

УДК 621.314.263

А. Г. Воронцов, М. В. Пронин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. С. Адалев, В. Ю. Шелюх, И. А. Дикун

АО «Силовые машины»

Модели модульного многоуровневого поперечного СТАТКОМа

Для управления режимами работы источников электроэнергии и линий электропередач используются СТАТКОМы. Для ЛЭП высокого напряжения применяются модульные многоуровневые СТАТКОМы, в которых в каждой фазе мостовые низковольтные транзисторно-емкостные ячейки соединены последовательно. В статье описана модель СТАТКОМа с произвольным количеством последовательно соединенных ячеек в фазах при соединении фаз в звезду. В модель силовой части СТАТКОМа включено описание трансформатора. Предусмотрена возможность замены трансформатора на токоограничивающий реактор. При моделировании СТАТКОМа разработана структура его системы управления, в которой предусмотрены регулирование реактивной и активной мощностей, а также стабилизация напряжений всех конденсаторов низковольтных транзисторно-емкостных ячеек. Выполнены расчеты электромагнитных процессов в ЭЭС с напряжением 10 кВ. Результаты расчетов подтвердили работоспособность рассмотренного варианта СТАТКОМа и его системы управления.

Поперечный СТАТКОМ, электроэнергетическая система, высоковольтная линия электропередачи, моделирование, компенсация реактивной мощности

В электроэнергетических системах (ЭЭС) при питании через линию электропередачи (ЛЭП) трехфазной нагрузки, имеющей низкий коэффициент мощности, существует задача снижения реактивной мощности ЛЭП и источника питания. Во многих случаях эта задача решается при использовании статических компенсаторов (СТАТКОМов). По сравнению с электромашинными компенсаторами реактивной мощности СТАТКОМы имеют ряд преимуществ: они практически безынерционны, трудоемкость их обслуживания ниже, ремонтпригодность – выше. Кроме решения указанной задачи СТАТКОМы используются также для симметрирования и фильтрации трехфазных систем напряжений, для синхронизации напряжений источников, для распределения мощностей между источниками электроэнергии и потребителями. По способу компенсации реактивной мощности СТАТКОМы делятся на продольные, поперечные, продольно-поперечные и др.

Для трехфазных электросетей низкого напряжения возможно применение транзисторных СТАТКОМов, построенных по мостовой двухуровневой схеме. Для мощных высоковольтных электросетей применяются СТАТКОМы, построенные по многоуровневым схемам – модульные многоуровневые преобразователи (ММП). В зависимости от уровня напряжения ЭЭС, от структуры и элементной базы СТАТКОМа возможны трансформаторные или бестрансформаторные схемы его включения в ЭЭС.

Некоторые технические решения по СТАТКОМам рассмотрены в публикации авторов [1]. В [2] рассматривается задача синхронизации напряжений источников электроэнергии с использованием СТАТКОМа, в [3] – задача распределения мощностей между источниками с помощью СТАТКОМа. В данной статье рассматривается поперечный модульный многоуровневый СТАТКОМ, который подключен к ЭЭС через

трансформатор (в частном случае, при коэффициенте трансформации 1, СТАТКОМ может рассматриваться как бестрансформаторный). ЭЭС содержит трехфазный регулируемый источник электроэнергии и трехфазную нагрузку. В данной ЭЭС напряжение источника равно 10.5 кВ при частоте 50 Гц, но в разработанных моделях системы могут быть заданы и другие параметры. Модель ЭЭС со СТАТКОМом строится по методологии анализа установок по взаимосвязанным подсистемам, которая обеспечивает минимальные затраты машинного времени при расчетах на ЭВМ [1], [4].

Схема ЭЭС с источником энергии, нагрузкой и поперечным СТАТКОМом (рис. 1). В соответствии со схемой, источник электроэнергии содержит симметричную трехфазную систему ЭДС e_{sn} ($n = 1, 2, 3$) с амплитудой E_{mx} и частотой ω . Мощность источника ограничивается индуктивностями фаз L_s . Токи фаз источника – i_{sn} , напряжения фаз – u_{sn} . В одном из вариантов управления ПИ-регулятор действующего напряжения источника контролирует мгновенные значения напряжений фаз и воздействует на амплитуду ЭДС фаз, обеспечивая соответствие напряжения заданному действующему линейному напряжению $U_z = 10.5$ кВ. В другом варианте управления напряжение нагрузки u_{Ln} стабилизируется на заданном уровне.

