

OK
PROCESSING COPY

INFORMATION REPORT INFORMATION REPORT

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY

This material contains information affecting the National Defense of the United States within the meaning of the Espionage Laws, Title 18, U.S.C. Secs. 793 and 794, the transmission or revelation of which in any manner to an unauthorized person is prohibited by law.

S-E-C-R-E-T

25X1

COUNTRY USSR

REPORT

SUBJECT Booklets on Soviet DC Transmission Lines and the Leningrad Scientific Institute for Direct Current Research

DATE DISTR. 22 May 1958

NO. PAGES 1

REFERENCES RD

DATE OF INFO.

25X1

PLACE & DATE ACQ.

25X1

SOURCE EVALUATIONS ARE DEFINITIVE. APPRAISAL OF CONTENT IS TENTATIVE.

1.

a. "The Experimental-Industrial 200-KV DC Transmission System, Kashira--Moscow" (in Russian). The booklet shows diagrams of the inverter and converter stations in use on this line, gives details of the cable structure, describes the various types of rectifiers in use, as well as methods of grid control regulation, and discusses various maintenance and operating problems.

25X1

c. "The Leningrad Scientific Institute for Direct Current Research" (in Russian). It describes the work of the Institute in connection with various pending projects, including the design of the industrial high-tension DC transmission line from the Stalingrad Hydroelectric Station to the Donets Basin, described as being a 500-kilometer system with a capacity of 800 Kv and 750 Mw. Additional details are given about the Kashira--Moscow line, described as the principal experimental base of the Institute. The booklet also discusses high-power rectifiers being developed at the Institute. Pictures of experimental high-power transformers, of a 4.3-million-volt impulse generator, and of other high-power equipment complete the volume.

2. The attachments may be considered as classified FOR OFFICIAL USE ONLY when separated from the present covering report.

S-E-C-R-E-T

25X1

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|------|---|------|---|-----|---|-----|---|-----|---|--|--|--|
| STATE | X | ARMY | X | NAVY | X | AIR | X | FBI | X | AEC | X | | | |
|-------|---|------|---|------|---|-----|---|-----|---|-----|---|--|--|--|

(Note: Washington distribution indicated by "X"; Field distribution by "#".)

INFORMATION REPORT INFORMATION REPORT

COPY 1

FOR OFFICIAL USE ONLY

**CONFÉRENCE INTERNATIONALE DE GRANDS
RÉSEAUX ÉLECTRIQUES À HAUTE TENSION**
112, BOULEVARD HAUSSMAN, PARIS
SESSION 1956, 30 MAI — 9 JUIN

**THE EXPERIMENTAL-INDUSTRIAL
200 KV D-C TRANSMISSION
SYSTEM KASHIRA—MOSCOW**

SUMMARY

This paper gives characteristics of an experimental 200 kV d-c transmission system KASHIRA—MOSCOW having a capacity 30,000 kW; it was commissioned in 1950.

The length of the line is 112 kilometers and its rated voltage is 200 kV. Energy is transmitted for industrial purposes. It is an additional connection between the Kashira State District Power Station and the Moscow Power System. It is the main experimental line for investigating problems of high voltage d-c transmission.

The general scheme of power transmission, the cable line, convertor stations, mercury-arc rectifiers, grid controls, regulation and protection are described.

The paper gives also some data on maintenance and principal faults interfering with normal operation of transmission system.

In conclusion brief results are given for 5 years of exploitation of the transmission line during which 600 million kWh were transmitted.

REPORT

INTRODUCTION

Power development in the USSR and the necessity of utilization of water power resources remote from the centers of distribution put forward the problem of transmission large quantities of power over long distances.

The use of high-voltage direct current for a long-distance transmission is stimulated by the great possibilities offered by this system, and its fundamental advantages as compared to alternating current transmission.

FOR OFFICIAL USE ONLY

There is no problem of stability limitations for the line loads and for the long-distance transmission in d-c system.

The interconnection of several power systems by d-c transmission makes unnecessary their synchronization and thus results in reliability of the whole interconnected system. Direct current has also other advantages such as the possibility of using either overhead line or underground cables. The high-voltage d-c overhead lines are considerably more economic than a-c overhead lines of the same transmitting capacity. The design of d-c underground cables can be realized in a simpler and more economic way than that of a-c cables. This offers great possibilities in development of extra-high-voltage d-c cable lines. The d-c power transmission possesses a number of operating advantages due to the possibility of a high-speed grid control of mercury-arc rectifiers.

The grid control scheme is also applied for regulation of the amount of energy delivered and effects its direction. It provides extra-high-speed protection, automatic reclosing and thus increases transmission reliability. In case of breakdown of one of the d-c cables there is always a possibility of using the earth for the return circuit, i. e. to carry on the transmission operation with slightly decreased load instead of complete shut-down. D-c interconnection does not involve increase in the amount of short-circuit currents and thus can be used in a simpler and more economic way as compared to a-c system, which necessitates additional and, in a number of cases, quite complicated requirements for equipment to effect interconnection of systems. The comparatively high costs and complications of terminal converter stations make it advantageous to construct d-c transmission lines for long distance when the economy obtained in their construction expenditure would prevail over the increase in costs of terminal converter stations. Where the transmission has to take place over wide expanses of water, the use of d-c submarine cable is expedient as well as the use of cable for the short distances such as d-c interconnection lines for transmission systems that are not synchronized.

At present the intermediate switching stations are not employed for d-c transmission lines due to lack of suitable design of d-c circuit breakers.

In connection with practical realization of new super power transmission systems that began in the USSR and the interconnection of power systems in the European part of the Soviet Union, the calculations of separate high-voltage d-c transmission lines of large capacity for long-distance transmission are carried out at present. According to 20th Congress of the Communist Party of the Soviet Union directions, the 6th five-year plan of the national economy

development in the USSR during 1956 to 1960 provides for the construction of d-c power transmission line to interconnect the Stalingrad hydro-electric plant with the Donbass and the South Power Systems.

The construction of power transmission line Stalingrad—Donbass presents real perspectives of utilization of vast Siberian water power resources in one united electrical system.

In order to enable extensive experimental investigations and the study of various converting schemes, as well as the performance of rectifiers and other equipment under particular working conditions, and also to gain the exploitation experience and provide training for the staff, the experimental-industrial d-c transmission was put into operation in 1950. The transmission capacity of the line is 30,000 kW at rated voltage of 200 kV.

High-voltage d-c transmission Kashira—Moscow is the main experimental base for the Scientific Research Institute of Direct Currents.

This experimental transmission is used as well for industrial power supply and represents itself as an additional interconnection between the Kashira Power Plant and the Moscow Power System (Mosenergo) high-voltage network. The total of 600 million kWh was delivered since the experimental-industrial line Kashira—Moscow is in operation.

TRANSMISSION SCHEMES

The experimental plant for high-voltage d-c transmission consists of two stations: the sending or converting station at Kashira, and the receiving or inverting station at Moscow. The above mentioned stations are interconnected with two single core underground cables run for a distance of 112 km. The conversion of alternating current into 200 kV direct current takes place at the converter station, the alternating current being supplied from the bus-bars of Kashira Power Plant at a voltage of 110 kV. The direct current at 200 kV is conducted by the cable line through a distance of 112 km to the inverter station at Moscow where it undergoes the inversion into a-c and then is conveyed through the station bus-bars into 110 kV network of Moscow Power System.

The principal scheme shown in fig. 1 represents the transmission line on which research work was carried out during the period of 1951 to 1955. The converters are realized according to three-phase bridge scheme. Each station consists of similar basic elements such as main and auxiliary transformers, mercury-arc rectifiers and line reactors. Main transformer is represented by a group of three single-phase three-winding transformers of the total capacity 36,000 kVA, combined as to form a single unit. The rated

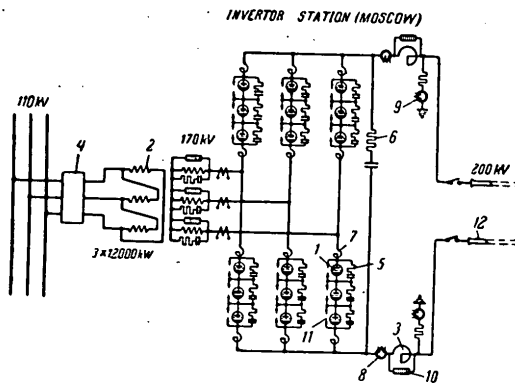
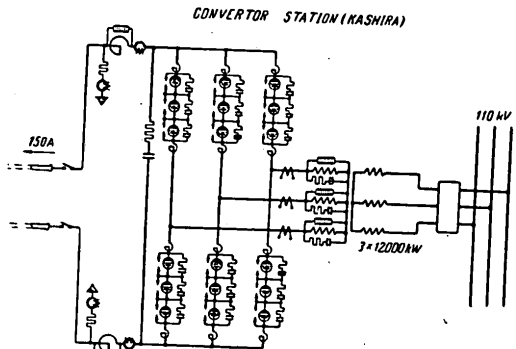


Fig. 1. Scheme of d-c trans mission Kashira—Moscow. 1—rectifier; 2—main transformer; 3—line reactor; 4—circuit breaker; 5—voltage divider; 6—damping circuit for suppression of sonic frequency oscillations; 7—reactor; 8—d-c instrument current transformer; 9—d-c instrument potential transformer; 10—lightning arrester; 11—air gap; 12—200 kV.



mission Kashira—Moscow. 5—voltage divider; 6—damping circuit for suppression of sonic frequency strumment potential transformer; 10—lightning arrester; 11—air gap; 12—200 kV.

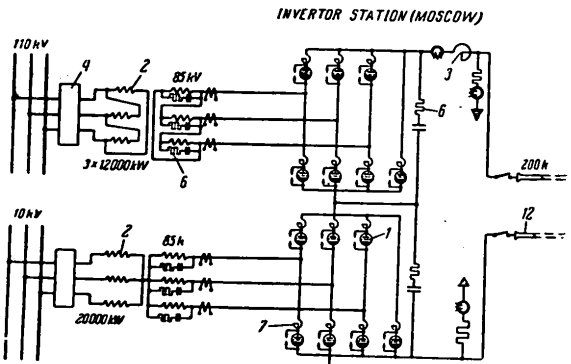
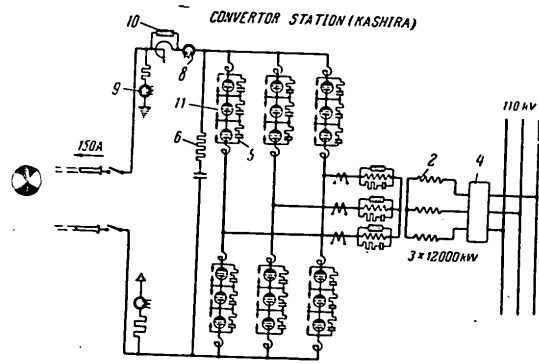


Fig. 2. Alternative scheme of inverter station with two bridges. 1—rectifier; 2—main transformer; 3—line reactor; 4—circuit breaker; 5—voltage divider; 6—damping circuit for suppression of sonic frequency oscillations; 7—reactor; 8—d-c instrument current transformer; 9—d-c instrument potential transformer; 10—lightning arrester; 11—air gap; 12—d-c cable 200 kV.



inverter station with two bridges. 5—voltage divider; 6—damping circuit for suppression of sonic frequency oscillations; 10—lightning arrester; 11—air gap; 12—d-c cable 200 kV.

voltage of two main windings being 110 kV for a-c system side, and 170 kV for d-c station side. There are three mercury-arc rectifiers connected in series to each arm of the bridge.

The series connection of rectifiers makes the plant reliable in case of occasional arc-backs, since the remaining rectifiers are able to withstand the full voltage at the disturbance occurring in one of them. The voltage dividers are connected in parallel to the line of series connected rectifiers to provide equal distribution of voltage among the rectifiers. The suppression of voltage pulsations of sound frequency is introduced in the convertor scheme. These pulsations may appear subsequent to the rectifier arc failure or may arise between the poles due to certain transient processes.

The reactors of a low inductive capacity are connected in parallel to each circuit of rectifiers on the anode and cathode sides to provide damping effect against high frequency oscillations at the ignition of rectifier and to suppress radio frequency oscillations.

At the convertor station the reactors connected to each line pole are used to reduce d-c ripple and to limit transient and fault currents which take place due to discharge of cable line capacity.

The protection against internal surges is accomplished by means of the air gaps and lightning arresters connected in parallel with transformer and reactor windings. The connection and disconnection of d-c transmission to a-c network is carried out at terminal stations by means of the 110 kV circuit breakers.

Facilities are provided to take the load and voltage off d-c line as well as for regulation of power delivered by means of a grid control.

It is possible to operate the transmission line according to symmetrical scheme, i. e. at the potential of 200 kV between the poles and 100 kV to ground, as well as by the scheme with one of the poles earthed, or by the scheme where the earth is used for the return conductor. The potential to ground in case of the two latter schemes is 200 kV. An experimental d-c overhead line was constructed along the cable line for the purposes of investigation and study. This line is supplied from a-c 110 kV three-phase supply through terminals arranged specially at the convertor station.

The d-c experimental transmission serves for investigation of various convertor schemes, particularly for transmission performance at the cascade connection of two bridges with one rectifier on each arm of the bridge as represented in fig. 2.

The potential of each bridge is 100 kV and the pole insulation level to ground is 200 kV. Shunting rectifiers are connected between the poles of each bridge to provide adequate protection against

faults and to enable the normal operation of the main rectifiers as well as for quick recovery subsequent to fault clearing.

The scheme provides voltage division between the rectifiers, the necessity of which arises due to certain transient processes of the transmission operation. Besides the above mentioned principal schemes the experimental plant investigations are carried out with application of other transmission schemes, such as series-parallel connection of rectifiers to the bridge arm, or series connection of two or four rectifiers, etc.

CABLE LINE

Transmission is carried out by means of two single-core d-c underground cables 200 kV. The cross-sectional area of d-c cable aluminium conductor is 150 mm². The conductor is surrounded by the insulation which consists of 11 to 12 mm thick layer of thin paper wound on the aluminium core and impregnated with heavy oil. The lead sheath is placed over the paper and the outside is served with steel armouring. Core to ground capacity of the cable for 1 km in length is about 0.25 mcf and the active resistance is about 0.18 ohms. There are four different types of cable employed for the line construction.

The cross-section of a cable, as manufactured by the Moscow Cable Works is shown in fig. 3.

Both cables for the line and return circuits are laid in one common trench at a depth of 1.2 m (or 1.5 m at the populated districts). The distance between the centers of the cables being 250 mm.

The communicating paper insulated cable is laid above the power cables in the same trench at a depth of about 0.9 m. The submarine cable is used at crossings the rivers. The construction of this cable is about the same with the exception that a more thick sheath and continuous armouring of round wires are used. The two switching points

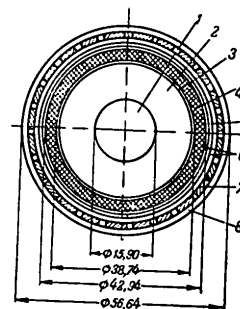


Fig. 3. Cross-section serial d-c cable 200 kV, 1x150 mm² of Moscow Cable Works.

