

6
АЗ

МВ и ССО РСФСР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. И. КАЛИНИНА

Н. М. МЕЛЬГУНОВ

**Электропередачи постоянного тока
с конденсаторным присоединением
мостовых преобразователей**

Авторский реферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1960

ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОНДЕНСАТОРНЫМ ПРИСОЕДИНЕНИЕМ МОСТОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Настоящая работа посвящена поисковому исследованию применения на преобразовательных подстанциях линий передач постоянного тока новой, предложенной диссертантом¹ схемы многомостового преобразователя.

Принципиальное отличие рассматриваемой преобразовательной схемы от обычно проектируемых схем преобразовательных подстанций заключается в присоединении мостовых преобразователей к стороне переменного тока подстанции не через трансформаторы, как обычно, а через конденсаторные батареи, набранные из параллельно и последовательно соединенных конденсаторов, включаемые последовательно в фазы мостов.

При работе мостовой преобразовательной схемы включенные в фазы мостов конденсаторные батареи обтекаются 50-периодным переменным током и работают в режиме наличия на них не только переменного напряжения, но и удерживают на себе возникающий при работе мостовой схемы «подпор напряжения» — напряжение постоянное по знаку, что делает возможным одновременное заземление полюса моста и нейтрали трансформаторов в системе.

Преобразовательные мосты, присоединенные к системе через конденсаторные батареи, могут соединяться последовательно на стороне постоянного тока, давая соответственно увеличенное выпрямленное напряжение, кратное числу последовательно соединенных мостов; при этом постоянная составляющая напряжения, удерживаемая конденсаторами, тем больше по величине, чем далее отстоит данный мост в цепочке мостов от заземленного полюса цепочки.

Отметим ожидаемые основные преимущества схемы:

1. Конденсаторное присоединение позволяет обойтись без специальных основных трансформаторов, работающих с высоким подпором постоянного напряжения и требующих обес-

¹ Н. М. Мельгунов, Авторское свидетельство № 105207, приоритет 7.1.1952.

печения их динамической прочности при аварийных процессах.

2. Замена трансформаторов конденсаторными батареями со значительно меньшими потерями, чем у трансформаторов, при их полной нагрузке (0,25—0,30% против 0,8—0,9%) и незначительными при холостом ходе (против 0,35—0,40% у трансформаторов) позволяет за этот счет резко снизить потери, увеличить к. п. д. подстанции и передачи.

3. Конденсаторные батареи, через которые преобразователи присоединяются к системе переменного тока, одновременно являются источниками генерирования реактивной мощности для покрытия потребности в ней инвертора и отдачи в нагрузки системы.

4. Как следствие, возникает возможность избежать установки на инверторной подстанции и в приемной системе обычно проектируемых синхронных компенсаторов с их относительно высокими потерями (1,3—1,5% при номинальной нагрузке) или параллельно присоединенных батарей статических конденсаторов.

5. Конденсаторное присоединение мостов позволяет радикально увеличить устойчивость работы инвертора в случаях коротких замыканий любой полюсности и посадок напряжений в приемной энергосистеме.

6. Имеется возможность получения более благоприятных внешних характеристик инвертора для осуществления параллельной работы инверторных подстанций с устойчивым и регулируемым распределением между ними нагрузки.

Практическая актуальность разрабатываемой схемы для перспектив развития энергетики СССР определяется тем, что по произведенным расчетам стоимость сооружения инверторных подстанций, при обычном их исполнении, составляет весьма значительную часть (35—50%) полной стоимости передач постоянного тока, даже весьма дальних и мощных; как показывают подсчеты, преобладающая часть стоимости инверторной подстанции (70—80%) при обычном ее исполнении определяется стоимостью трансформаторов и компенсирующих устройств (синхронные компенсаторы и параллельные конденсаторные батареи на подстанции и в системе); исследуемые новые решения позволяют снижать именно эти преобладающие расходы.

Кроме того, в трансформаторах и компенсирующих устройствах инверторной подстанции и системы сосредотачивается обычно преобладающая часть подстанционных потерь (75—85%), которые могут быть снижены радикально (в несколько раз) путем применения предлагаемых новых решений.

Для выяснения возможностей практического использования схем с конденсаторным присоединением мостов потребо-

валась разработка различных конкретных вариантов их исполнения.

Одновременно потребовалась разработка решений и мероприятий по преодолению специфических трудностей, возникающих при использовании исследуемой схемы, выяснявшихся и уточнявшихся в данном исследовании.