Электроэнергия источника передается в нагрузку через трехфазную ЛЭП, имеющую в фазах индуктивности L_l и активные сопротивле-

ния R_l . На выходе ЛЭП формируются напряжения нагрузки u_{Ln} . Нагрузка в схеме рис. 1 представлена индуктивностями L_L и активными сопротивлениями R_L , токи в фазах нагрузки – i_{Ln} .

Поперечный СТАТКОМ представлен в схеме трехфазным трансформатором Тр и модульным многоуровневым транзисторным преобразователем (ММП). Каждая фаза ММП содержит несколько низковольтных транзисторно-конденсаторных мостовых ячеек, соединенных последовательно. Количество мостовых ячеек и их напряжения определяются напряжением вторичной обмотки трансформатора и элементной базой низковольтных блоков (транзисторными модулями и конденсаторами).

Система управления СТАТКОМа обеспечивает его синхронную работу с напряжениями ЛЭП, выдачу в ЭЭС заданной реактивной мощности Q_z , а также стабилизацию напряжений всех силовых конденсаторов в мостовых ячейках на заданном уровне u_{Cz} . Для обеспечения работы системы управления СТАТКОМа на ее входы поступают сигналы по напряжениям фаз ЛЭП u_{Ln} , по токам фаз трансформатора i_n (измеряются во вторичной обмотке, но приводятся к сетевой обмотке с учетом коэффициента трансформации), по фактическим напряжениям конденсаторов СТАТКОМа u_{Cnm} (номер фазы $n = 1, 2, 3$, номер низковольтной ячейки в фазе $m = 1, 2, \dots, M$).

Построение модели ЭЭС с поперечным СТАТКОМом методами расчета систем по

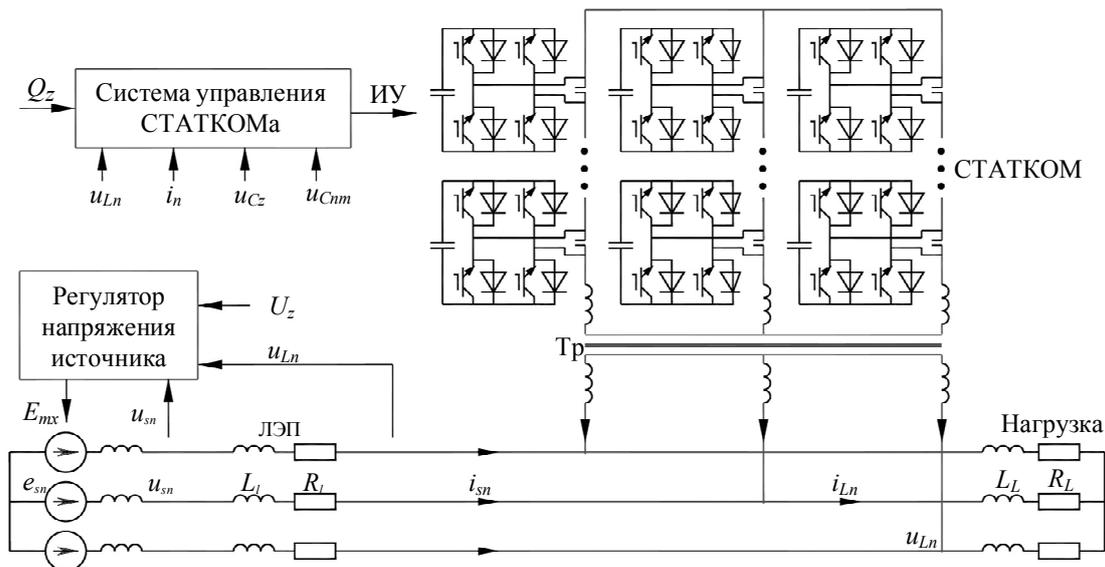


Рис. 1

взаимосвязанным подсистемам. При моделировании ЭЭС рис. 1 силовая часть и система управления (СУ) разделяются на подсистемы и связываются друг с другом сигналами датчиков и управляющих воздействий. Математическое описание силовой (энергетической) подсистемы осуществляется с учетом того, что расчеты переменных во времени выполняются с малыми шагами интегрирования. Описание работы СУ выполняется с учетом дискретности работы микропроцессорных систем.