1 — aluminium conductor; 2 — paper insulation 11.3 mm thick impregnated with oil-colophony compound; 3 — metallized paper screen; 4 — lead sheath; 5 — polyvinylchloride tape; 6 — rubber-cloth tape; 7 — steel wire armouring; 8 — layer of cable yarn.

are constructed on the cable line, by means of which cross-connections of cables are accomplished to effect the disconnection of the faulty section of a cable. The electrode installations at rectifier and inverter stations are designed for transmission d-c operating current with return through the earth to a distance of 67 km (i. e. between rectifying station and the switching point). Routine tests and measurements are carried out by means of a stationary krypton installation 500 kV, 20 milliamperes located at inverter station together with insulation punching device and the impulse generator for localization of cable faults. The routine tests are carried out with d-c voltage 350 kV of negative polarity, the duration of test is equal to 10 min.

CONVERTOR STATIONS

The main transformers, line reactors, current and potential instrument transformers (d-c and a-c) as well as disconnecting switches and cable bushings are installed at the open part of the station.

The general view of this station is shown in fig. 4. The main single-phase transformers are of a three-winding type, 12,000 kVA per phase. The rated voltage of the two principal windings is as follows: the a-c side 110 kV, and the d-c station side 170 kV.

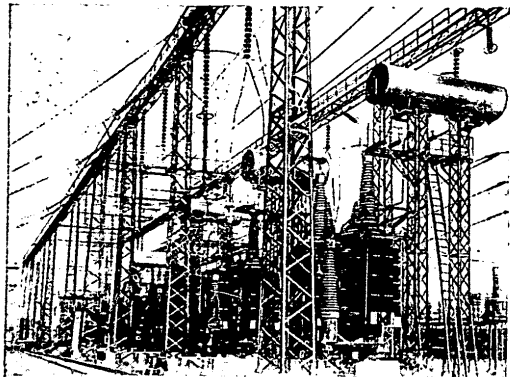


Fig. 4. General view of outdoor station.

The third low capacity winding is of the order 6 to 10 kV. This winding is arranged as a stand-by for auxiliaries. The voltage regulation is carried out by steps within the range of $\pm 4 \times 2.5$ per cent. This is effected by means of a tap-changing on 110 kV side of the winding. The design of windings is suitable for either star or delta connections without any interference with the coefficient

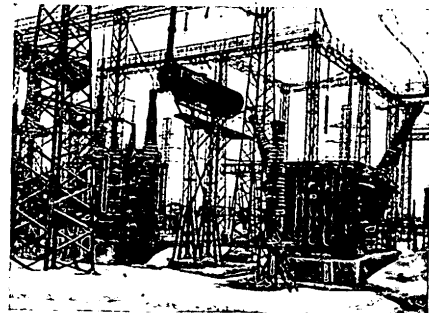


Fig. 5. Inverter outdoor station.
Main transformer (left), current transformer (front view).

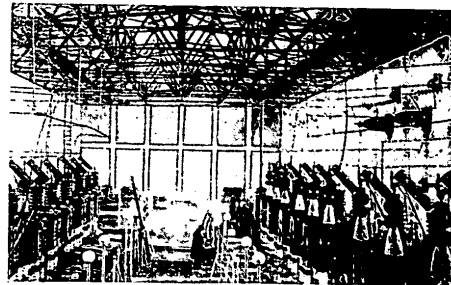


Fig. 6. General view of rectifier room.

of transformation setting. The natural circulation of oil (and fans) provides sufficient oil cooling. Total weight of one phase equipment is equal to 84.5 tons. The inductivity of line reactors at rated transmission current of 150 amps is about 5 henries. The

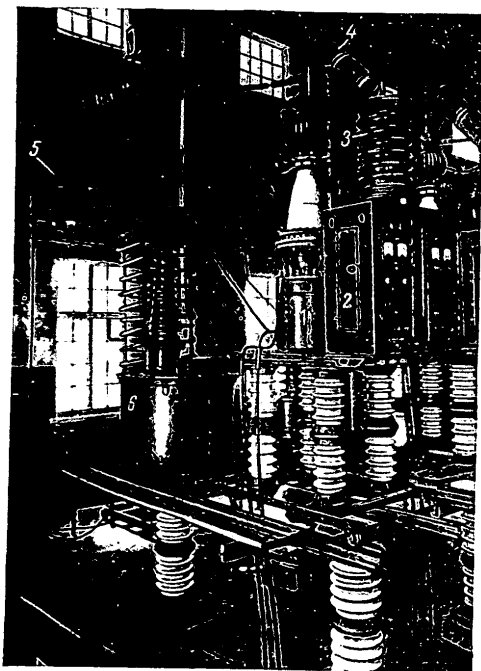


Fig. 7. Rectifier and auxiliary equipment.
 1 — rectifier; 2 — control cubicle; 3 — voltage divider condenser; 4 — active resistance of voltage divider; 5 — high frequency damping reactor; 6 — insulating transformer.

reactors are designed for d-c voltage of 200 kV relative to ground. The general view of the reactor is shown in fig. 5.

The row of mercury-arc rectifiers is located indoors (fig. 6). Besides rectifiers this part of station accommodates the following: grid-control installation, auxiliary transformers (fig. 7), control panel, switchgear for auxiliaries, oil cooling installation, workshops for rectifier repair and facilities for their tests after repair, laboratory, etc.

MERCURY-ARC RECTIFIERS

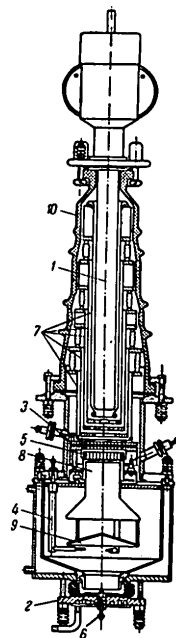
Various modifications of single-anode metallic tank mercury-arc rectifiers are employed for conversion purposes at this transmission line. The principal data of these rectifiers are as follows: maximum current 150 A, inverse voltage 120 to 130 kV (maximum), arc drop—about 35 V and $\cos \varphi = 0.996$.

Cross-section of one of the rectifiers is shown in fig. 8.

The cathode spot once formed by ignition is further kept on by excitation anodes. The pumping system consists of two pumps, one of which is continuously in operation in order to provide vacuum in the rectifier tank which is set to be 10^{-3} mm of mercury column. The other pump of preliminary rarefaction is switched on periodically. Mercury-arc rectifiers and continuously operating mercury vapour diffusion pumps are provided with system of forced cooling by circulating transformer oil at a temperature of 14 to 18°C.

The insulation level of mercury-arc rectifiers withstands 200 kV to ground. This consists of two stages of insulation: the first stage withstands 100 kV to ground and is provided for the intermediate

Fig. 8. Schematic drawing of mercury-arc rectifier.
 1 — anode; 2 — cathode; 3 — grids; 4 — excitation anodes; 5 — deionizing grid; 6 — igniter; 7 — screens; 8 — shade; 9 — cathode cap; 10 — anode insulator.



potential platform used for installation of rectifiers. When the transmission operation is arranged according to the scheme as shown in fig. 1, the platform is electrically connected to the neutral point of 170 kV windings of the transformer bank. However, the arrangement of transmission for operation by the scheme as shown in fig. 2, requires the above mentioned connection to be arranged with the middle point of converting circuit.

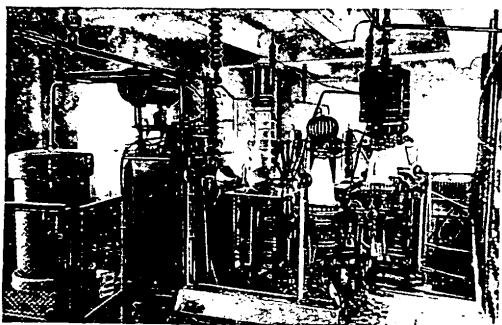


Fig. 9. The equivalent scheme for tests.

The intermediate potential platform is used for installation of mercury-arc rectifiers. Each rectifier is mounted on its individual stand at the insulation level of 100 kV to intermediate platform.

In order to enable normal operating performance the rectifier is fitted with a number of auxiliary equipment devices; such as ignition, excitation, grid control, anode heating elements, etc.

The supply for rectifier auxiliary equipment as well as for control circuits is carried out through control cubicle located in front of the rectifier at the cathode potential.

The communicating, controlling and measuring apparatus, indicators and signal devices are arranged in the control cubicle.

The rectifier auxiliaries are operated from the control platform (which is at the ground potential) by means of insulating rods, the insulating capacity of which is 200 kV. The supply of 380 V for auxiliaries as well as impulse voltage for rectifier grid control devices is conveyed into control cubicle through the insulating trans-

formers. Each mercury-arc rectifier is equipped with individual 10 kV insulating transformer, the insulation level of which being 100 kV. The transformer is made with four groups of windings which are not interconnected magnetically.

The transformer to feed the rectifier auxiliaries and the grid control is installed on the intermediate potential platform next to the rectifier.

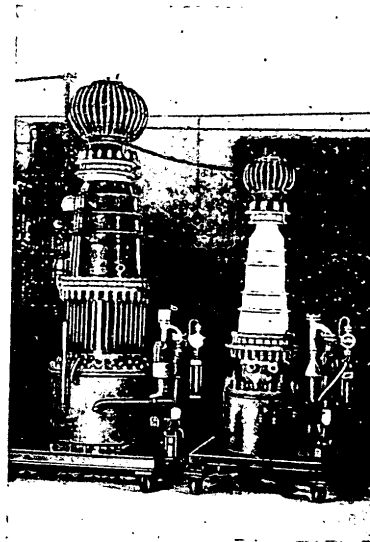


Fig. 10. High power rectifier (left) for long-distance transmission line.

The voltage for rectifier auxiliaries is supplied to the insulating transformer through distributing panel board (located on intermediate potential platform) from sectional 200 kVa insulating transformer installed at the ground potential, the insulation being 100 kV.

The inverter station accommodates special workshops equipped for repair and subsequent tests of rectifiers, such as current test stand, the equivalent circuit installation (fig. 9) and powerful high tension testing stand. Since 1955 various types of mercury-arc rectifiers designed for high-voltage, long-distance d-c transmission are undergoing performance tests at this station (fig. 10).

GRID CONTROL, REGULATION AND PROTECTION

In order to provide normal operating performances of mercury-arc rectifiers at the converter and inverter stations, their ignition is to take place in a certain sequence.

Each rectifier is ignited once in a period at the moment when its grid is subjected to an impulse of positive polarity. Phase displacements of the grid impulses result in corresponding change of d-c voltage output on the bus-bars of converter station and consequently effect the change in magnitude of transmission current.

The discontinuance of the grid impulse supply to all rectifiers results in a rapid decrease of current to zero d-c output, which is equivalent to shut down of the transmission. The above advantages of grid control are widely used for automatic voltage regulation as well as for high-speed protection purposes. The impulses of a sufficiently great magnitude as supplied from the grid control installation, are delivered on to the rectifier grids through the insulating transformers. The impulses supplied to each rectifier are of the order of 350 V.

The scheme of impulse control is shown in fig. 11. Current adjusting and compounding installations located correspondingly at rectifier and inverter stations are employed for automatic control of transmission.

The current controlling device maintains a steady value of current set for the transmission line against variations of a-c voltage at the receiving and transmitting stations.

The compounding device is arranged as to keep the value of grid delay angle set for rectifiers constant, in order to prevent failure of rectifying action and to obtain stability in operation of the inverter at a minimum loss of reactive power. With the phase angle of 15 electrical degrees the inverter will use about 0.5 kVa of reactive power per each kilowatt of active power output.

The combined action of current adjusting and the compounding devices has proved itself to be of considerable value due to its ability for quick automatic voltage recovery subsequent to clearing the fault at the disturbances and transient processes of short

duration which are interfering with normal operation of rectifiers at the inverter station.

The protection against back-fires in the rectifier, differential protection of inverter unit and the protection against short-circuit faults on d-c line may as well be referred to the principal protective devices.

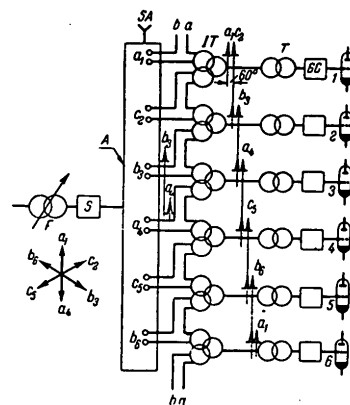


Fig. 11. Grid control circuit.
 F — phase shifter; S — source of primary impulses;
 A — primary impulse amplifier; SA — supply to amplifier; IT — intermediate insulating transformer;
 T — insulating transformer; GC — grid control circuit; 1 to 6 groups of rectifiers.

All the above mentioned protective devices initiate the corresponding action through the rectifier grid control, for instance: discontinuance of impulse supply, i.e. equivalent to switching off the rectifier for 0.06 to 0.5 sec. and reclosing it after clearing the fault, which implies reclosing the transmission line.

Besides the above mentioned special grid protective devices there are ordinary protective relay settings provided to initiate the action of circuit breakers on a-c side.

A special automatic device acting on the grid control of inverter is of so-called «catching-up» device type, as it locates the faulty

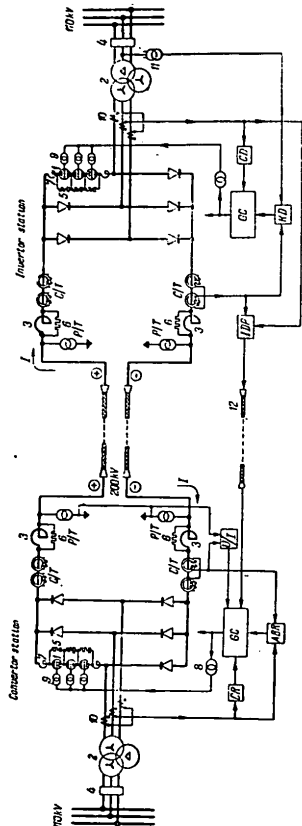


Fig. 12. Principal circuit of grid control and protection.
 1 — rectifier; 2 — main transformer; 3 — line reactor; 4 — voltage divider; 5 — active resistance for damping sonic frequency oscillations; 6 — active resistance at rectifier ignition; 7 — damping reactor for suppression of high frequency oscillations; 8 — sectional insulating transformer; 9 — insulating transformer; 10 — current transformer; 11 — potential transformer; 12 — communication cable; 6C — grid control; CR — current regulator; KD — compound; 11 — d-c instrument transformer; PIT — d-c instrument potential transformer; ABP — arc-back protection; U/I — d-c line short-circuit protection; CD — catching up device; IDP — inverter differential protection.

group of rectifiers failing to ignite and brings into operation another group in order to prevent upsetting of the convertor.
 The skeleton scheme of grid control, regulation and grid protection is shown in fig. 12.
 The investigations and tests that were carried out on experimental-industrial d-c transmission line Kashira—Moscow successfully demonstrated the practical possibilities offered by this system and indicated data and schemes for calculations of industrial high-voltage long-distance d-c transmission lines.