При изучении *нормальных установившихся* режимов, получении режимных характеристик и выяснении соответствующих условий работы оборудования основным методом исследования является метод аналитических расчетов, для чего были получены в данной работе необходимые аналитические выражения.

Для изучения *аварийных и переходных* процессов основным и единственно практически реальным на данной стадии поискового исследования методом исследования является метод лабораторного их моделирования. Это определялось большим многообразием таких процессов при различных исходных условиях, вариантах и параметрах схемы; кроме того, применение разработанных специальных автоматических устройств особенно усложняет и затрудняет аналитическое рассмотрение переходных процессов.

Схемы преобразовательных подстанций с последовательным включением конденсаторных батарей в фазы присоединения мостов последовательно с обмотками главных трансформаторов, сходные в некоторых отношениях со схемой, исследуемой в данной работе, предлагались и исследовались (преимущественно в установившихся режимах) в ряде работ в СССР и за границей (Максаков, Busemann, Шипулина, Глинтерник); однако данная исследуемая схема имеет важные принципиальные отличия от других предлагавшихся (такие, как отсутствие главных трансформаторов, работа батарей при наличии на них постоянной составляющей напряжения, возможные малые индуктивности контура коммутации и др.).

Произведенные в данной работе расчеты характеристик исследуемой схемы и условий работы оборудования выполнялись для разрабатывавшихся вариантов исполнения применительно к ожидаемым мощным передачам постоянного тока с использованием методики расчетов, разработанной независимо от других авторов, применительно к особенностям данной схемы.

В отличие от других авторов наиболее типичными характеристиками для данной схемы были признаны и рассчитаны характеристики для условия постоянства угла погасания ($\delta = \text{const}$).

Была впервые разработана методика расчета и выбора конденсаторных батарей с учетом наличия постоянной составляющей напряжения на конденсаторах, что позволило конкретно оценить связанные с выбором батарей технико-экономические показатели схемы, выяснить возможный эффект допустимых градиентов в изоляции конденсаторов и возможные преимущества применения специальных конденсаторов (предложенных доцентом ЛПИ, к. т. н. Г. С. Кучинским).

Уравнение коммутации моста с конденсаторным присоединением к системе может быть выражено одинаково для выпрямителя и инвертора в таком виде:

$$\frac{2}{C_{\Phi}} \int_0^t idt - \frac{1}{C_{\Phi}} \int_0^t I_n dt + 2L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} \sqrt{3} E_{c.\Phi} \sin(\omega t + \alpha_c) + 2E_0 - \Delta E_0, \quad (1)$$

где C_{Φ} — емкость батареи в фазе моста;
 L — индуктивность фазы контура коммутации;
 $E_{c.\Phi}$ — э. д. с. системы, фазовое действующее значение;
 I_n — выпрямленный ток;
 α_c — угол управления моста относительно точки пересечения фазовых э. д. с. системы;
 $E_0 = \frac{I_n}{300C_{\Phi}}$ — напряжение полного заряда конденсаторной батареи (высота трапеции), не зависящее от хода коммутации;
 ΔE_0 — напряжение, соответствующее дозаряду батареи в фазе гаснущего вентиля за время коммутации.

Принятые в данной работе допущения были обычны (постоянство выпрямленного тока, идеализированные вентили, отсутствие в контуре омических сопротивлений).

Точная зависимость (в меру точности допущений) между величиной выпрямленного тока (I_n) и углом коммутации ($\gamma = \omega t_k$) была получена в следующем виде

$$I_n = \frac{M}{N}, \quad (2)$$

$$M = \sqrt{2} \sqrt{3} \frac{m}{m^2 - 1} \left[\frac{m \sin(\alpha_c + \gamma) - m \sin \alpha_c \cos m\gamma - \cos \alpha_c \sin m\gamma}{1 + \cos m\gamma} + \frac{\cos(\alpha_c + \gamma) - \cos \alpha_c \cos m\gamma}{\sin m\gamma} + m \sin \alpha_c \right]; \quad (3)$$

$$N = \frac{1}{1 + \cos m\gamma} \left[\frac{\sin m\gamma}{m} + \gamma - \frac{4}{300C_{\Phi}} \right] + m\omega L \frac{1 + \cos m\gamma}{\sin m\gamma}. \quad (4)$$

Здесь

$$m = \frac{\beta}{\omega}; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{LC_{\Phi}}}. \quad (6)$$