Моделирование силовой части ЭЭС выполняется при разделении ее на подсистемы, связанные друг с другом зависимыми источниками напряжения и тока. Эта операция осуществляется преобразованием напряжений фаз СТАТКОМа в зависимые источники напряжения u_{Ln} , которые затем переносятся в фазы всех устройств, соединенных в общих узлах схемы. При переносе источников учитывается коэффициент трансформации K_t трансформатора, сопротивления обмотки R_t и его индуктивности рассеяния L_t . Токи и их производные, найденные в подсхемах источника и нагрузки, суммируются с учетом знаков и учитываются в подсхеме СТАТКОМа в качестве зависимых источников тока i_n , как указано на рис. 2.

В симметричном режиме работы ЭЭС в подсхемах источника и нагрузки токи и их производные определяются из следующих выражений:

$$e_{sn} - u'_{Ln} - (L_s + L_l) \frac{di_{sn}}{dt} - R_l i_{sn} = 0;$$

$$u'_{Ln} - L_L \frac{di_{Ln}}{dt} - R_L i_{Ln} = 0;$$

$$u'_{Ln} = u_{Ln} - u_{L0}, \quad u_{L0} = (u_{L1} + u_{L2} + u_{L3})/3, \\ n = 1, 2, 3,$$

где u_{L0} представляет собой напряжение нулевой последовательности, в общем случае формируемое СТАТКОМом.

Токи и их производные в фазах СТАТКОМа

$$\frac{di_n}{dt} = \left(\frac{di_{Ln}}{dt} - \frac{di_{sn}}{dt} \right) \frac{1}{K_t}, \quad i_n = \frac{i_{Ln} - i_{sn}}{K_t}, \quad n = 1, 2, 3.$$

В соответствии с рис. 2 фазы СТАТКОМа замкнуты на зависимые источники тока i_n . При преобразовании мостов СТАТКОМа емкости C_{nm} заменяются зависимыми источниками напряжения u_{Cnm} , как указано на рис. 3, а и б). В этих подсхемах функции k_{1nm} и k_{2nm} определяют состояния плеч моста (функция равна 1, если открыто нижнее плечо, и 0, если открыто верхнее плечо; плечи работают в противофазе). Далее источники u_{Cnm} переносятся в плечи транзисторного моста, и подсхема преобразуется к виду рис. 3, в).

В подсхеме рис. 3, в транзисторы, диоды и источники напряжения u_{Cnm} преобразуются в