MAINTENANCE AND PRINCIPAL FAULTS INTERFERING WITH NORMAL OPERATION OF TRANSMISSION SYSTEM

Before being put into operation mercury-arc rectifiers were subjected to high voltage arc training tests at a special stand installed at the station in Moscow. The operation of transmission at the beginning was carried out at a reduced voltage, namely 100 kV. The stability of the transmission was very poor even at this voltage. The continuance of line operation without interruptions was counted by few hours only. The transmission start for operation was very troublesome. The occurrence of arc-drops, ignition failures, arc-flashes over the anode insulators and over the insulation of rectifier auxiliary equipment, breakdowns in the secondary commutation circuits of auxiliary control cubicles installed at the rectifier potential and the appearance of strong radio-interference, were the common faults at this early stage of operation.
 After certain measures were undertaken for improvement of the above mentioned defects and particularly with regard to circuit insulation of auxiliary control cubicle and its protection, the transmission was set for operating voltage of 200 kV in the middle of 1951.

The transfer of transmission from 100 kV to full operating voltage of 200 kV gave rise to a number of additional irregularities which were previously not noticeable. To such defects may be referred: rectifier back-firings, grid faults of the inverter, voltage surges involving arc-flashes across air gaps, as well as over the rectifier insulators and other equipment. The effect of radio-interference increased considerably.
 The current and voltage oscillographic registrations taken at various points of the circuit during transient processes and the disturbances interfering with the normal transmission line performance and at its starting, have shown the presence of oscillations of sonic frequency. These oscillations and voltage surges were causing high magnitude overvoltages upon the individual transmission elements including rectifiers.

The overvoltages have reached the value above 400 kV, as registered on three series-connected rectifiers, and 500 kV between the poles.

The oscillogram (fig. 13) shows overvoltages originated by the oscillations of sonic frequency as registered on the converter terminals and on the bank of rectifiers when transmission is switched on to charged cable line. This oscillogram was taken prior to installation of damping devices for the line reactors.

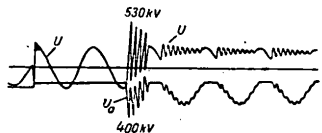
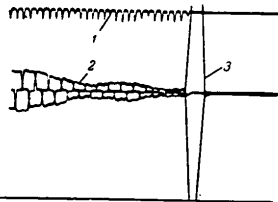


Fig. 13. Oscillogram of surges at transmission switching on to overcharged cable line.
 U —converter terminal voltage (between poles); U_0 —anode-cathode voltage, on a group of rectifiers.

The principal and most important faults interfering with the normal performance of transmission were the following: arc-backs in the rectifier, ignition faults on rectifiers at both stations, grid faults and arc flashes across protective gaps as well as over anode insulators of the rectifier.

Fig. 14. Oscillogram of a simultaneous arc-back on a group of rectifiers with a grid blocking device employed.
 1 — control impulses; 2 — phase currents in transformer windings; 3 — same as in 2, but at the arc-back occurrence.



Arc-backs on three series connected rectifier units of the rectifier station lead to consequent short-circuiting of two main transformer windings and the rectifier groups.

The introduction of grid protection system of instant action restricted the path for the arc-back occurrences with the result that the current flow was limited for a half period duration of system's frequency.

The transformer which was subjected to a great number of arc-backs during the period of 3,5 years of operation was found at the

inspection in good working condition, this is mainly due to the grid protection system of instantaneous action.

Fig. 14 shows the typical oscillogram of current in the windings of transformer during arc-back process when rectifier grid protection is in use.

The amplitude of current surges depends on the phase of the arc-back appearance and in case the instantaneous action of grid protection employed, the currents are not capable to exceed the value beyond the limits of an ordinary short-circuit current for the transformer.

In our case the maximum value of current was about 10 times the rated current of the transformer.

Back-firing, as a rule, results in disconnection of the transmission, yet it was established by experience that quick reopening of rectifier grids (within the fraction of a second) following the interruption, ensures automatic reclosing of transmission for operation.

Ignition faults and excitation extinguishing on separate rectifiers cause simultaneous voltage decrease at the inverter terminals and the intermittent decrease of current in the transmission, within the time depending on the duration of the disturbance.

The ignition faults of long duration or excitation extinguishing result in the decrease of transmission current to zero value and cause the appearance of intermittent pulsating currents. The above involved considerable voltage surges upon the elements of converter scheme and particularly upon rectifiers until some measures had been undertaken to improve damping.

The effects of ignition faults and excitation arc-drop were considerably worse in case of inverter rectifiers and resulted as a rule in inverter «upsetting» due to disturbances set to the normal commutation of currents.

Depending on the type and origin of disturbance the inverter upsetting may be single-phase or double-phase.

In the former case it is caused by a short-circuit through series-connected rectifiers between both arms of the bridge in one phase. In the latter case—due to short-circuit through the rectifiers of different phases and the transformer windings of these two phases.

Fig. 15 shows the oscillogram of current surges at one-phase inverter upsetting.

It may be seen from the above oscillogram that the amplitude of current surges through the line and the rectifiers exceed 3 times the value of nominal current. The form of oscillations is determined by the line capacity as well as by the inductivity of line reactors.

At the inverter arc-through involving the three series connected rectifiers, the disturbance process is carried out in the similar way as in case of ignition fault, etc.

The special protective equipment enables to prevent the inverter upsetting and to restore it to normal operation after disturbances of a short duration.

Fig. 16 shows the oscillogram of the processes occurring during the one-phase inverter upsetting caused by ignition fault on one group of rectifiers with the consequent clearing of fault to restore the normal commutation of inverter.

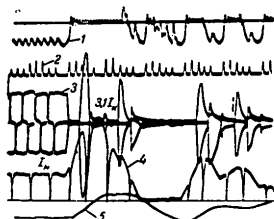
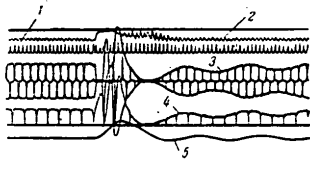


Fig. 15. Oscillogram of inverter single-phase upsetting at ignition fault of long duration in a group of rectifiers.
1— inverter terminal voltage; 2— grid impulses; 3— phase currents in transformer windings; 4— inverted current (surges are caused by operating characteristics of instrument C/T); 5— cable line voltage.

Fig. 16. Oscillogram of the process during inverter single-phase upsetting with the consequent fault clearing and restoration to normal communication.

1— grid impulses; 2— inverter terminal voltage; 3— currents in main transformer windings; 4— inverted current (surges are caused by operating characteristics of instrument C/T); 5— cable line voltage.



When the protective device fails to restore normal commutation, the transmission is switched off by means of a grid control device.

The arc-flash over the anode insulators or sparking across the protective gaps in case of inverter series connected rectifiers, are similar to the effect of the arc-through in the rectifiers connected in one arm of a bridge, while the arc-through in case of the convertor rectifiers is similar to the arc-back effect.

The analysis of the cases interfering with the normal performance was carried out on the base of exploitation experience with the assistance of automatic oscillogram registration, as well as by means of laboratory investigations and the study of artificially created disturbances in the transmission operation.

The analysis proved that the main source of the above mentioned disturbances are the defects in certain mercury-arc rectifiers performance.

At the early stages of transmission operation, i. e. before the improvement of damping devices the above mentioned rectifier faults were intensified by overvoltages due to circuit instability and resulted in frequent breakdowns and sparking over disturbances.

EXPLOITATION BRIEFS OF EXPERIMENTAL-INDUSTRIAL TRANSMISSION SYSTEM

Over 600 million kWh of power were delivered by the experimental-industrial d-c transmission line during 5 years of its operation. The maintenance and reconstruction work have greatly improved the reliability of the line.

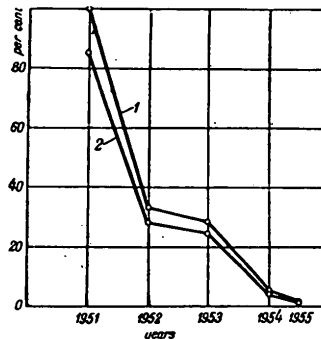


Fig. 17. Schedule of automatic and forced transmission disconnections during the years of line operation (1951-1955). The number of disconnections in 1951 is taken for 100 per cent.
1 — total number of disconnections; 2 — disconnections due to faults on rectifiers and auxiliary equipment.

In spite of the absence of spare mercury arc-rectifier groups employed at each station, and the conditions prevailing for frequent interruptions due to heavy artificial disturbances frequently set for investigations and tests, sufficiently stable performance of line has been achieved.

The duration of the line continuous operation without interruption was over 1,000 hours in 1955.

Only three faults of short duration occurred in 1955; on one occasion at the test of a new protective device and the other two faults were caused by improper rectifiers.

The fault schedule during 1951—1955 is shown in fig. 17.

Most of the disturbances, such as ignition faults, arc-back and excitation extinction, interfering with the normal performance of separate rectifiers last for a short period of time and are quickly neutralized with the protective devices, either

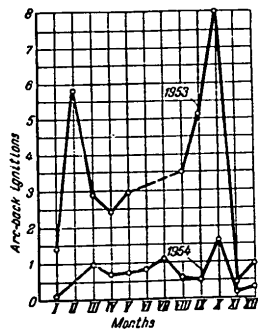


Fig. 18. Diagram of the number of rectifier arc-backs in 1953 to 1954.

by means of grid control or by «catching up» device at the inverter. Automatic grid reopening preserves the line operation.

The improvements in the rectifier operating characteristics offered the possibility to extend the temperature limits for cooling oil and not to limit at all the rate of change of current after the interruption or during normal operation.

The relative quantity of arc-backs is decreasing steadily as shown in fig. 18.

An automatic recording of all disturbance processes and interferences enables to perform systematic analyses of the transmission operation and develop further improvements of schemes and equipment.

The exploitation experience proved the reliability of principal power equipment such as converter transformers, line reactors and the station insulation as these were subjected to several thousand disturbance processes during the experiments carried out on the

transmission line. The exception was represented by the insulating transformers, the insulation of which was insufficient to withstand the stresses set up in operation. Part of insulating transformers was, therefore, replaced later on.

In spite of the difficulties experienced with specific d-c transmission equipment, the operating personnel got familiar with the operating peculiarities.

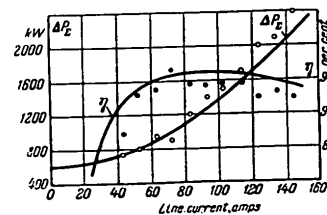
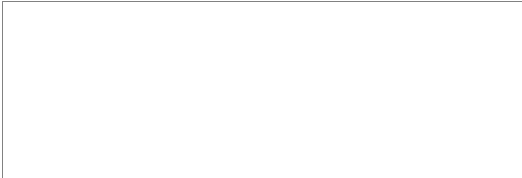


Fig. 19. Efficiency coefficient of d-c transmission line and its power losses.

In the early stages of transmission operation there were on duty engineers and operators in the rectifier room, but since the last 2 years engineers were released, and only one operator is now employed in the rectifier room. His duties are mainly to register the observations during experiments and under normal working conditions.

The data regarding $\cos \gamma$ and losses of the experimental-industrial d-c transmission are shown in fig. 19.

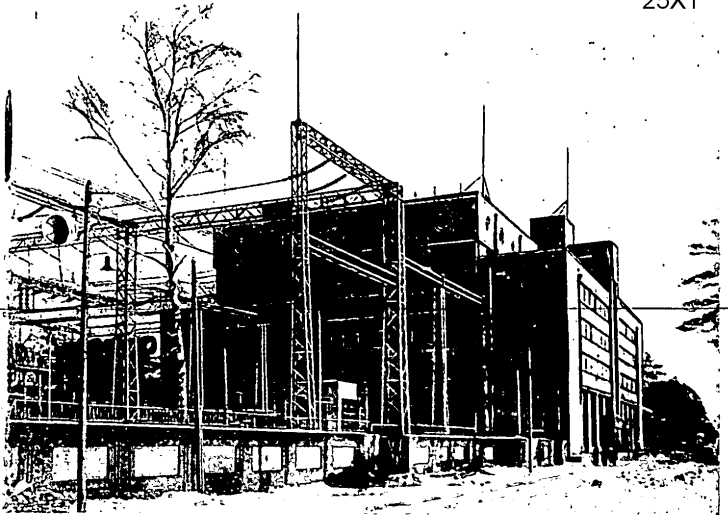
FOR OFFICIAL USE ONLY



Copy 1

FOR OFFICIAL USE ONLY

25X1



НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ
ПОСТОЯННОГО ТОКА

FOR OFFICIAL USE ONLY

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ
ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Научно-исследовательский институт постоянного тока Министерства электростанций СССР проводит научно-исследовательские работы по широкому кругу вопросов техники передачи энергии постоянным током высокого напряжения и по ряду вопросов, связанных с объединением электрических систем и осуществлением дальних передач трехфазного тока напряжением 400 кВ и выше.

Институт располагает квалифицированными научными и инженерными кадрами.

Экспериментальная база института, размещенная в Ленинграде и Москве, включает уникальные испытательные установки, среди них:

опытно-промышленная электропередача постоянного тока Кашира — Москва 200 кВ, 30 МВт, 112 км;

стенд мощностью 120 МВА для испытания высоковольтных вентилях, а также ряд эквивалентных схем и стендов для исследований, испытаний и подготовки вентилях;

электродинамическая модель крупных объединенных энергосистем;

высоковольтные испытательные установки, позволяющие проводить всесторонние испытания оборудования для передач постоянного тока на рабочее напряжение до 1200 кВ и переменного тока на рабочее напряжение до 600 кВ;

опытный пролет передачи трехфазного тока на рабочее напряжение 600 кВ;

ряд специальных установок и моделей.

Институт совместно с проектными организациями проводит проектирование первой промышленной передачи постоянного тока Сталинградская ГЭС — Донбасс на 800 кВ, 750 МВт, 550 км, а также ведет перспективные разработки по внедрению передач постоянного тока в энергетику Советского Союза.

Работы института в области разработки линейной изоляции, изучения внутренних перенапряжений, исследования ко-

роны, разработки установок продольной компенсации, исследования вопросов устойчивости и др. широко используются при проектировании электропередач переменного тока на напряжение 400 кВ и выше.

Во всех этих работах институт кооперируется с заводами и отраслевыми научно-исследовательскими организациями, работающими в области разработки и изготовления электро-технического оборудования, с академическими институтами и другими организациями.

* * *

В институте разрабатываются схемы электропередач постоянного тока, изучаются их технико-экономические характеристики, всесторонне исследуются стационарные и переходные режимы, изыскиваются наиболее совершенные преобразовательные схемы, определяются параметры электропередач и выбирается для них основное оборудование.