Активная и реактивная мощности на шинах подстанции имеют соответственно выражения:

$$W_a = 3E_{c.\Phi} J_c (\alpha_c + \tau); \quad (7)$$

$$W_{p.n} = 3E_{c.\Phi} J_c [(\sin \alpha_c + \tau) \pm e_x], \quad (8)$$

где J_c — основная синусоида трапеции тока;

$$\left. \begin{aligned} J_c &= \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \tau}{\tau} I_n; \\ \tau &= \frac{\gamma}{2}; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

e_x — относительное индуктивное падение напряжения в фазе:

$$e_x = \frac{J_c x_{c.\Phi}}{E_{c.\Phi}}. \quad (10)$$

Целесообразно дальнейшее приближенное допущение замены трапеции напряжения на батарее основной синусоидой этой трапеции (ошибка не более 0,20—0,25%), что позволит получить внешнюю характеристику преобразователя в виде

$$E_n = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{\pi} E_{c.\Phi} \cos(\alpha_c + \tau) \cos \tau. \quad (11)$$

Дается метод получения основных характеристик работы инвертора для условия заданного постоянства угла погасания инвертора ($\delta = \text{const}$), что актуально, поскольку в этом автоматически поддерживаемом режиме инвертор не опрокидывается при снижениях тока нагрузки, работая при этом всегда с соответственным высоким использованием по реактивной мощности.

Приводится также упрощенный приближенный метод получения зависимости γ от I_n на основе дополнительных приближенных допущений (учитывая кратковременность периода коммутации в данной схеме) и показано, когда этим методом

возможно и целесообразно пользоваться, взамен приведенного точного метода, упрощая расчеты.

В результате выполненного рассмотрения и расчетов режимов работы мостового преобразователя с конденсаторным присоединением для вероятных вариантов исполнения были получены следующие основные результаты и выводы:

1. По соображениям режимно-системного характера от инвертора передачи может потребоваться работа с выдачей в приемную систему реактивной мощности той или иной величины; такая работа является для инвертора типичным случаем.

Типичным для выпрямителя следует считать режим с приемом выпрямителем из системы некоторой малой реактивной мощности с $\cos \varphi_c$, близким к единице.

2. Увеличению компенсации¹ (увеличение $\frac{1}{\omega C_\Phi}$ батарей)

соответствует ускорение коммутации при том же угле управления, при той же индуктивности контура.

3. Повышение отдачи реактивной мощности инвертора путем увеличения угла α_c сопровождается повышением угла γ .

4. Снижение по какой-либо причине тока инвертора, работающего с углом управления α_c , большим 180° , вызывает рост угла коммутации γ и снижение угла погасания δ ; поэтому для удержания инвертора в работе регулирование должно автоматически снизить угол управления α_c , обеспечивая при этом поддержание достаточно большого угла погасания δ .

5. Расчеты, выполненные для больших значений выпрямленного тока, превышающих номинальные в 2,5—3 раза, позволили выяснить важный факт относительно небольшого при этом изменения углов коммутации, что означает отсутствие опасности опрокидываний инвертора при больших токах.

6. Наклон внешних характеристик выпрямителя и инвертора мал при типичных для рассматриваемой схемы малых значениях индуктивности.

7. При значениях α_c , больших 180° , при определенном снижении тока инвертора начинается зона неустойчивой работы его. Очевидно, что при углах α_c , меньших 180° на величину угла погасания δ (заданного), работа инвертора устойчива при любом малом токе (при приеме реактивной мощности из системы).

¹ Под относительным напряжением (или «компенсацией») фазовых батарей присоединения понимается отношение высоты трапеции напряжения фазовой батареи при номинальном токе к величине фазовой э. д. с. системы (амплитудному значению) и обозначается нами далее буквой b .

8. Для работы инвертора с коэффициентом мощности около единицы при нагрузке, близкой к номинальной, как то следует из расчетов, достаточна величина компенсации около 35—40%; для получения $\cos \varphi_c = 0,90$ при нагрузках, близких к номинальной, требуется величина компенсации около 80%. Следует отметить, что для поддержания отдачи реактивной мощности в систему при пониженных нагрузках целесообразно применять отключение под нагрузкой части параллельных цепей конденсаторных батарей (увеличение $\frac{1}{\omega C_\Phi}$).

9. Напряжение моста с учетом напряжений на конденсаторах составляет около 105—107% от эквивалентной э. д. с. системы, т. е. мало отличается от таковой.

10. Первоначальный толчок напряжения при погасании в зависимости от параметров установки и режимов составляет от эквивалентной э. д. с. системы 25—26% и менее.