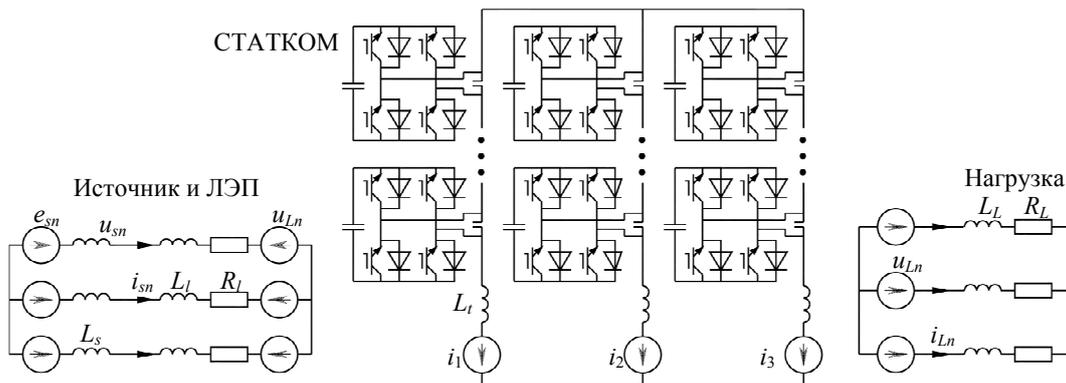


Рис. 2

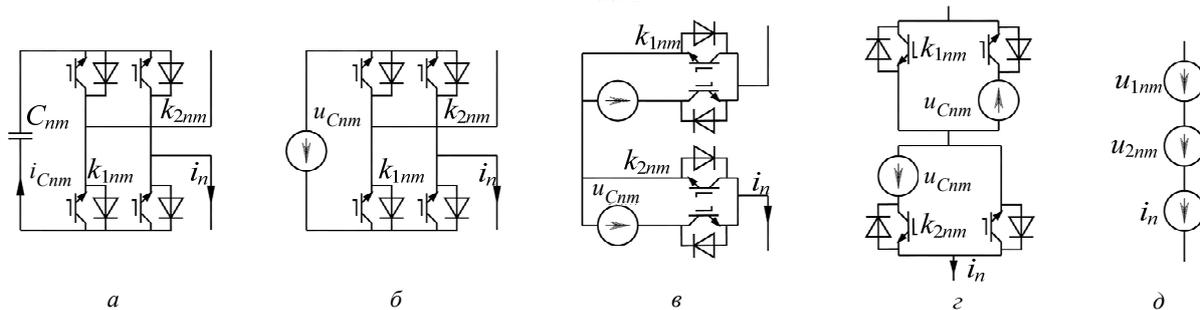


Рис. 3

зависимые источники в соответствии с выражениями

$$u_{1nm} = -k_{1nm}u_{Cnm}; \quad u_{2nm} = k_{2nm}u_{Cnm}.$$

Далее схема рис. 3, в преобразуется к виду рис. 3, з и д.

В СТАТКОМе в каждой фазе включены последовательно M мостовых транзисторно-емкостных ячеек, каждая из которых представляется согласно рис. 3. Суммарные фазные напряжения (ЭДС) этих ячеек

$$e_n = \sum_{m=1}^M (u_{1nm} + u_{2nm}).$$

Напряжения фаз СТАТКОМа трансформируются в сетевую обмотку следующим образом:

$$u_{Ln} = \left(e_n - R_t i_n - L_t \frac{di_n}{dt} \right) K_t.$$

Управление СТАТКОМом и регулирование процессов в ЭЭС. Импульсы управления (ИУ) транзисторами СТАТКОМа k_{1nm} и k_{2nm} каждого моста формируются при сравнении пилообразного опорного напряжения $u_{оп}$ с напряжениями управления u_{y1nm} и u_{y2nm} ($u_{y2nm} = -u_{y1nm}$). Для первых двух плеч моста алгоритм формирования ИУ двух транзисторов поясняется рис. 4 (дискретность напряжения управления соответствует периоду опорных напряжений).

В зависимости от знака тока в фазе СТАТКОМа i и от значений напряжений управления ток протекает или через конденсатор моста, фор-

мируя ток конденсатора i_C , заряжая или разряжая его, или через транзисторы и диоды моста, минуя емкость. Диаграммы, поясняющие эти процессы, представлены на рис. 5 (для упрощения индексы при токах и других переменных опущены).

Как видно из рисунка, при выбранных (для примера) на нем напряжениях управления, положительный ток фазы СТАТКОМа ($i > 0$) разряжает емкость ячейки C , отрицательный ток ($i < 0$) – заряжает емкость. Увеличение по модулю напряжений управления моста u_{y1} и u_{y2} усиливает этот эффект, уменьшение – ослабляет.

Структурная схема системы управления СТАТКОМа представлена на рис. 6. В соответствии со схемой в системе управления заданными параметрами для регулирования служат реактивная мощность Q_z и напряжения конденсаторов u_{Cz} , измеряемыми параметрами – напряжения фаз электросети u_{Ln} , токи фаз вторичной обмотки трансформатора, фактические напряжения конденсаторов u_{Cnm} .

Токи, измеренные в фазах вторичной обмотки трансформатора, приводятся к сетевой обмотке. Полученные токи сетевой обмотки i_n и напряжения фаз сети u_{Ln} поступают на входы блока вычисления фаз векторов тока τ_i и напряжения τ_u . Эти параметры определяются с использованием трехфазных фильтров автоподстройки частоты [1, с. 124]. В этих фильтрах определяются также действующие значения напряжений фаз сети U_L и токов фаз сетевой обмотки трансформатора I .