Исследуется комплекс вопросов сеточного управления, регулирования и защиты электропередач постоянного тока; разрабатываются и изготавливаются опытные образцы устройств сеточного управления, регулирования и защиты, которые после исследований в лаборатории устанавливаются для проверки и накопления опыта в опытную эксплуатацию.

Разрабатываются наиболее рациональные способы компенсации реактивной мощности.

Определяются уровни изоляции оборудования и изыскиваются рациональные схемы защиты электропередачи от внутренних перенапряжений.

Определяются наиболее эффективные схемы и устройства для демпфирования колебательных процессов.

Разрабатываются вопросы сглаживания тока и напряжения в линии электропередачи и уменьшения содержания высших гармоник в переменном токе.

Исследуется область применения воздушного или кабельного типа линий, разрабатываются методы ограничения перенапряжений на линии, определяется рациональный уровень изоляции линии.

Для решения этих задач в институте проводятся теоретические и экспериментальные исследования различных схем и режимов работы передач постоянного тока в нормальных условиях и в условиях возникновения переходных и аварийных процессов.

В институте разрабатываются инженерные методы расчета стационарных и основных переходных режимов работы электропередачи, которые используются при проектировании элек-

тропередач для определения условий их работы и параметров оборудования и для выбора наиболее выгодных режимов.

Институт разрабатывает методику измерений и специальную измерительную аппаратуру для преобразовательных подстанций передач постоянного тока. Проводятся исследования поведения трансформаторов переменного тока при работе в цепях с искаженной формой кривой тока и при переходных процессах в передачах постоянного тока. Исследуется поведение электроизмерительных приборов при измерениях в цепях, содержащих высшие гармонические.

Разрабатываются методика и аппаратура для точного определения места повреждения изоляции высоковольтных одножильных кабелей большой протяженности.

Важнейшей экспериментальной базой института является опытно-промышленная передача постоянного тока Кашира—Москва.

Передача состоит из двух преобразовательных подстанций: выпрямительной, на которой производится выпрямление переменного тока, поступающего от шин 110 кВ Каширской электростанции, и инверторной в Москве, на которой производится преобразование постоянного тока в переменный ток, поступающий в сеть 110 кВ Мосэнерго. Подстанции связаны между собой двухпроводной кабельной линией длиной 112 км.

Мощность передачи — 30 мвт.

Напряжение постоянного тока 200 кВ.

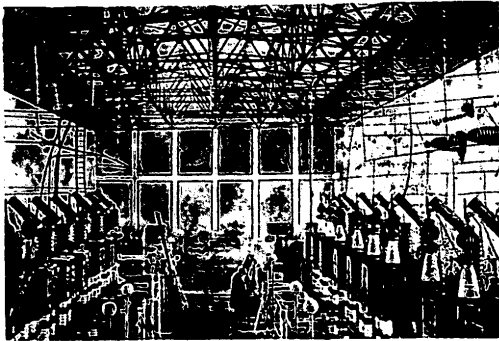
Для преобразования тока применены металлические анодные разборные ртутные вентили разных модификаций. Основные электрические параметры вентиля: максимальный ток 150 а, обратное напряжение 120—130 кВ. На передаче испытываются также в условиях опытной эксплуатации образцы мощных вентилях, разработанных для передачи Сталинград—Донбасс.

Вентили и вспомогательное оборудование к ним размещены в закрытой части подстанции в зале для вентилях (фиг. 1).

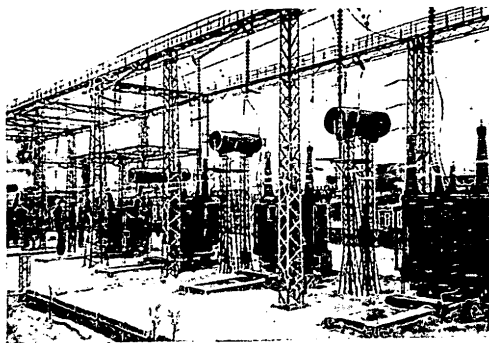
Трансформаторное оборудование, сглаживающие линейные реакторы, трансформаторы тока и напряжения (постоянного и переменного тока), разъединители и вводы кабельной линии находятся на открытой части подстанции (фиг. 2).

На передаче исследуется работа преобразовательных подстанций при разных схемах соединения.

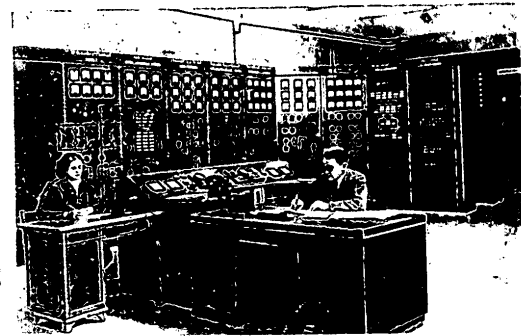
Подстанции применительно к исследуемым схемам преобразования оборудуются устройствами для демпфирования колебаний звуковых и радиочастот, устройствами для принудительного выравнивания напряжения в переходных режи-



Фиг. 1. Опытно-промышленная передача Кашира—Москва.
Зал ртутных вентиляей.



Фиг. 2. Опытно-промышленная передача Кашира—Москва.
Открытая часть подстанции.



Фиг. 3. Опытно-промышленная передача Кашира—Москва.
Щит управления.

мах, аппаратурой для защиты от внутренних перенапряжений, реакторами для сглаживания пульсации выпрямленного тока и др.

Передача оснащена устройствами сеточного управления автоматического регулирования и сеточной защиты.

Помимо нормальной эксплуатационной измерительной аппаратуры, передача оснащена также и специальными измерительными устройствами, в том числе автоматическими электровибрационными осциллографами, записывающими аварийные и предаварийные режимы, электронными осциллографами с механической разверткой для записи напряжений при переходных процессах, электронными осциллографами для автоматической записи однократных процессов, устройствами для передачи на потенциал земли измерений формы тока и напряжения на высоком потенциале и др.

На передаче имеются выносные рабочие заземления, при помощи которых осуществляется для исследовательских целей длительная работа передачи в режиме с использованием земли в качестве обратного провода.

Проводятся также опыты при работе передачи на напряжении 200 кВ по воздушной линии, для чего временно используется линия переменного тока 110 кВ.

В своих работах институт широко применяет метод моде-

лирования, разрабатывая модели применительно к типу исследуемых процессов. Многократно подтвержденная хорошая сходимость характера разнообразных переходных процессов на модели с аналогичными процессами, зафиксированными на передаче Кашира—Москва, открывает возможность решения ряда вопросов по проектируемой передаче Сталинградская ГЭС — Донбасс на основании исследований на соответствующих моделях.

Модель для исследования стационарных и переходных режимов оборудована преобразовательными стендами на тиратронах, главными трансформаторами, сглаживающими устройствами, ячейками искусственных линий, конденсаторными батареями, синхронными компенсаторами и различными электрическими машинами. Имеющееся оборудование и универсальность его выполнения позволяют собирать различные схемы электропередач постоянного тока и простейшие схемы энергетических систем переменного тока.

При исследовании переходных режимов применяются специальные автоматические устройства, позволяющие создавать заданные нарушения режима и производить на осциллографах запись возникающих при этом процессов.

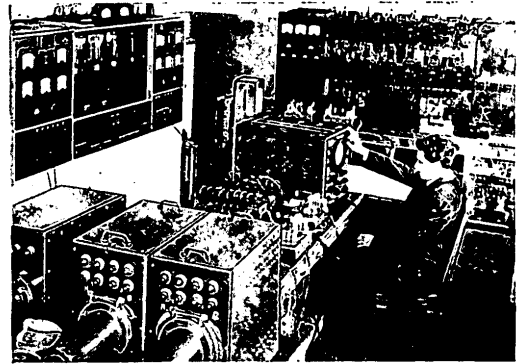
Преобразовательные стенды снабжены основными регулирующими и защитными устройствами, воздействующими на сетки вентиляей. Это позволяет вести изучение переходных режимов с учетом влияния автоматических устройств, устанавливаемых на реальных электропередачах постоянного тока.

Модель для исследования колебательных процессов и внутренних перенапряжений в передаче постоянного тока (фиг. 4) состоит из нескольких стендов, на которых воспроизведены преобразовательные подстанции и линия передачи (в кабельном или воздушном исполнении).

Вентили имитируются высоковольтными тиратронами. Аппараты защиты от перенапряжений (вентильные разрядники, защитные промежутки) воспроизводятся ламповыми схемами.

На модели возможно широко варьирование схем преобразовательных подстанций, собственных емкостей схемы и оборудования, индуктивностей и других параметров схемы преобразования.

Модель снабжена управляющей релейно-тиратронной схемой, при помощи которой вызываются заданные переходные и аварийные процессы и производится управление осциллографами.



Фиг. 4. Стенд (модель) для исследования колебательных процессов и внутренних перенапряжений в передаче постоянного тока.

Модель передачи постоянного тока для исследования устройств управления, регулирования и защиты позволяет воспроизводить основные установившиеся и переходные процессы, возникающие в схемах преобразователей и на линии передачи постоянного тока.

Выпрямитель и инвертор модели имеют все устройства сеточного управления, регулирования и сеточной защиты, которыми оснащаются реальные передачи постоянного тока.

К ним относятся разработанные в лаборатории источники первичных и управляющих импульсов, регулятор постоянства тока на выпрямителе, компаундирующее устройство для поддержания постоянства угла погасания инвертора, дифференциальная защита вентильного моста (от обратных зажигания и опрокидываний), подхватывающее устройство и др.

Модель рассчитана на возможность включения в ее схему регулирующих и защитных устройств, изготовленных для реальных передач, без изменения их параметров. Это позволяет производить их испытания в условиях, близких к реальным, еще до установки на подстанциях передачи.

* *
*

В институте проводятся исследования по широкому кругу вопросов, связанных с конструкцией, технологией изготовления и эксплуатацией высоковольтных ртутных вентилялей.

В соответствующих лабораториях проводятся: исследования причин и механизма явлений, вызывающих неполадки в работе высоковольтного вентиля (обратные зажигания, пробои, погасания дежурной дуги, пропуски зажигания и т. п.);

исследования по ртутно-паровому, тепловому и вакуумному режиму вентиля и его отдельных узлов (фиг. 5);

разработки новых решений по отдельным элементам конструкции вентиля;

исследования по вопросам технологии предэксплуатационной подготовки вентилялей; разработки по специальному оборудованию и схемам для подготовки и испытания вентилялей;

разработка методики контроля за ходом технологического процесса подготовки вентилялей к работе и за вентилями в процессе их эксплуатации;

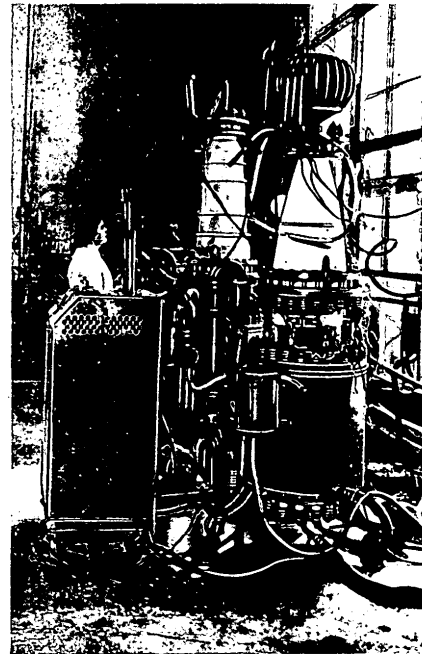
исследования и разработки в направлении усовершенствования технологии ремонта вентилялей.

Для проведения указанных работ институт располагает специальным оборудованием и установками.

Для изготовления и сборки экспериментальных образцов вентилялей институт располагает достаточно полно оборудованными и оснащенными надлежащей аппаратурой технологическими помещениями, в которых производится сварка, очистка, мойка и отжиг деталей, сборка отдельных узлов и всего вентиля в целом, его проверка и формовка. Соответствующие помещения оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией и установкой для кондиционирования воздуха.

На формовочном стенде производится низковольтная токовая формовка вентилялей и специальные исследования (зондовые измерения, вакуумные, тепловые и токовые испытания и т. д.) вентилялей обычного типа и различных опытных конструкций.

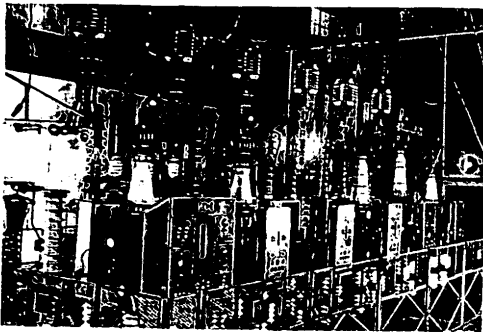
Эквивалентные схемы используются для высоковольтной формовки, типовых испытаний и специальных высоковольтных исследований вентилялей. Эти схемы позволяют создавать испытательные условия по анодному напряжению до 150 кВ любого знака, по анодному току — до 200 а. Схемы допускают независимое изменение в весьма широких пределах не только средних и максимальных значений тока и напряжения, но и большого числа весьма важных с точки зрения работы вентиля параметров. Таким образом, эти схемы позволяют проводить работу с одиночными вентилями в условиях,



Фиг. 5. Испытания вентилялей в лаборатории.

которые с электрической точки зрения практически мало отличаются от условий его работы в реальных мощных схемах, и, кроме того, создавать искусственно различные специальные, в том числе и более тяжелые, режимы его работы.

Стенд групповых испытаний позволяет проводить проверку в силовой схеме трех или шести вентилялей одновременно при токах до 150 а (максимальное значение) и амплитуде анодного напряжения до 240 кВ (фиг. 6).



Фиг. 6. Стенд групповых испытаний вентиляей.

В состав стенда входит открытая подстанция с трансформаторной группой 3×12 мвга из трехобмоточных трансформаторов 6/35/98 кв, реакторы постоянного тока и распределительные устройства 35 и 220 кв, связанные через проходные втулки с системой шин, зала вентиляей.

Режим работы вентиляей при испытаниях в этой схеме практически не отличается от условий их работы в реальной схеме передачи, что позволяет проводить эксплуатационную проверку новых образцов до установки их в схему передачи.

Для исследований и испытаний вентиляей, изготовляемых для передачи постоянного тока Сталинградская ГЭС — Донбасс, сооружен мощный испытательный стенд, позволяющий испытывать вентиляей при номинальных параметрах по току и напряжению. Стенд позволяет также проводить исследования вентиляей, широко варьируя условия работы вентиляей, в частности, при перегрузках и при повышенных напряжениях.

Вентиляей могут исследоваться в режиме трехфазного напряжения с глубоким регулированием и по круговой схеме. Трансформаторная мощность стенда 3×40 мвга.