11. Средняя скорость изменения тока за период коммутации, в зависимости от параметров установки и режима, составляет 8—15% от номинального тока на электрический градус. Наиболее вероятна работа со средней скоростью коммутации около 10—12% номинального тока на электрический градус (если не принимать специальных мер), что в 1,5—2 раза превосходит соответствующее значение для передачи Сталинградская ГЭС — Донбасс (5,5—6% на градус), скоммутированной по обычной схеме с синхронными компенсаторами.

12. Если потребуется, по условиям работы вентиляей, снизить среднюю скорость изменения тока за период коммутации, то это может быть выполнено введением в фазы мостов относительно недорогих дополнительных индуктивностей (катушек без железа).

Фазовые батареи в целом и отдельные конденсаторы, при их последовательном и параллельном включении в батарею, должны выдерживать одновременно переменную и постоянную составляющие напряжения. Переменная составляющая напряжения на конденсаторной батарее (трапеция напряжения) определяется задаваемым режимом работы инвертора, а также требуемой от него выдачей реактивной мощности; эта переменная составляющая может определяться «величиной компенсации» b (см. выше).

Постоянная составляющая напряжения, приходящаяся на конденсаторные батареи моста, определится «подпором» напряжения моста, который в свою очередь (при равенстве напряжений мостов) определяется местом моста и соответствующим коэффициентом N_m , причем $N_m E_{п.м}$ — величина подпора напряжения моста; для мостов I—IV и т. д. коэффициенты N_m составляют 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 и т. д.

Для отношения постоянной и переменной (амплитуды) составляющих напряжения в батарее любого моста было получено выражение:

$$K_6 = 1,65 \frac{100}{b} N_m \cos \varphi_c, \quad (12)$$

где φ_c — угол сдвига тока и напряжения системы.

Полученные по этой формуле значения искомого отношения даны в таблице. Значения $\cos \varphi_c$ рассчитаны для показанных в таблице величин компенсации, приведенной индуктивности системы, принятой равной 9%, и угла погасания $\delta = 15^\circ$.

В работе было показано (подробнее см. [1]), как могут быть обеспечены требуемые отношения постоянной (E_{p-}) и переменной (E_{p-m}) составляющих напряжения, при применении обычных конденсаторов продольной компенсации, и как возрастут при этом мощности батарей (в процентах к эквивалентной мощности мостов и подстанций в целом), при учете наличия постоянной составляющей напряжения. Были приняты следующие исходные данные для обычных конденсаторов из конденсаторной бумаги: суммарная рабочая напряженность E_p была принята вариантно, равной 35, 40, 45 кв/мм; переменная составляющая напряженности (амплитудное значение) $E_{p-m} = 17,6$ кв/мм.

Отношение постоянной и переменной составляющих напряжения конденсаторных батарей мостов

b, %	cos φ_c	Отношение $K_6 = N_m \frac{E_{п.м}}{E_6}$			
		I	II	III	IV
20	1,00	4,12	—	—	—
40	1,00	2,06	6,19	—	—
60	0,99	1,36	4,08	6,80	9,50
80	0,935	0,97	2,90	4,85	6,79

Из полученных результатов следует, что с применением обычных конденсаторов практически целесообразны только одномостовые и двухмостовые (в полупеци) преобразовательные схемы, так как для четырехмостовых схем мощность батарей из обычных конденсаторов резко возрастет.

В связи с этими результатами рассмотрения возникает вопрос о целесообразности создания специальных конденсаторов с высокими допустимыми значениями $\frac{E_{p-}}{E_{p-m}}$, маркируемых по их мощности на переменном токе, что позволило бы избежать указанного ранее завышения мощности батарей и существенно повысить технико-экономический эффект.

Возможный путь создания таких специальных конденсаторов с большими отношениями $\frac{E_{p-}}{E_{p-m}}$, при невысокой стоимости, указан Г. С. Кучинским, предположившим применить для их изготовления дешевую кабельную бумагу.

Расчеты были выполнены ввиду отсутствия достаточных экспериментальных данных для конденсаторов из кабельной бумаги также для двух значений суммарной рабочей напряженности $E_p = 35 \div 40$ кв/мм, при переменной составляющей напряженности $E_{p-m} = 9,2$ кв/мм (против 17,6 при конденсаторной бумаге).

Применение специальных конденсаторов, как показали расчеты (подробнее см. [1]), может обеспечить большое снижение расхода конденсаторов и позволит практически осуществить не только двухмостовые (в полупеци), но и четырехмостовые схемы преобразования.

В работе предложены варианты осуществления 12-фазного преобразователя при конденсаторном присоединении каскадно-включенных мостов.