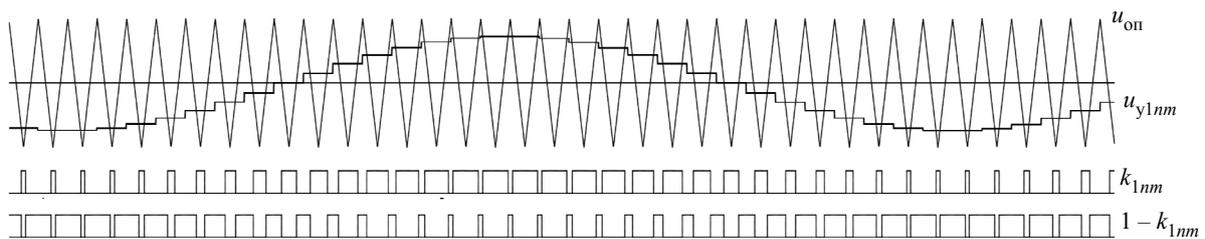


Рис. 4

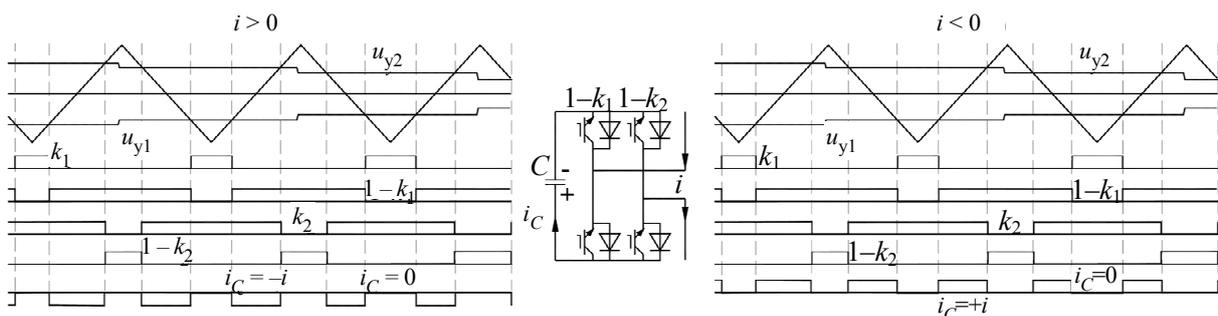


Рис. 5

Указанные операции позволяют вычислить реактивную мощность СТАТКОМа

$$Q_{st} = 3U_L I \sin(\tau_u - \tau_i).$$

Амплитуда заданной реактивной составляющей тока формируется ПИ-регулятором, на входы которого поступают сигналы по заданной реактивной мощности Q_z и по фактической реактивной мощности Q_{st} . На выходе этого регулятора формируется амплитуда реактивного тока I_{rz} , что позволяет определить заданные реактивные токи фаз СТАТКОМа

$$i_{rzn} = I_{rz} \cos[\tau_u - (n-1)2\pi/3].$$

Положительные значения Q_{st} и I_{rz} соответствуют потреблению СТАТКОМом реактивной мощности из сети. При этом реактивные составляющие токов фаз образуют симметричную систему прямой последовательности, равномерно нагружающую все фазы СТАТКОМа.

Амплитуды активных составляющих заданных токов фаз формируются ПИ-регуляторами напряжений конденсаторов мостовых ячеек. На входы этих регуляторов подаются заданное напряжение конденсаторов u_{Cz} и усредненное напряжение конденсаторов мостовых ячеек в каждой фазе СТАТКОМа

$$u_{Cn} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M u_{Cnm}.$$

На выходе регуляторов активных составляющих токов формируются амплитуды I_{azn} , которые

позволяют определить мгновенные активные токи фаз СТАТКОМа

$$i_{azn} = I_{azn} \sin[\tau_u - (n-1)2\pi/3]. \quad (1)$$

Положительное значение I_{azn} соответствует потреблению конкретной фазой активной мощности из сети.

Мгновенные значения заданных токов фаз СТАТКОМа

$$i_{zn} = i_{azn} + i_{rzn}.$$

Заданные токи фаз i_{zn} и фактические токи i_n поступают на входы П-регуляторов, на выходах которых формируются токовые составляющие напряжений управления фаз СТАТКОМа u_{yin} . Токовые составляющие напряжений управления пофазно суммируются с составляющими по напряжениям управления фаз u_{yun} , формируемых трехфазным фильтром автоподстройки частоты, что иллюстрирует рис. 6 (фильтр аналогичен указанным ранее фильтрам напряжений и токов [1]). Полученные суммы представляют собой основные составляющие напряжений управления фаз всех мостов СТАТКОМа u_{yn} , обеспечивающие генерацию требуемых реактивной и активной мощностей. В каждой фазе СТАТКОМа основные составляющие напряжений управления одинаковы для всех последовательно включенных транзисторно-емкостных мостовых ячеек. Необходимо отметить, что в соответствии с рис. 6 и (1) амплитуды активных составляющих токов фаз СТАТКОМа могут быть различными, что свидетельствует о наличии в i_{zn} и, соответственно, в u_{yin}