* *
* *
* *

В области техники высоких напряжений институтом разрабатывается комплекс вопросов, связанных с созданием сверхдальних электропередач переменного и постоянного тока, в основном в следующих направлениях:

разработка линейной изоляции и защитной арматуры, определение оптимальных габаритов для линий переменного тока на напряжение 400 кв и выше и для линий постоянного тока на напряжения 800—1 200 кв (между полюсами);

исследование характеристик и типовые испытания образцов аппаратуры и оборудования для распределительных устройств дальних электропередач переменного тока и преобразовательных подстанций постоянного тока;

исследование внутренних перенапряжений в дальних передачах переменного тока, разработка мероприятий по их ограничению, определение рационального уровня изоляции;

исследование явлений коронного разряда на проводах линий электропередач переменного и постоянного тока и выбор оптимальной конфигурации проводов с точки зрения потерь на корону;

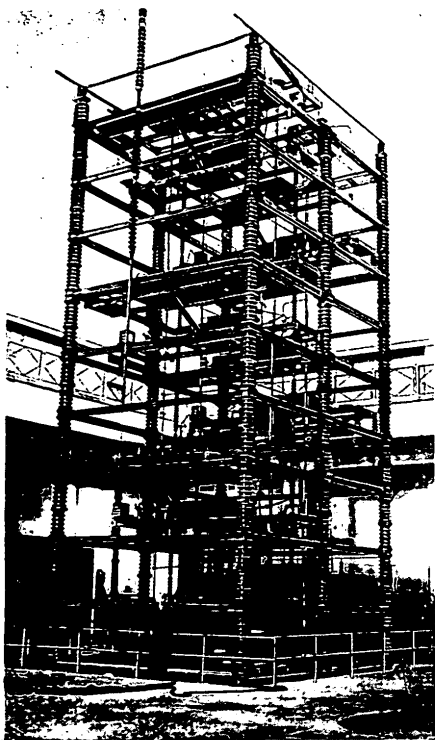
вопросы противогрозовой защиты, импульсных характеристик заземлителей, профилактических испытаний линейной и подстанционной изоляции и др.

Институт оснащен специальными установками, расположенными в большом и малом высоковольтных залах, и испытательным стендом, совмещенным с опытным участком линии, изоляция которой соответствует промышленной линии переменного тока номинального напряжения до 600 кв.

В большом высоковольтном зале установлены основные испытательные установки:

Генератор импульсных напряжений — номинальное напряжение 4,3 млн. в, емкость в ударе 16 700 нф, запасенная энергия 155 квт·сек, коэффициент использования 0,8 при стандартной волне 1,5/40 мксек. Высокое напряжение генератора и большая емкость в ударе позволяют производить на нем без существенных искажений исследования и испытания аппаратов, изготовленных для дальних передач номинального напряжения до 600 кв, обладающих, как правило, большими входными емкостями (фиг. 7).

Генератор импульсных токов — зарядное напряжение 100 и 200 кв, емкость в ударе 80 мкф при напряжении 100 кв и 2 мкф при напряжении 200 кв, запасенная энергия 400 квт·сек, амплитуда разрядного тока до 500 000 а. Генератор смонтирован в специальном котловане ниже уровня пола.



Фиг. 7. Генератор импульсного напряжения 4,3 млн. в.

Однофазный испытательный трансформатор промышленной частоты (50 гц) (фиг. 8) — номинальное напряжение 1 млн. в, мощность 1 000 квт. Трансформатор возбуждается от специального агрегата, состоящего из однофазного синхронного генератора мощностью 600 квт и асинхронного мотора мощностью 350 квт. Возбуждение генератора — независимое от аккумуляторной батареи. Испытательный трансформатор имеет специальный отвод от высоковольтной обмотки для измерения высокого напряжения.

Установка постоянного тока — номинальное напряжение 1,2 млн. в, среднее значение длительно допустимого выпрямленного тока около 70 ма, кратковременно допустимое среднее значение тока (до 10 сек.) 200 ма. Установка выполнена по схеме удвоения напряжения. В качестве выпрямителей временно используются высоковольтные кенотроны, питание накала которых осуществляется при помощи специальных накальных трансформаторов. Пульсации напряжения при максимальной нагрузке около 5—7%. Установка предусматривает возможность замены установленных в настоящее время высоковольтных кенотронов газотронами, после чего длительно допустимый ток повысится до 1 а (фиг. 9).

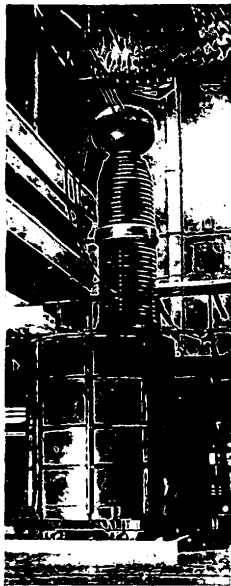
Высокочастотная установка — номинальное напряжение 1,5 млн. в, частота от 30 до 150 кГц.

В большом высоковольтном зале установлены также измерительные шары диаметром 2,5; 1,5 и 1 м, емкостный делитель напряжения с электродами, по Роговскому, диаметром 3,5 м и воздушный цилиндрический конденсатор диаметром 3,5 м на рабочее напряжение порядка 600 кв при емкости около 100 пф. Имеются установки для проведения всесторонних механических испытаний линейных изоляторов и арматуры.

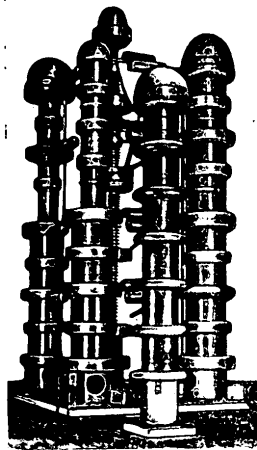
Для исследований методического характера, а также для испытаний аппаратов и оборудования на более низкие номинальные напряжения оборудован малый высоковольтный зал, в котором установлены испытательный трансформатор промышленной частоты напряжением 330 кв, установка постоянного тока 400 кв и генератор импульсных напряжений 1 000 кв.

Для исследований явлений коронного разряда и специальных испытаний и исследований поведения изоляции и воздушных промежутков при сверхвысоких напряжениях оборудованы опытный участок воздушной линии и каскад испытательных трансформаторов на напряжение 2,25 млн. в (фиг. 10).

Каскад состоит из трех трансформаторов напряжением по



Фиг. 8. Испытательный трансформатор 1 млн. в. 1 000 кв.



Фиг. 9. Испытательная установка постоянного тока 1,2 млн. в. 70 ма.

750 кв и мощностью 750 квт каждый, установленных на открытом воздухе. Трансформаторы допускают соединение в звезду при котором получается система трехфазного напряжения с линейным напряжением около 1 300 кв и последовательное соединение с напряжением 2 250 кв относительно земли.

Питание трансформаторов осуществляется от специального агрегата, состоящего из синхронного генератора мощностью 3 000 квт, рассчитанного на однофазную и трехфазную нагрузку, и синхронного двигателя мощностью 1 800 квт.

Опытный участок линии общей длиной порядка 1 км со-



Фиг. 10. Каскад испытательных трансформаторов на напряжение 2,25 млн. в.

стоит из трех пролетов с четырьмя опорами (три анкерными и одной промежуточной), рассчитанными на подвеску расплеченных на 2, 3 и 4 части проводов при различных сечениях составляющих. Изоляция линии рассчитана на напряжение до 1 000 кв.

Измерение потерь на корону осуществляется непосредственно на потенциале провода. Измерительные элементы схемы расположены в трех специальных кабинках (на всех трех фазах), изолированных от земли на напряжение 600 кв. В кабине во время измерений находится человек, производящий настройку схемы измерения и отсчет показаний приборов.

Для исследования внутренних перенапряжений в дальних передачах переменного тока в институте создана специальная модель, на которой может быть воспроизведена электропередача длиной до 2 000 км. Модель оснащена устройствами, воспроизводящими частотные характеристики земли. Установка оборудована элементами коронного разряда, что позволяет проводить исследования внутренних перенапряжений с учетом влияния короны как в переходном, так и в стационарном режимах. Характеристики выключателей и разрядников воспроизводятся на модели специальными ламповыми схемами.

*
*
*

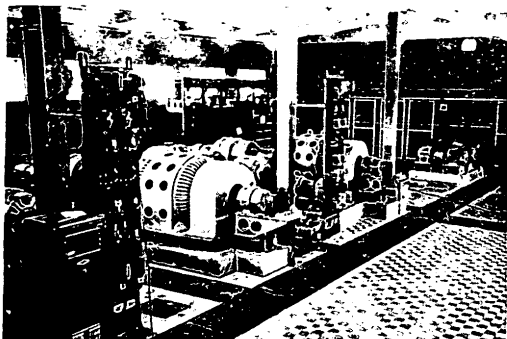
В области схемно-режимных вопросов дальних электропередач большой мощности и сложных объединенных энергосистем институтом разрабатываются следующие вопросы:

статическая и динамическая устойчивость объединенных энергосистем и разработка мероприятий по ее повышению; самовозбуждение и самораскачивание синхронных машин и разработка мероприятий по предотвращению этих явлений; влияние различных способов компенсации электропередач и межсистемных связей на их пропускную способность;

исследование совместной работы систем постоянного и переменного тока устойчивости энергосистем, объединенных передачами постоянного тока, и др.

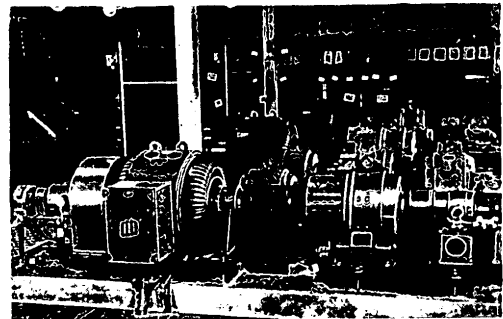
Экспериментальная часть исследований проводится на разработанной и сооруженной в институте электродинамической модели, состоящей из машин — гидрогенераторов, турбогенераторов, агрегатов нагрузки и др., а также трансформаторов, линий, реакторов и других устройств, которые как в нормальном, так и в переходном режимах являются электромеханическим подобием машин и устройств реальной системы (фиг. 11 и 12).

Наличие сменных роторов позволяет изменять параметры гидро- и турбогенераторов модели. Путем компенсации активного сопротивления обмотки возбуждения можно в достаточно широких пределах изменять постоянную времени контура возбуждения машины.



Фиг. 11. Электродинамическая модель. Зал гидрогенераторов.

18



Фиг. 12. Электродинамическая модель. Зал турбогенераторов.

Роторы генераторов имеют сменную демферную систему. Схема статорной обмотки генераторов позволяет иметь большой диапазон номинальных напряжений.

Наличие съемных дисков на агрегате дает возможность получить необходимую инерционную постоянную агрегата.

Генераторы оснащены вспомогательными машинами для измерения угла между роторами параллельно работающей машины и электронно-ионными регуляторами возбуждения специального изготовления, реагирующими как на отклонение регулируемой величины, так и на ее первые две производные.

Промышленная нагрузка энергосистемы моделируется асинхронными двигателями. Требуемая моментно-скоростная характеристика нагрузки осуществляется за счет соответствующего выбора схемы возбуждения машины постоянного тока. Агрегаты нагрузки оснащены инерционными дисками для изменения инерционной постоянной и устройствами для измерения скольжения асинхронных двигателей в стационарном и переходном режимах.

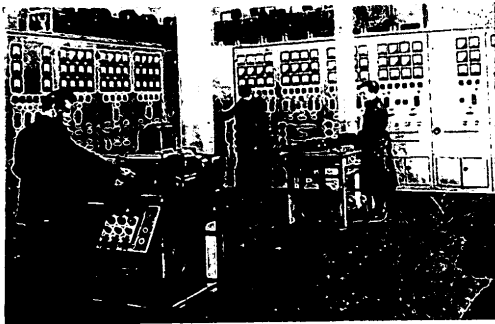
Для имитации печной и осветительной нагрузок системы предусмотрены ламповые реостаты и нагрузочные сопротивления.

Модели трансформаторов имеют широкий диапазон изменения коэффициента трансформации и близки по своим параметрам в относительных единицах к параметрам реальных трансформаторов систем.

Для исследования электропередач с продольной компенса-

2*

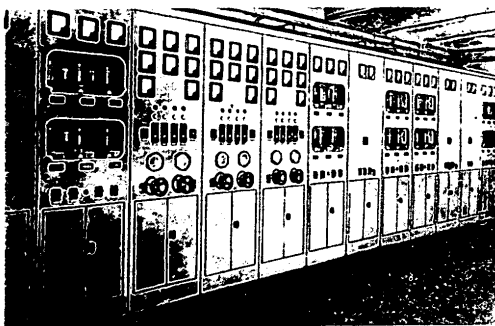
19



Фиг. 13. Электродинамическая модель. Щит управления.



Фиг. 15. Установка продольной компенсации 110 кв.



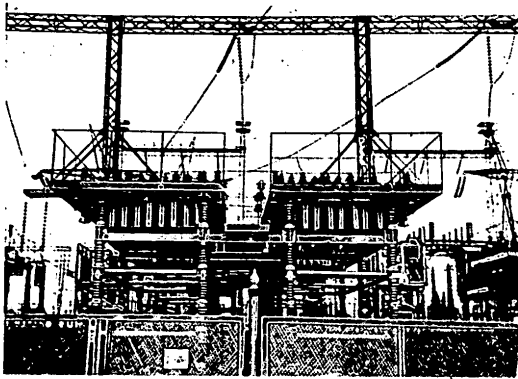
Фиг. 14. Электродинамическая модель. Подстанция постоянного тока.

цией смонтированы модели этих установок с моделями защитных устройств и элементов автоматики для воспроизводства форсировки компенсации.

Электродинамическая модель оборудована моделями концевых устройств и линиями электропередачи постоянного тока (фиг. 14). Преобразовательные схемы оснащены устройствами сеточного управления, автоматического регулирования и сеточной защитой. Кабельные и воздушные линии постоянного тока и воздушные линии трехфазного тока в различных масштабах моделируются схемами замещения. В комплект каждой модели трехфазной линии входит ячейка для моделирования «нулевого провода», с воспроизведением зависимости сопротивления «земли» от частоты.

Сопоставление результатов контрольных опытов, проведенных в реальной энергетической системе, с результатами экспериментальных исследований на электродинамической модели показало достаточно хорошую их сходимость и добротность модели.

Экспериментальные исследования в части продольной компенсации проводятся как на описанной электродинамической модели, так и в реальной энергосистеме с использованием опытной и опытно-промышленных установок продольной компенсации.



Фиг. 16. Опытная установка продольной компенсации 220 кв.

Опытная установка продольной компенсации (фиг. 15) сооружена на подстанции 110 кв и врезана в линию электропередачи 110 кв длиной 157 км вблизи точки примыкания ее к системе. Опытно-промышленные установки продольной компенсации 220 кв сооружены на подстанции, примыкающей к системе, и включены в параллельные линии 220 кв (фиг. 16).

