流の現象にのみ限つてあり、変速度現象あるいは機械の力学的特性を考慮に入れた問題に関しては触れなかつた。なお解析の応用例はもつぱら次過渡現象にのみ限つたが、不平衡負荷を負つた定態現象も興味ある問題でとくにリアクタンスの測定等の際重要となるものである。これは別の機会に譲りたいと考えている。紙数の関係もあり記述はきわめて粗雑であつて不備の点が多いが、もし何らかのご参考となれば幸甚である。終りに、種々のご助言を戴いた横須賀電気第一研究室長に深く謝意を表する次第である。

文 献

この問題に関する文献きはわめて多い。その代表的なものの二三を掲げるに留めて置く。

1. Synchronous Machines-I and II, R.E.Doherty and C.A. Nickle, A.I.E.E. Trans. vol 45, 1926, P 912
2. ditto III A.I.E.E. Trans. vol 46, 1927, P 1
3. ditto IV A.I.E.E. Trans. vol 47, 1928, P 457
4. ditto V A.I.E.E. Trans. vol 49, 1930 P 700
5. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines-I R.H. Park, A.I.E.E. Trans. vol 48, 1929 P 716
6. ditto II A.I.E.E. Trans. vol 52, 1933 P 352
7. Unsymmetrical Short-Circuit in Water-Wheel Generators under Capacitive Loading. C.F.Wagner A.I.E.E. Trans Nov. 1937. P 1385
8. Overvoltages Caused by Unbalanced short Circuits, Effect of Amortisseur Winding. E. Clerke, C.N. Weygandt C.Concordia, A.I.E.E. Trans 1938 P 453
9. E. Clerke, Circuit Analysis of A.C. Power Systems, a book, Wiley & Sons, 1943, vol 1, chap.10
10. G. Kron, The Application of Tensors to the Analysis of Rotating Electrical machinery, a book, G. E. Review.
11. The Classification of Reference Frames in Synchronous Machine, G. Kron, A.I.E.E. Tech paper 50-114.
12. 凸極発電機の負荷遮断時の異常電圧について, 潮. 電学誌 26年 7月
13. 24回連合大会予稿, C.1.1, C.1.2, 25年 4月