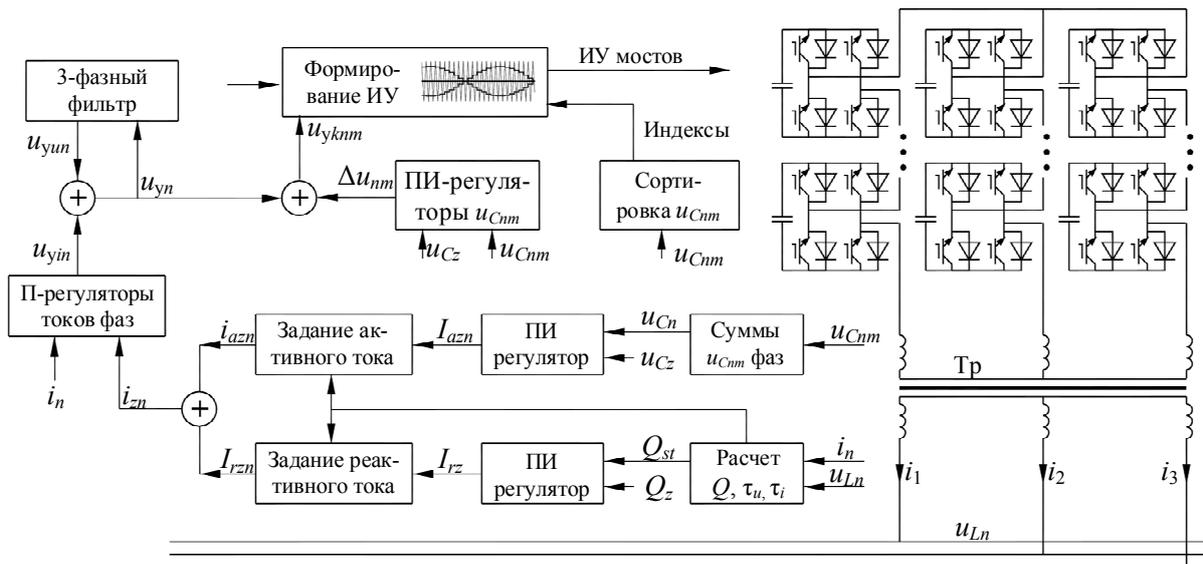


Рис. 6

составляющих нулевой и обратной последовательностей, способствующих выравниванию запасов энергии в конденсаторах фаз, т. е. обмен активной мощностью между фазами СТАТКОМа. В то же время, u_{yup} содержит только составляющие прямой последовательности, обеспечивающие обмен активной и реактивной мощностью с сетью при равномерной нагрузке всех фаз.

Задача системы управления СТАТКОМа заключается также в выравнивании напряжений u_{Cnm} конденсаторов ячеек в фазе и решается ПИ-регуляторами напряжений конденсаторов каждой ячейки. Эти регуляторы формируют добавки Δu_{ynm} к напряжениям управления каждого моста.

При формировании ИУ учитываются направления токов в фазах СТАТКОМа. При возникновении условий для разряда конденсаторов ячеек (как, например, на рис. 5, а) используется нисходящий порядок управления ячейками (от ячейки с наибольшим напряжением конденсатора к ячейке с минимальным напряжением). В противном случае – восходящий порядок. Чтобы реализовать этот алгоритм управления, напряжения конденсаторов сортируются, в результате чего формируется порядок ячеек в каждой фазе [5], [6].

Важной особенностью СУ является то, что для всех мостов, соединенных в каждой фазе по-

следовательно, используются пилообразные (опорные) напряжения, смещенные по фазе. Взаимный сдвиг опорных напряжений задается как отношение π к количеству последовательно соединенных мостов. За счет сдвига пил уменьшаются искажения напряжений и токов фаз СТАТКОМа, повышается быстродействие СУ.