На установках продольной компенсации 110 и 220 кв проводятся исследования внутренних перенапряжений в компенсированной линии, испытание действия релейных защит и устройств защиты конденсаторов от перенапряжений, проводятся опыты, связанные с оценкой динамической устойчивости аппаратуры, подвергшейся воздействию разрядных токов повышенной частоты.

Наряду с этим установки используются для испытания опытных образцов конденсаторов, разрабатываемых электропромышленностью для установок продольной компенсации.

COPY 1

FOR OFFICIAL USE ONLY

ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА^{25X1}
ПОСТОЯННОГО ТОКА
200 кВ

КАШИРА МОСКВА

FOR OFFICIAL USE ONLY

ВВЕДЕНИЕ

Развитие энергетики СССР и необходимость использования гидроресурсов, удаленных от центров потребления, выдвигают задачу передачи больших количеств электроэнергии на дальние расстояния.

Применение для передачи электроэнергии на дальние расстояния постоянного тока высокого напряжения открывает новые возможности и имеет ряд преимуществ по сравнению с передачей переменного тока.

При передаче электроэнергии постоянным током отпадает проблема электрической устойчивости, что устраняет ограничения как по дальности электропередачи, так и по величине передаваемой мощности.

При осуществлении связи между энергосистемами посредством передачи постоянного тока допустима их несинхронная работа по отношению друг к другу, что повышает надежность работы объединенных систем.

Электропередачи постоянного тока возможно выполнять как воздушными, так и кабельными.

При равной пропускной способности воздушные линии постоянного тока высокого напряжения значительно экономичнее воздушных линий переменного тока.

Конструкция кабелей на постоянное напряжение много проще и дешевле, чем на переменное напряжение, что открывает возможности постройки кабельных линий постоянного тока на весьма высокие напряжения.

Передача энергии постоянным током имеет ряд эксплуатационных преимуществ, связанных с большими возможностями быстродействующего сеточного управления вентилями преобразовательных подстанций. Воздействуя на сетки вентиляей, можно регулировать величину передаваемой мощности и менять ее направление, осуществить сверхбыстродействующую защиту и автоматическое повторное включение, что способствует повышению надежности передачи.

Возможность использования земли в качестве обратного провода позволяет при повреждении одного из проводов линии не прекращать передачу энергии, а лишь снижать передаваемую мощность.

Межсистемная связь на постоянном токе не увеличивает токов короткого замыкания и, следовательно, не предъявляет дополнительных, в ряде случаев весьма сложных требований к аппаратуре, которые возникают при объединении энергосистем.

Усложнение и удорожание конечных преобразовательных подстанций постоянного тока делают экономически выгодным применение передачи энергии постоянным током главным образом на большие расстояния, когда экономия в затратах непосредственно на линию перевешивает над удорожанием конечных преобразовательных подстанций. При необходимости прокладки линии через большие водные пространства применение кабельной передачи постоянным током целесообразно и при меньших расстояниях вследствие возможности применения в этих случаях кабельных линий. Возможность связи несинхронно работающих энергосистем также делает целесообразным применение сравнительно коротких линий постоянного тока.

Отсутствие в настоящее время выключателя постоянного тока не позволяет выпалнять линии постоянного тока с промышленным отбором мощности.

За рубежом в настоящее время имеется лишь одна электропередача постоянного тока в Швеции (с материка на о. Готланд) мощностью 20 тыс. кВт, передающая энергию при напряжении 100 кВ на расстояние 100 км.

В связи с начавшимся практическим осуществлением в Советском Союзе электропередач больших мощностей на большие расстояния и объединением энергосистем Европейской части Союза ССР в настоящее время проводятся проектные разработки отдельных передач большой мощности на большие расстояния постоянным током высокого напряжения.

Директивами XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 гг. предусмотрено сооружение передачи постоянного тока для связи Сталинградской ГЭС с энергосистемой Донбасса и южной системой.

Сооружение передачи Сталинград — Донбасс — первой в мире передачи постоянного тока большой мощности — откроет реальные перспективы использования огромных гидроресурсов Сибири и их включения в общую электрическую систему.

Для проведения исследований, которые связаны с проверкой различных схем преобразования, с проверкой работы ртутных выпрямителей и другого оборудования в нормальных и аварийных режимах, а также для накопления эксплуатационного опыта и подготовки персонала в 1950 г. была включена

в работу опытно-промышленная передача постоянного тока Кашира — Москва.

Передача выполнена на мощность 30 тыс. кВт при номинальном напряжении 200 кВ; расстояние между преобразовательными подстанциями 112 км.

Передача Кашира — Москва является основной экспериментальной базой Научно-исследовательского института постоянного тока.

Эта передача используется и в промышленных целях, являясь дополнительной связью Каширской ГРЭС с высоковольтной электрической сетью Мосэнерго.

По опытно-промышленной передаче Кашира—Москва было передано 600 млн. кВтч электроэнергии.

СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Электропередача состоит из двух преобразовательных подстанций: выпрямительной в Кашире и инверторной в Москве, связанных между собой двухпроводной кабельной линией протяженностью 112 км.

На выпрямительной подстанции производится выпрямление переменного тока, поступающего с шин 110 кВ Каширской электростанции, в постоянный ток напряжением 200 кВ, который передается по кабельной линии на инверторную подстанцию в Москве. На инверторной подстанции производится преобразование постоянного тока в переменный ток, который через шины подстанции поступает в сеть 110 кВ Мосэнерго.

Принципиальная схема электропередачи, при которой проводились основные исследования в 1951—1955 гг., приведена на фиг. 1.

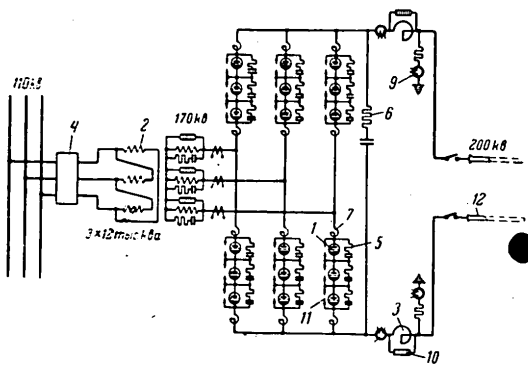
Преобразователи выполнены по трехфазной мостовой схеме. Каждая подстанция состоит из одинаковых основных элементов: главных и вспомогательных трансформаторов, ртутных вентиля и линейных реакторов.

Главный трансформатор представляет собой группу однофазных трехобмоточных трансформаторов общей мощностью 36 тыс. кВА и с номинальным напряжением двух основных обмоток: сетевой 110 кВ и схемной 170 кВ.

В каждое плечо мостовой схемы включены последовательно три вентиля, что имеет целью избежать нарушения работы преобразователя в случае обратного зажигания (на выпрямителе) или прямого пробоя (на инверторе) одного вентиля.

Для равномерного распределения напряжения между последовательно соединенными вентилями параллельно цепочке вентиля включены емкостно-омические делители напряжения.

Инверторная подстанция (Москва)



Фиг. 1. Схема электропередачи

1 — вентиль; 2 — главный трансформатор; 3 — линейный реактор; 4 — выключатель звуковой частоты; 5 — реактор, демпфирующий высокочастотные колебания при запуске вентилей; 6 — измерительный трансформатор постоянного напряжения между полюсами; 7 — реактор, демпфирующий высокочастотные колебания при запуске вентилей; 8 и 9 — измерительный трансформатор постоянного напряжения между полюсами; 10 — шумящий реактор; 11 — шумящий реактор; 12 — кабель постоянного тока 250 кв.

В схеме преобразования обеспечивается подавление колебаний звуковой частоты в напряжении, восстанавливаемом на вентиле после его погасания, а также колебаний звуковой частоты, возникающих между полюсами при некоторых переходных процессах.

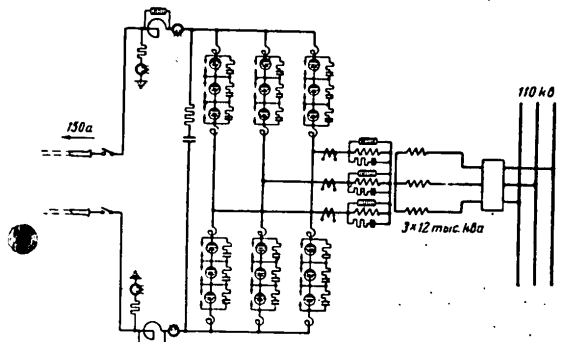
С целью демпфирования высокочастотных колебаний при запуске вентилей и устранения радиопомех последовательно с каждой цепочкой вентилей включены со стороны анода и со стороны катода высокочастотные реакторы с малой индуктивностью.

На преобразовательной подстанции в каждый полюс линии включены линейные реакторы для сглаживания пульсаций выпрямленного тока и ограничения токов при переходных и аварийных процессах, связанных с разрядом емкости кабельной линии.

Защита от внутренних перенапряжений осуществляется вентильными разрядниками, включенными параллельно обмоткам реакторов и трансформаторов, и защитными промежутками.

Включение электропередачи в сеть переменного тока и отключение от нее осуществляются на каждой подстанции при

Выпрямительная подстанция (Кашира)



постоянного тока Кашира—Москва.

5 — делитель напряжения; 6 — демпфирующая цепочка для подавления колебаний при запуске вентилей; 7 и 8 — измерительный трансформатор постоянного напряжения между полюсами; 9 — измерительный трансформатор постоянного напряжения между полюсами; 10 — измерительный трансформатор постоянного напряжения между полюсами; 11 — измерительный трансформатор постоянного напряжения между полюсами; 12 — кабель постоянного тока 250 кв.

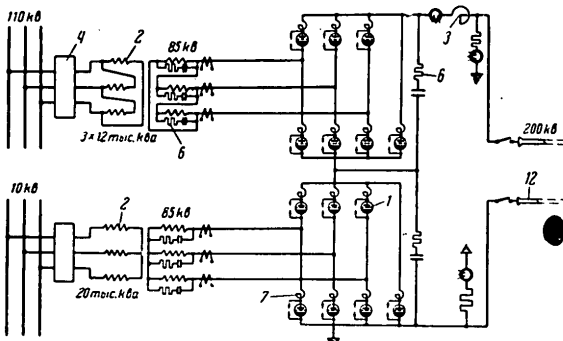
помощи выключателей 110 кв. Снятие нагрузки и напряжения с линии постоянного тока, а также регулирование передаваемой мощности производится воздействием на сеточное управление вентилей.

Возможна работа электропередачи по симметричной схеме при напряжении между полюсами 200 кв и по отношению к земле 100 кв, по схеме с заземлением одного из полюсов и по схеме, при которой обратным проводом является земля. В двух последних случаях напряжение незаземленного полюса передачи по отношению к земле составляет 200 кв.

Для экспериментальных целей предусмотрена возможность работы передачи не по кабельной, а по воздушной линии, проходящей в том же направлении, для чего на преобразовательную подстанцию заведены отпайки от воздушной линии трехфазного тока 110 кв.

На электропередаче проводится исследование различных схем преобразования и, в частности, работы преобразовательной подстанции в режиме каскадного соединения двух мостов с одним вентилем в плече, которая представлена на фиг. 2.

Инверторная подстанция (Москва)



Фиг. 2. Вариант схемы с двумя мостами

1 — вентиль; 2 — главный трансформатор; 3 — линейный реактор; 4 — выключатель; 5 — коковой частоты; 7 — реактор, демпфирующий высокочастотные колебания при зажигательном трансформаторе постоянного напряжения; 10 — вентиляльный разряд.

Напряжение каждого моста 100 кв. Напряжение изолированного полюса относительно земли 200 кв.

Между полюсами каждого моста включены шунтирующие вентили, которые при некоторых неполадках в работе моста отпирются и шунтируют его, что приводит к облегчению работы основных вентилялей и к более быстрой и четкой ликвидации нарушенного режима.

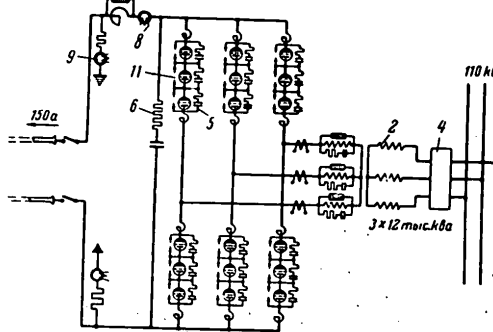
В схеме обеспечивается принудительное выравнивание напряжения между вентилялями, необходимость которого возникает в некоторых переходных режимах работы передачи.

Помимо описанных основных схем, на передаче исследуются и другие схемы преобразования, например параллельно-последовательное соединение вентилялей в плече моста, последовательное соединение двух и четырех вентилялей и др.

КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ

Линия выполнена одножильным кабелем постоянного тока 200 кв. Кабель имеет алюминиевую токоведущую жилу сечением 150 мм², бумажную изоляцию толщиной 11—12 мм с вязкой пропиткой, свинцовую оболочку и стальную броню. Ем-

Выпрямительная подстанция (Машира)



на инверторной подстанции.

делитель напряжения; 6 — демпфирующая цепочка для подавления колебаний звуковой частоты; 7 — реактор, демпфирующий высокочастотные колебания при зажигательном трансформаторе постоянного напряжения; 10 — вентиляльный разряд.

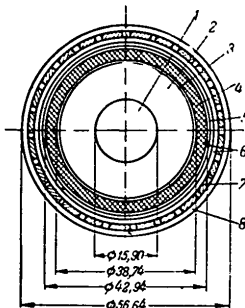
кость кабеля между жилой и землей составляет 0,25 мкф на 1 км и активное сопротивление 0,18 ом на 1 км. Падение напряжения в линии при токе 150 а составляет около 3%.

На линии проложен кабель четырех типов с небольшими конструктивными отличиями. На фиг. 3 показан поперечный разрез кабеля производства завода «Москабель».

Кабели обоих полюсов линии проложены в общей земляной траншее на глубине 1,2 м (в населенных пунктах 1,5 м). Расстояние между кабелями в свету 250 мм. В той же траншее над силовым кабелем на глубине 0,9 м уложен кордельный кабель связи с бумажной изоляцией.

В местах перехода кабельной трассы через реки проложен подводный кабель в основном той же конструкции, но с утолщенной свинцовой оболочкой и сплошной броней из круглых проволок.

По длине трассы имеются два переключательных (разделительных) пункта, позволяющих при помощи съемных накладок осуществлять перекрещивание кабеля и отключение любого участка кабеля в случае, если на этом участке произойдет повреждение.



Фиг. 3. Поперечное сечение серийного 220 кв кабеля постоянного тока 1X150 мм² завода "Москабель".

1 — токоведущая алюминиевая жила; 2 — изоляция толщиной 11,3 мм, пропитанная маслоканифольным компаундом; 3 — экран из металлизированной бумаги; 4 — свинцовая оболочка; 5 — хлорвиниловая лента; 6 — прорезиненная тканевая лента; 7 — броня из стальной проволоки; 8 — слой кабельной пряжи.