Показано, что при конденсаторном присоединении сдвиг напряжений, подаваемых на мосты, можно осуществлять при помощи вспомогательных фазосдвигающих трансформаторов, осуществляющих сдвиг подаваемого на мосты напряжения на $\pm 15^\circ$, т. е. на 30° одного относительно другого. Типовая мощность такого фазосдвигающего трансформатора составляет около 25% от мощности соответствующих мостов.

Предлагалось и исследовалось выполнение преобразовательной подстанции с 12-фазным режимом преобразования при конденсаторном присоединении мостов без фазосдвигающего трансформатора с получением требуемого сдвига по фазе коммутации тока в каскадно-включенных мостах за счет разновременной (со сдвигом по фазе на 30°) подачи опирающихся импульсов от сеточного управления на вентили мостов¹; присоединение мостов к системе переменного тока через раз-

¹ Н. М. Мельгунов, Авторское свидетельство на изобретение № 110277, приоритет 6/XII 1956 г.

личные, соответственно выбранные емкости позволяет получить такой же (при номинальном режиме) сдвиг фаз напряжений, подаваемых на мосты.

Увеличением числа последовательно включенных конденсаторов в батареях мостов по мере удаления их от нейтрали схемы, помимо осуществления желаемого сдвига фаз напряжений на мостах, упоминавшегося выше, достигается также очень важная возможность снижения расхода конденсаторов для выполнения батарей мостов, удаленных от нейтрали схемы с их высокими постоянными напряжениями «подпора».

Ввиду того, что напряжение (переменная составляющая) на конденсаторных батареях пропорционально току нагрузки, угол сдвига между векторами напряжения, подаваемого на мосты, будет меняться в зависимости от нагрузки (уменьшаться с ее снижением). Поддержание величины этого угла может быть достигнуто отключением под нагрузкой части параллельно включенных цепочек конденсаторов в батареях мостов.

Поскольку мощность конденсаторных батарей быстро возрастает с увеличением числа каскадно-включенных мостов, оказалось технически и экономически целесообразным в некоторых случаях применение «смешанных» вариантов присоединения мостов, именно, присоединение мостов, ближайших к нейтрали, остается чисто конденсаторным, а мостов, удаленных от нейтрали, осуществляется через конденсаторы, включаемые (со стороны инвертора) последовательно с трансформатором без заземленной нейтрали, с перенесением на такой трансформатор постоянной составляющей напряжения. Это позволяет снизить мощность конденсаторов удаленных мостов до величины, определяемой без «подпора», без наличия постоянной составляющей напряжения.

Для всех трех, указанных выше видов исполнения инверторных подстанций было произведено ориентировочное (по методике ТЭП) сопоставление основных экономических показателей с таковыми для вариантов обычного исполнения этих подстанций с присоединением мостов через трансформаторы и с применением вариантно-синхронных компенсаторов или параллельных батарей статических конденсаторов. Определялись и сравнивались (только в изменяемой части вариантов) следующие показатели: капитальные затраты, электрические потери, итоговые годовые затраты.

В результате расчетов получены следующие основные выводы в этой части:

1. Наибольший эффект в смысле снижения электрических потерь инверторной подстанции дают варианты без трансформаторов, обеспечивающие вне зависимости от типа конденса-

торов снижение сопоставляемых потерь в 14—15 раз (повышение к. п. д. на 1,8—2%), если сравнивать с обычной схемой при применении синхронных компенсаторов; если сравнивать с вариантом применения (на подстанции и в системе) только параллельных батарей конденсаторов, то потери снизятся в 8—8,5 раза (повышение к. п. д. ~ на 1%).

2. При применении обычных конденсаторов большое снижение капитальных затрат на подстанцию (в сравниваемой части) рассматриваемая схема может дать только в двухмостовой (на цепь) схеме, а также в четырехмостовой схеме со смешанным присоединением (до 54—74%); применение специальных конденсаторов дает большую экономию капитальных затрат также и при четырехмостовой схеме (без трансформаторов).

3. Большой итоговый технико-экономический эффект (снижение годовых затрат более, чем на 25%) дает применение рассматриваемых схем с конденсаторным присоединением мостов в следующих случаях:

а) с применением обычных конденсаторов при градиентах 35 кв/мм: в двухмостовых (на цепь) схемах; в четырех- и восьмимостовых (на цепь) схемах, при смешанном присоединении мостов;

б) то же, при обычных конденсаторах, но при градиентах 40 и 45 кв/мм: также в четырехмостовых (на цепь) схемах, при чисто конденсаторном присоединении;

в) при специальных конденсаторах: также и при восьмимостовых (на цепь) схемах; при четырехмостовых схемах снижение сопоставляемых затрат превосходит 50%.

В последнем пункте (3) под снижением итоговых затрат имелось в виду сравнение с «обычным» вариантом и применением параллельных батарей статических конденсаторов с их значительно меньшими потерями, чем у синхронных компенсаторов; в последнем случае снижение затрат было бы значительно выше показанного.

Лабораторное экспериментальное исследование переходных процессов осуществлялось безотносительно к какому-либо конкретному объекту, но для ожидаемых средних соотношений параметров перспективных передач.

Выпрямленное напряжение лабораторной модели составляло в различных опытах от 600 до 900 вольт, номинальный ток модели (100%) был выбран в 2,5 ампера. Масштаб сопротивлений был в пределах 0,7—1,4 для различных опытов.

Для инвертора аварийные и переходные процессы моделировались для шестифазной одномостовой схемы, а также для 12-фазных схем с каскадным соединением мостов, именно для

схемы с фазосдвигающим трансформатором и схемы со сдвигом зажигания.

Наибольший практический интерес представляло изучение возможных, при переходных процессах, перенапряжений на элементах схемы: на линии, мосту, конденсаторах и реакторах и особенно на вентилях.

На лабораторной модели в условиях различных аварийных и переходных процессов были проверены в действии разработанные мероприятия и устройства, предназначенные для предотвращения и возможного неблагоприятного развития различных нарушений нормальной работы исследуемых схем. Принципы исполнения и работы этих устройств разъясняются ниже.

1. Шунтирующее устройство мостового преобразователя (сокращенно ш. у. м.)¹.

Включается параллельно мосту инвертора; содержит вентиль на то же напряжение, что и вентили моста, с последовательно включенным надлежаще выбранным омическим сопротивлением, которое, в свою очередь, шунтировано емкостью. Вентиль при нормальной работе моста заперт и может быть мгновенно открыт подачей однократного импульса управления в случае необходимости перевода тока с моста на ш. у. м.; одновременное снятие импульсов управления с вентиля моста приводит к запирающему последнему. Возобновление подачи импульсов управления на вентили моста дает возможность обратного перевода тока с ш. у. м. на мост. Шунтирующее устройство, как показали опыты, является наиболее радикальным средством предотвращения возможных высоких напряжений на вентилях и конденсаторах, возникающих в данной схеме (инверторе) при двухполюсном опрокидывании.

2. Выключающее устройство мостового преобразователя (сокращенно в. у. м.).

При надлежащем выборе параметров емкости и сопротивления предыдущего устройства (при их увеличении) может быть обеспечено отключение работающего моста путем подачи однократного отпирающего импульса на вентиль в. у. м. при одновременном снятии всех импульсов управления с вентиля моста; возникающий при достаточно большом сопротивлении колебательный процесс переводит ток в вентиле в. у. м. через нуль, который при этом запирается. Возобновление подачи управляющих импульсов на вентили моста обеспечивает его обратный ввод в работу (АПВ).

¹ Авторская заявка № 579712/24 и решение Комитета при Совете Министров СССР от 28.IV.58 г о выдаче авторского свидетельства на имя Н. М. Мельгунова, Н. А. Канащенко, М. Т. Крылова, В. Н. Вяткина.

3. Шунтирующее устройство выпрямителя (сокращенно ш. у. в).

Включается параллельно мосту выпрямителя; содержит вентиль с последовательно включенным сопротивлением; вентиль направлен одинаково с вентилями моста и нормально заперт напряжением последнего, а также напряжением смещения на сетке. При перемене по внешним причинам знака напряжения на мосту и делителе напряжения (с которого подается на сетку вентиля напряжение, противодействующее напряжению смещения) ш. у. в. отпирается и шунтирует мост, предотвращая возможное высокое возрастание напряжения на мосту и линии (обратного знака).

4. Шунтирующий вентиль реактора¹ (сокращенно ш. в. р.).

Включается параллельно реакторам в цепи постоянного тока; содержит вентиль с вентильным действием, направленным противоположно направлению тока в реакторе. Нормально вентиль заперт сеточным смещением.

При возникновении в реакторе значительной э. д. с., стремящейся поддержать ток предшествующего режима, снижаемый в цепи внешними причинами, вентиль отпирается и замыкает через сопротивление реактор, снижая соответственно его инерционный эффект (резко ослабляя поддержание им тока в цепи).

Как показали многочисленные опыты на модели, шунтирующий вентиль реактора приходит в действие при различных аварийных и переходных процессах в схеме, эффективно демпфируя возникающие в схеме колебания и снижая возможные перенапряжения на вентилях.