пряжением 350 кв отрицательной полярности в течение 10 мин.

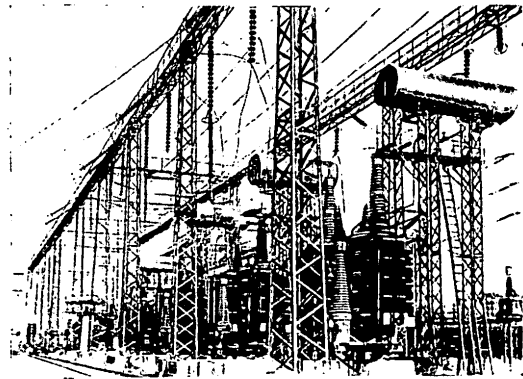
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПОДСТАНЦИИ

Главные трансформаторы, линейные реакторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения (постоянного и переменного тока), разъединители и вводы кабельной линии размещены на открытой части подстанции. Общий вид открытой подстанции показан на фиг. 4.

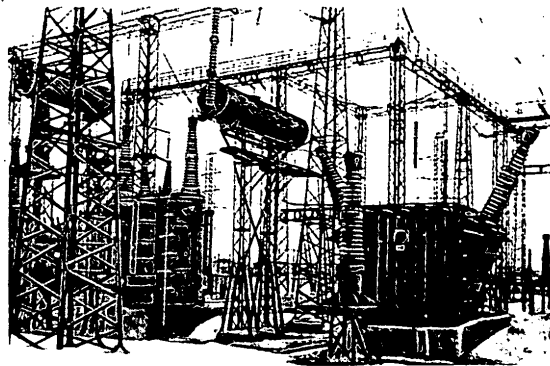
Главные трансформаторы — однофазные трехобмоточные. Мощность фазы 12 тыс. *кв.а*. Номинальное напряжение двух основных обмоток: сетевой — 110 кв и схемной — 170 кв. Третья обмотка 6—10 кв маломощная и предназначена для резервирования питания собственных нужд. Регулирование напряжения осуществляется ступенями в пределах $\pm 4 \times 2,5\%$ путем переключения ответвлений (без нагрузки) на стороне сетевой обмотки 110 кв. Конструкция обмоток допускает соединение сетевой обмотки в звезду или в треугольник при со-

На выпрямительной подстанции и на ближайшем к инверторной подстанции разделительном пункте выполнены выносные заземления, рассчитанные на протекание рабочего тока линии. При помощи этих заземлений осуществляется режим работы передачи через землю, при котором на участке протяженностью 67 км (от выпрямительной подстанции до разделительного пункта) в качестве обратного провода используется земля.

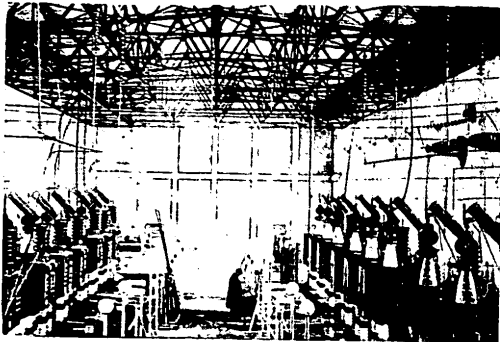
Для профилактических испытаний и измерений при инверторной подстанции смонтированы стационарная кенотронная установка на 500 кв и 20 ма, установка для прожига на 5 кв и 1 а и импульсная установка для подачи импульсов при определении места повреждения кабеля. Профилактические испытания кабеля производятся выпрямленным на-



Фиг. 4. Общий вид открытой подстанции.



Фиг. 5. Открытая часть инверторной подстанции. Вид на фазу главного трансформатора (слева). Впереди трансформатор тока.



Фиг. 6. Общий вид зала ртутных вентилях.

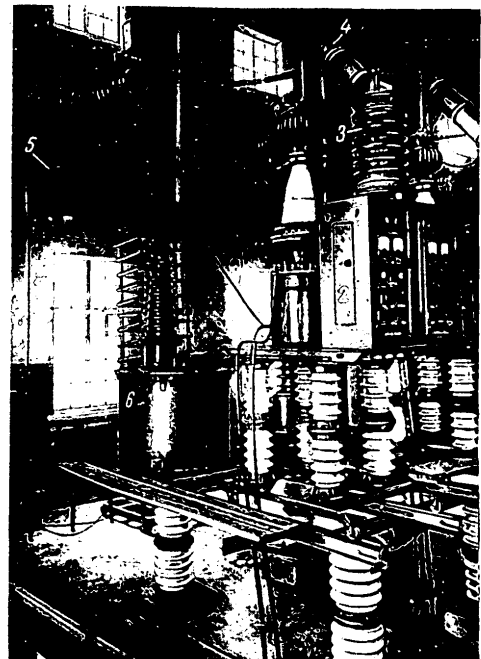
хранении заданного коэффициента трансформации. Охлаждение масляное с естественной циркуляцией и принудительным обдувом. Вес одной фазы 84,5 т.

Линейные реакторы при номинальном токе передачи 150 а имеют индуктивность порядка 5 гн. Реакторы рассчитаны на постоянное напряжение 200 кв по отношению к земле. Внешний вид реактора показан на фиг. 5.

В закрытой части подстанции размещен зал ртутных вентилях (фиг. 6), в котором, помимо вентилях, находятся устройства сеточного управления и вспомогательные трансформаторы (фиг. 7), щит управления, распределитель для питания собственных нужд, установка для охлаждения масла, мастерские для ремонта вентилях, установки для испытания вентилях после ремонта, лаборатории и др.

РТУТНЫЕ ВЕНТИЛИ

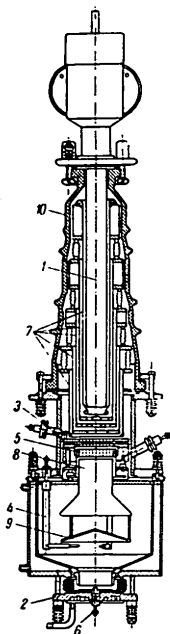
Для преобразования тока применены металлические анодные ртутные вентилях. На электропередаче используются вентилях различных модификаций. Основные электрические параметры вентилях: максимальный ток 150 а, обратное напряжение 120—130 кв (максимальных), падение напряжения



Фиг. 7. Вентиль и вспомогательные устройства.

1 — вентиль; 2 — шкаф питания; 3 — конденсатор делителя напряжения; 4 — активное сопротивление делителя напряжения; 5 — реактор для демпфирования высокочастотных колебаний; 6 — индивидуальный изолирующий трансформатор.

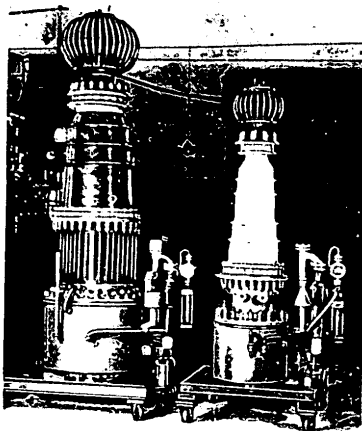
в дуге около 35 в, к. п. д. 0,996. В отношении конструктивного исполнения вентилях различны. Схематический разрез одного из вентилях приведен на фиг. 8, а фотография его — на фиг. 9 справа.



Фиг. 8. Схематический чертеж ртутного вентиля.

1 — анод; 2 — катод; 3 — сет. кат.; 4 — аноды дежурной дуги; 5 — фильтр — анод верьмего возбуждения; 6 — зажигатель; 7 — экраны; 8 — зонг; 9 — катодный козлак; 10 — вводный изолятор.

стоянно действующий ртутный насос принудительно охлаждаются циркулирующим трансформаторным маслом при температуре 14—18° С.



Фиг. 9. Мощный вентиль (слева) для дальних передач постоянного тока высокого напряжения.

Катодное пятно создается щелевым зажигателем и в дальнейшем поддерживается тремя анодами возбуждения.

Откачная система состоит из двух насосов: постоянно действующего ртутного насоса, создающего вакуум внутри вентиля до 10^{-5} мм рт. ст., и периодически включаемого насоса предварительного разрежения. Вентиля и постоянно действующий ртутный насос принудительно охлаждаются циркулирующим трансформаторным маслом при температуре 14—18° С.

Ртутные вентили изолированы от земли на 200 кв. Изоляция разбита на две ступени. На первой ступени, изолированной от земли на 100 кв, установлена общая для всех вентилях платформа промежуточного потенциала, которая при работе передается по схеме фиг. 1 соединена электрически с нейтралью схемных обмоток трансформаторной группы, а при работе по схеме фиг. 2 — со средней точкой преобразовательной схемы.

Для обеспечения нормального режима работы ртутного вентиля он оборудован рядом вспомогательных устройств, обеспечивающих зажигание, возбуждение, сеточное смещение, подогрев и др. Питание собственных нужд вентиля осуществляется через шкаф возбуждения, расположенный перед вентиляем на потенциале катода. В шкафу возбуждения смонтированы коммутационная аппаратура, контрольно-измерительные приборы, индикаторы и сигнальные устройства. Управление собственными нуждами производится с площадки управления (на потенциале земли) при помощи оперативных штанг, изолированных на 200 кв.

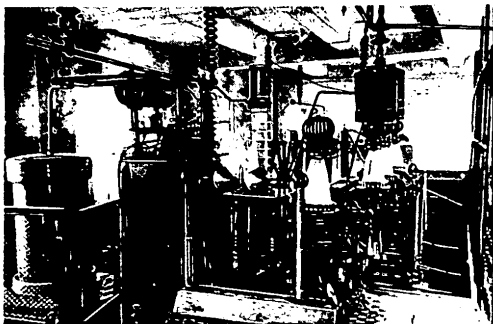
Напряжение 380 в для питания собственных нужд и импульсное напряжение для целей управления вентилями подаются в шкаф возбуждения через изолирующие трансформаторы.

Каждый ртутный вентиль имеет индивидуальный изолирующий трансформатор мощностью 10 ква с изоляцией 100 кв, установленный на платформе промежуточного потенциала рядом с вентиляем и имеющий четыре группы обмоток, магнитно не связанных друг с другом, для питания собственных нужд и для сеточного управления.

Напряжение для питания собственных нужд вентилях подводится к индивидуальным изолирующим трансформаторам через разделительный шкаф (установлен на платформе промежуточного потенциала) от одного группового изолирующего трансформатора мощностью 200 ква, с изоляцией на 100 кв, расположенного на потенциале земли.

Для ремонта вентилях и последующих их испытаний при инверторной подстанции оборудованы специальные ремонтные мастерские и испытательные установки: стенд для токовой формовки, эквивалентная схема (фиг. 10), мощный высоковольтный стенд.

С 1955 г. на передаче испытываются в условиях опытной эксплуатации образцы мощных вентилях, разработанных для проектируемых дальних передач постоянного тока (фиг. 9) высокого напряжения.



Фиг. 10. Эквивалентная схема для испытаний.

СЕТОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ, РЕГУЛИРОВАНИЕ И ЗАЩИТА

Для осуществления преобразования тока вентили, установленные на выпрямительной и инверторной подстанциях, должны вступать в работу (зажигаться) в определенной последовательности. Каждый вентиль зажигается раз в период в тот момент, когда на его сетку подается импульс положительного напряжения. Изменение фазного положения сеточных импульсов приводит к соответствующему изменению напряжения постоянного тока на шинах преобразовательной подстанции, а следовательно, и тока электропередачи. Прекращение подачи сеточных импульсов на все вентили выпрямительной подстанции вызывает быстрое снижение тока до нуля, что равносильно отключению электропередачи. Эти возможности сеточного управления широко используются для автоматического регулирования и быстродействующей защиты.

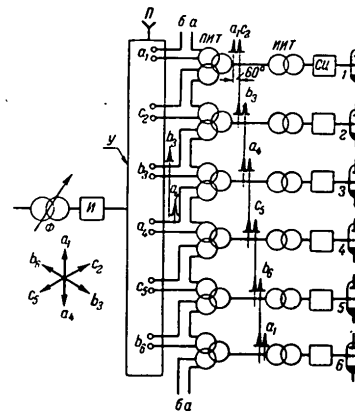
От устройства сеточного управления импульсы достаточно большой мощности передаются через изолирующие трансформаторы к сеткам вентилях. На каждый вентиль поступает импульс с амплитудой 350 в. Схема передачи импульсов сеточного управления приведена на фиг. 11.

Автоматическое регулирование электропередачи осуществляется регулятором тока и компаундирующим устройством, которые установлены соответственно на выпрямительной и ин-

верторной подстанциях. Регулятор тока поддерживает заданное значение тока в линии электропередачи при колебаниях напряжения переменного тока на приемной и передающей подстанциях. Компаундирующее устройство поддерживает заданное значение угла погасания вентилей и этим обеспечивает устойчивую работу инвертора при минимальном потреблении реактивной мощности из приемной сети. При угле погасания, равном 15 эл. град., инвертор потребляет 0,5 кВА реактивной мощности на каждый киловатт выдаваемой в сеть активной мощности.

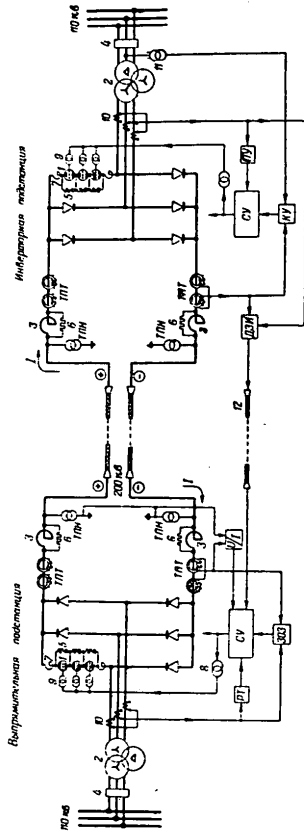
Совместное действие регулятора тока и компаундирующего устройства значительно облегчает протекание переходных процессов при кратковременных нарушениях работы вентилей инверторной подстанции (пропуски зажигания и пробои) и способствует быстрому восстановлению нормального режима.

К основным сеточным защитным устройствам относятся: защита от обратного зажигания на выпрямителе, дифференциальная защита инвертора и защита от коротких замыканий



Фиг. 11. Схема передачи импульсов сеточного управления.

Ф — фазорегулятор; И — источник первичных импульсов; У — усилитель первичных импульсов; П — питание усилителя; ПИТ — промежуточный изолирующий трансформатор; НИТ — индивидуальный изолирующий трансформатор; СД — сеточная цепь; 1-5 — группы вентилях.