5. Резервирующее разрядное устройство моста (сокращенно р. р. у.).

Включается на преобразователе между фазами (треугольником) на стороне моста. Предназначается для выравнивания напряжений подпора (постоянного знака), которые при нормальном режиме работы равны и могут резко отклоняться от нормальных значений (с различным знаком) на любых двух фазах при переходных процессах, преимущественно при двухфазных опрокидываниях инвертора.

6. Устройство автоматического отвода угла регулирования при снижениях тока инвертора (сокращенно о. т. у.).

Устройство автоматически снижает угол регулирования инвертора, соответственно происходящему (по внешним причинам) снижению тока инвертора, обеспечивая при всех значениях тока необходимый угол запаса δ и предотвращая опрокидывание инвертора.

¹ Авторское свидетельство, № 121177, приоритет от 13.XI.1958 г.

Устройство было проверено в действии на лабораторной модели.

Проведенные лабораторные исследования схемы в переходных процессах, при наличии и отсутствии указанных выше специальных и обычных автоматических устройств, позволили сделать следующие основные выводы в этой части.

1. *Режим двухфазного опрокидывания инвертора* возникает при снятии импульсов управления со всех вентилях моста инвертора; сопровождается перенапряжениями на конденсаторах, на двух вентилях и мосту в целом.

Перенапряжение (особенно на мосту) может быть снижено автоматически действием ш. в. р., снижающих индуктивность цепи постоянного тока; двухполюсное опрокидывание и перенапряжения могут быть предотвращены шунтировкой моста действием ш. у. м.

2. *Пропуск зажигания вентиля инвертора* приводит к однофазному опрокидыванию. В случае преходящего пропуска вентиля нормальная работа моста восстанавливается при возобновлении работы вентиля; показан значительный полезный эффект наличия и работы ш. в. р. при однофазном опрокидывании инвертора демпфирующих колебания напряжений в схеме; нет необходимости в шунтировании моста при кратковременном пропуске зажигания.

3. *Пробой или перекрытие вентиля инвертора* приводит к однофазному опрокидыванию моста; при восстановлении нормальной работы вентиля и наличии в работе ш. в. р. обеспечивается быстрое возобновление нормальной работы.

4. *Короткие замыкания и посадки напряжения в приемной системе инвертора* не приводят к опрокидыванию инвертора даже в случаях, весьма близких к з. и глубоким посадкам напряжения. Восстановление нормальной работы при отключении к. з. протекает успешно при наличии о. т. у. и работающих ш. в. р., которые снижают раскачку напряжений на элементах схемы в переходном процессе.

5. *Снижение напряжения в системе выпрямителя* вызывает, при отсутствии о. т. у., опрокидывание инвертора, работавшего с углом управления $\alpha \geq 180^\circ$; при наличии в работе о. т. у. происходит только снижение тока или запираение инвертора на время посадки напряжения, но без опрокидывания. Исследовались также обратные зажигания и другие переходные процессы выпрямителя.

В данном поисковом исследовании было выяснено наличие у инверторных подстанций с конденсаторным присоединением мостов (или с последовательной емкостью в фазах присоединения мостов) благоприятных особенностей для осуществления параллельной работы таких подстанций. При возрастании

нагрузки инверторной подстанции с конденсаторным присоединением мостов угол коммутации γ не увеличивается (как при обычном исполнении подстанции) и соответственно не снижается угол погасания (δ); при этом при работе с постоянством угла управления α выдача рассматриваемым инвертором реактивной мощности в систему возрастет (или ее потребление из системы не увеличится).

Инверторы с конденсаторным присоединением мостов имеют «возрастающие» характеристики (увеличение E_n с ростом J_n), благоприятные для устойчивого распределения между ними нагрузки при параллельной работе (подробнее см. [5]).

На лабораторной модели были осуществлены опыты параллельной работы этих инверторов (при $\alpha < 180^\circ$) в ряде переходных процессов, когда на одном из них производилось кратковременное нарушение его нормальной работы (посадка напряжения в системе, пробой вентиля и др.) с последующим автоматическим восстановлением нормального режима параллельной работы.

Проведенные лабораторные исследования и их изложенные выше результаты позволяют перейти к осуществлению опытной преобразовательной установки на передаче Кашира—Москва, назначение которой — всесторонняя проверка и получение опыта работы рассматриваемой преобразовательной схемы в условиях эксплуатации.

Батареи присоединения будут осуществлены из стандартных конденсаторов продольной компенсации типа КМП 0,6-50-1.

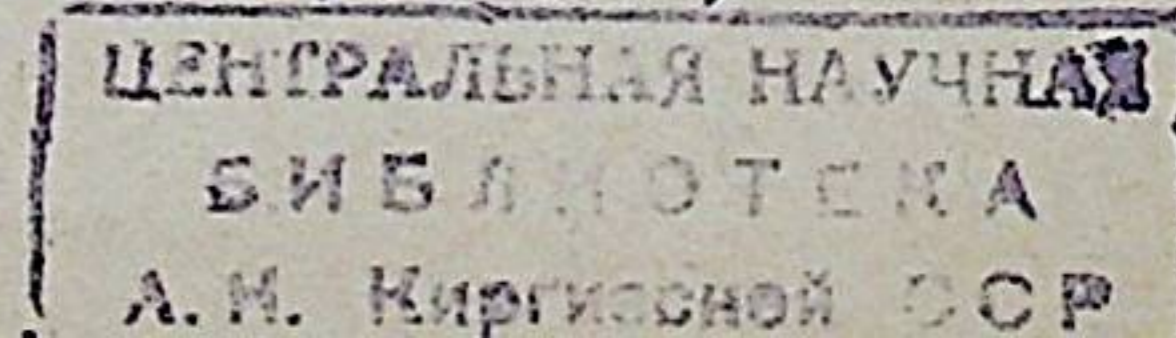
Испытания схемы конденсаторного присоединения мостов в одномостовом и двухмостовом исполнении предусматриваются с осуществлением ряда вариантов схем при постепенно утяжеляющихся и усложняющихся условиях работы оборудования.

Из произведенной разработки вариантов схем и режимов опытной установки выяснены следующие основные ее возможности:

1. Активная мощность установки в инверторном режиме будет от 3—4 до 14 мвт.
2. Коэффициент мощности, выдаваемой в сеть, от 1,0 до 0,9.
3. Выпрямленное напряжение до 130 кВ в одномостовой схеме и до 155 кВ в двухмостовой.
4. Анодное напряжение на вентилях до номинального.
5. Ток вентилях до 70% от номинального.
6. Угол коммутации можно изменять от 3—4° до 12—14°

с соответственным изменением $\frac{dI}{dt}$ вентилях в широком диапазоне.

172827



Основные выводы исследования

1. Подтверждается возможность сооружения электропередач постоянного тока высокого напряжения с конденсаторным присоединением мостовых преобразователей.

2. Возможно получение высокого технико-экономического эффекта, за счет совмещения в конденсаторных батареях мостов функций:

а) присоединения мостов к системе (вместо трансформаторов);

б) генерирования в них реактивной мощности для инвертора и для отдачи в систему (вместо синхронных компенсаторов и параллельных батарей).

Применение специальных конденсаторов повышает технико-экономический эффект в схемах с каскадным включением мостов.

3. Произведенное экспериментальное исследование на лабораторных моделях основных аварийных и переходных процессов с применением разработанных вспомогательных автоматических устройств — подтверждает возможность получения достаточно надежной работы исследуемой схемы.

4. Необходимо осуществление проектируемой опытной установки на передаче Кашира—Москва для проведения на ней всесторонних исследований в условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Мельгунов, Основные особенности схемы с конденсаторным присоединением мостовых преобразователей в электропередачах постоянного тока, Изв. НИИ постоянного тока, сб. № 3, 1958.

2. Н. М. Мельгунов, Схемы с конденсаторным присоединением мостовых преобразователей электропередач постоянного тока, Изв. АН СССР, Отд. технич. наук, июнь, 1957.

3. АН СССР — ВИНТИ под ред. чл.-корр. Л. Р. Неймана — группа авторов, Обзор по передачам постоянного тока, 1958.

4. Н. М. Мельгунов, Ответ на дискуссию в журнале «Электричество» по статье «О перспективах применения электропередач постоянного тока в Советском Союзе», «Электричество», 1958, № 9.

5. Н. М. Мельгунов, По вопросу осуществления промежуточных подстанций на электропередачах постоянного тока, «Электрические станции», 1958, № 12.

6. Н. М. Мельгунов, Авторские свидетельства: № 105207, приоритет 7.I.1952; № 110277, приоритет 6.XII.1956; № 579712/24, приоритет 1.VIII.1957, совм. с М. Т. Крыловым и др.; № 121177, приоритет 13.XI.1958, совм. с В. Н. Вяткиным; № 119598, приоритет 27.X.1958, совм. с В. Н. Вяткиным.