Фиг. 12. Принципиальная схема сетевого управления, регулирования и сеточной защиты.
 1 — вентиль; 2 — инвертор; 3 — трансформатор; 4 — выключатель; 5 — делитель напряжения; 6 — активное сопротивление для децифрирования колебаний вторичной цепи трансформатора; 7 — инверторный трансформатор; 8 — групповой изолирующий трансформатор; 9 — индивидуальный изолирующий трансформатор; 10 — вентиль; 11 — трансформатор напряжения; 12 — кабель связи; СУ — устройство сетевого управления; ДДН — дифференциальная защита от короткого замыкания в линии постоянного тока; ДДН — подпитывающее устройство; ДДН — дифференциальная защита инвертора.

в линии постоянного тока. Все эти защиты действуют на устройство сетевого управления выпрямительной подстанции; они прекращают подачу сеточных импульсов и этим запирают выпрямитель. После отключения электропередачи от какой-либо защиты через 0,06—0,5 сек. выпрямитель автоматически отпирается, т. е. происходит автоматическое повторное включение электропередачи. Кроме специфических сеточных защит, имеются обычные защитные устройства, действующие на отключение выключателей на стороне переменного тока.

Особым автоматическим устройством, действующим на сеточное управление инвертора, является так называемое подхватывающее устройство. Оно определяет, в какой группе вентиля произошел пропуск зажигания, и сразу же отпирает другую группу вентиля, предотвращая этим опрокидывание инвертора. Скелетная схема сетевого управления, регулирования и сеточной защиты приведена на фиг. 12.

Проведенные исследования на опытно-промышленной передаче Кашира — Москва подтвердили практическую возможность передачи энергии постоянным током и позволили выбрать параметры и схемы для проектирования промышленной передачи энергии постоянным током высокого напряжения на большие расстояния.

НАЛАДКА И ОСНОВНЫЕ ВИДЫ НАРУШЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ РАБОТЫ ПЕРЕДАЧИ

Перед пуском передачи ртутные вентили прошли подготовку путем высоковольтной формовки на стенде при подстанции в Москве. Вначале передача была включена на пониженное напряжение 100 кВ и первое время работала очень неустойчиво даже при пониженном напряжении. Непрерывная ее работа исчислялась несколькими часами. Включение передачи в работу часто сопровождалось повторными отключениями.

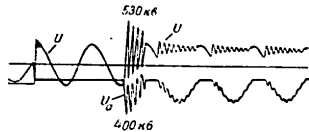
Наблюдались частые погасания дежурной дуги, пропуски зажигания, перекрытия анодных изоляторов вентиля, а также изоляции аппаратуры и цепей вторичной коммутации вспомогательных шкафов, имеющих потенциалы вентиля. При работе передачи появлялись сильные радиопомехи.

После проведения некоторых мероприятий и, в частности, улучшения состояния изоляции цепей вспомогательных шкафов и их защиты передача, проработав некоторое время на напряжении 100 кВ, была переведена в середине 1951 г. на напряжение 200 кВ.

С переходом на полное рабочее напряжение 200 кВ появлялся ряд дополнительных явлений, мало или почти незаметных при работе на напряжении 100 кВ.

Появились обратные зажигания на выпрямителе, пробой вентиля в прямом направлении на инверторе, большие перенапряжения, вызывающие перекрытия защитных промежутков, изоляторов вентиля и другого оборудования. Усилились радиопомехи.

Осциллографическая запись переходных процессов при нарушениях нормального режима и при включениях передачи,



Фиг. 13. Осциллограмма включения электропередачи на перезаряженную кабельную линию.
U — напряжение на зажимах преобразователя (между полюсами); U_d — напряжение анод-катод на группе вентиля в одном плече.

фиксирующая токи и напряжения в различных точках схемы подстанции, позволила выявить наличие колебательных процессов звуковой частоты.

Эти колебания и напряжения при указанных режимах создавали большие перенапряжения на отдельных элементах передачи, в том числе и на вентилях. Зафиксировано перенапряжение на трех последовательно включенных вентилях выше 400 кВ, а между полюсами выше 500 кВ.

На фиг. 13 приведена осциллограмма напряжений на зажимах преобразователя и на группе вентиля при включении передачи на заряженную линию, где отчетливо видны перенапряжения, создаваемые колебаниями звуковой частоты. Осциллограмма относится к периоду работы передачи до установки демпфирования на линейных реакторах.

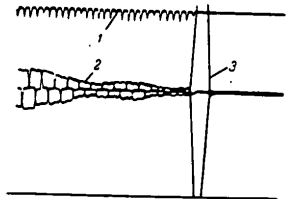
Наиболее характерными и важными неполадками, нарушающими нормальную работу передачи, являлись: обратные зажигания в вентилях выпрямителя, погасания дуги, возбуждения и пропуски зажигания вентиля в обоих подстанциях, сквозные пробои в прямом направлении вентиля инвертора, перекрытия защитных промежутков и анодных изоляторов вентиля.

Обратные зажигания в трех последовательно включенных вентилях выпрямителя являлись результатом пробоя вентиля в непроводящую полуобмотку и сопровождалось коротким замыканием схемной обмотки трансформатора через вентили выпрямителя.

Введение сеточной защиты, мгновенно действующей при обратных зажиганиях, позволило запереть выпрямитель и предупредить следующие коммутации токов, в результате чего протекание аварийного тока ограничивается одной полуволной, длительностью порядка полупериода промышленной частоты.

Благодаря быстрдействию сеточной защиты трансформатор, претерпевший за 3,5 летний срок эксплуатации множество обратных зажигания, после вскрытия оказался в хорошем состоянии.

На фиг. 14 приведена типичная осциллограмма тока в обмотках трансформатора выпрямителя при обратном зажигании с заперением выпрямителя сеточной защитой.



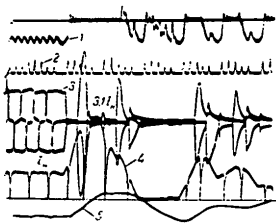
Фиг. 14. Осциллограмма сквозного обратного зажигания с сеточным заперением выпрямителя.
1 — управляющие импульсы; 2 — ток в фазах с измененной обработкой трансформатора; 3 — то же, что и 2 при обратном зажигании.

Амплитуда аварийного тока зависит от момента появления обратного зажигания и в случае быстрого действующего заперения сеток выпрямителя предельное значение тока не выходит за пределы тока обычного короткого замыкания за трансформатором. В нашем случае предельное значение было порядка 10-кратного номинального тока трансформатора.

Обратные зажигания, как правило, вызывают отключение передачи, но в процессе эксплуатации было установлено, что открытие сеток вентиля спустя доли секунды после заперения обеспечивает успешное автоматическое повторное включение передачи в работу.

Пропуски зажигания или кратковременные погасания дуги возбуждения отдельных вентилях на выпрямителе сопровождаются снижением напряжения на зажимах выпрямителя и вызывают толчкообразные снижения тока в передаче, зависящие от длительности этой неполадки.

Длительные пропуски зажигания или погасания дуги возбуждения в вентилю сопровождаются снижением тока в передаче до нуля появлением прерывистых токов. В свое время, до проведения мероприятий по демпфированию, это вызвало большие перенапряжения на элементах схемы преобразования и, в частности, на вентилях.



Фиг. 15. Осциллограмма однофазного опрокидывания инвертора при определенном пропуске зажигания в группе вентилях.

1 — напряжение на зажимах инвертора; 2 — управляющие импульсы; 3 — токи в фазах схемной обмотки трансформатора; 4 — инвертируемый ток (провалы в кривой тока определяют режим работы измерительного трансформатора постоянного тока); 5 — напряжение на кабельной линии.

форматора. На фиг. 15 приведена осциллограмма процессов в передаче при однофазном опрокидывании инвертора.

Как видно из осциллограммы, при опрокидывании инвертора по линии и через вентили ходят аварийные токи с амплитудой выше трехкратной величины от номинального тока. Колебательный характер тока и напряжения в линии определяется емкостью кабельной линии и индуктивностью линейных реакторов.

При сквозном пробое на инверторе трех последовательно включенных вентилях процесс протекает подобно описанному при опрокидывании инвертора.

Наличие специальных устройств регулирования и защиты в ряде случаев кратковременных нарушений позволяет предупредить опрокидывание инвертора или восстановить нормальную коммутацию в инверторе после опрокидывания.

На фиг. 16 дана осциллограмма процессов в передаче при однофазном опрокидывании инвертора, вызванном пропуском зажигания одной группы вентилях, с быстрым восстановлением нормальной коммутации в инверторе.

В тех случаях, когда нормальная коммутация в инверторе не восстанавливается, передача отключается посредством точного управления.

20

Значительно хуже последствия пропусков зажигания и погасания дуги возбуждения в вентилях инвертора. Здесь эти нарушения, если не принять специальные меры, как правило, сопровождаются нарушением нормальной коммутации токов в инверторе, что вызывает опрокидывание инвертора. В зависимости от характера нарушения опрокидывание инвертора имеет два вида: однофазное или двухфазное.

В первом случае происходит закорачивание линии через последовательно включенные вентили обеих половин моста одной фазы, в другом случае через вентили и схемные обмотки двух фаз трансформатора.

Перекрывание анодных изоляторов или защитных промежутков последовательно включенных вентилях инвертора приводит к тем же процессам, что пробой вентилях в плече моста, а вентилях выпрямителя — к процессам, подобным обратному зажиганию.

Анализ причин нарушений нормальной работы преобразовательной проводилась на основе рассмотрения данных эксплуатационных наблюдений и автоматической осциллографической записи, а также по материалам параллельно проводимых исследований в лабораториях и на самой передаче над искусственно вызываемыми нарушениями нормальной работы.

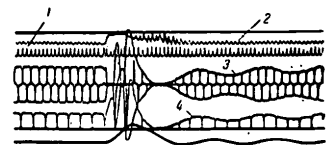
Этот анализ показал, что основной причиной перечисленных выше нарушений являются неполадки в работе ртутных вентилях: в дефектах вакуумно-технологической и электрической подготовки их и в некоторых конструктивных недостатках вентилях.

На первых этапах работы передачи до проведения мероприятий по демпфированию положение усугублялось тем, что на указанные неполадки в вентилях накладывались явления перенапряжений, вызываемые колебательными процессами в схеме, которые часто служили причиной перекрытий и пробоев.

КРАТКИЕ ИТОГИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

За 5 лет эксплуатации по опытно-промышленной линии постоянного тока передано свыше 600 млн. кВт электроэнергии.

В результате выполненных наладочных и реконструктивных работ надежность этой линии значительно повысилась. Несмотря на наличие всего лишь одного преобразовательного агрегата на каждой из подстанций и на частые опыты с искусственно создаваемыми тяжелыми аварийными процессами, достигнута устойчивая работа электропередачи. Длительность непрерывной работы линии при номинальных параметрах без



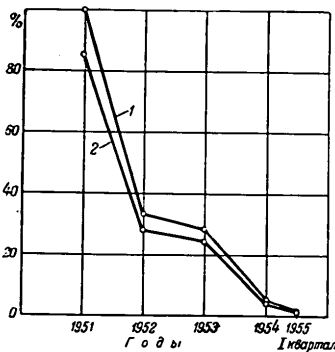
Фиг. 16. Осциллограмма однофазного опрокидывания инвертора с быстрым восстановлением нормальной коммутации.

1 — управляющие импульсы; 2 — напряжение на зажимах инвертора; 3 — токи в фазах схемной обмотки трансформатора; 4 — инвертируемый ток (провалы в кривой тока определяют режим работы измерительного трансформатора); 5 — напряжение на кабельной линии.

21

каких-либо отключений в 1955 г. составила свыше 1 000 час. В 1955 г. было всего три кратковременных отключения, в том числе одно при испытании нового защитного устройства и два из-за неисправностей вентилях. График аварийных и вынужденных отключений передачи за 1951—1955 гг. приведен на фиг. 17.

Большинство нарушений работы отдельных вентилях в виде пропусков зажигания, обратных зажиганиях или погасаний воз-



Фиг. 17. График автоматических и вынужденных отключений электропередачи по годам эксплуатации. Число отключений в 1951 г. взято за 100%.

1 — общее число отключений; 2 — отключения из-за вентилях и вспомогательных устройств.

буждения протекает кратковременно и ликвидируется быстродействующими защитными устройствами путем запаривания сеток вентилях или подхватывающим устройством на инверторе. Автоматическим повторным открытием сеток вентилях линия сохраняется в работе.

Улучшение состояния вентилях позволило расширить пределы допустимых колебаний температуры охлаждающего масла, а также не ограничивать скорость набора нагрузки после включения линии и изменения нагрузки. Также непрерывно снижается удельное количество обратных зажиганиях, что показано на фиг. 18.

Автоматическая запись всех аварийных процессов и нарушений в работе линии электропередачи позволяет систематически анализировать ее работу и проводить дальнейшее усовершенствование схем и оборудования.

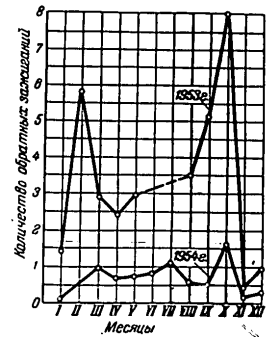
Опыт эксплуатации показал, что основное силовое оборудование, в первую очередь преобразовательные трансформаторы

и линейные реакторы, а также подстанционная изоляция работают надежно, несмотря на весьма большое количество коротких замыканий, которым подвергалось это оборудование при нескольких тысячах аварийных процессов во время опытов.

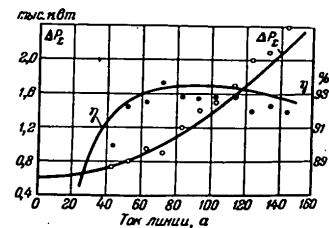
Исключением были лишь индивидуальные изолирующие трансформаторы, изоляция которых оказалась недостаточной для условий работы в схеме преобразовательных подстанций. Часть изолирующих трансформаторов была впоследствии заменена.

Несмотря на специфичность и сложность оборудования преобразовательных подстанций постоянного тока, обслуживающий персонал без особых трудностей освоил эксплуатацию электропередачи. Если в первый период эксплуатации в зале ртутных вентилях дежурили техники и электромонтеры, то за последние 2 года техники от дежурства освобождены и в зале вентилях находится лишь электромонтер, главным образом для фиксации всех наблюдений во время опытов и нормальной эксплуатации.

Данные о к. п. д. и потерях в опытно-промышленной передаче Кашира — Москва приведены на фиг. 19.



Фиг. 18. Динамика обратных зажиганиях вентилях в 1953—1954 гг.



Фиг. 19. Коэффициент полезного действия и потери в опытно-промышленной передаче.

СОДЕРЖАНИЕ

| | Стр. |
|--|------|
| Введение | 1 |
| Схемы электропередачи | 3 |
| Кабельная линия | 6 |
| Преобразовательные подстанции | 8 |
| Ртутные вентили | 10 |
| Сеточное управление, регулирование и защита | 14 |
| Наладка и основные виды нарушений нормальной работы передачи | 17 |
| Краткие итоги эксплуатации опытно-промышленной электропередачи | 21 |