Компьютерная модель ЭЭС с поперечным СТАТКОМом. На основе представленного математического описания ЭЭС разработана компьютерная модель *Mainsland2_StatCom* на языке C++ для расчетов на ЭВМ в среде Visual Studio (версия 13) с использованием программы ComSim1_5 [5]. В модели представленные ранее уравнения, а также описание систем управления объединены в едином алгоритме итерационного расчета электромагнитных процессов в ЭЭС. Предусмотрен вывод графической информации, возможности гармонического анализа кривых и др.

Расчеты процессов в ЭЭС с поперечным СТАТКОМом. Расчеты электромагнитных процессов в ЭЭС с поперечным СТАТКОМом выполнены для установки с напряжением 10.5 кВ при частоте 50 Гц. Мощность нагрузки – 2.1 МВт, длина ЛЭП – 5 км [7], коэффициент мощности нагрузки – 0.9, ЛЭП имеет индуктивности фаз – 0.004 Гн, активные сопротивления фаз –

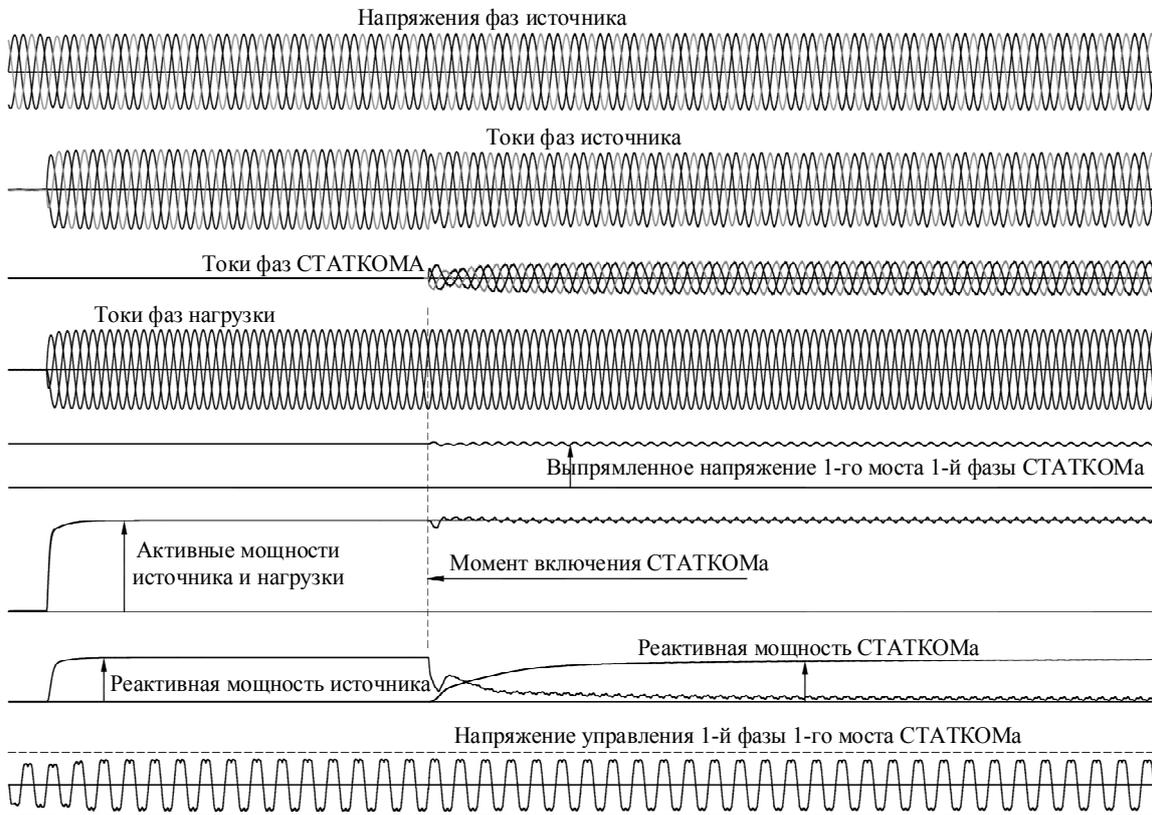


Рис. 7

0.004 Ом. Источник электроэнергии содержит в фазах индуктивности 0.0005 Гн. В СТАТКОМе в каждой фазе последовательно включены 12 транзисторно-емкостных мостовых ячеек, заданные выпрямленные напряжения мостов 800 В, емкость конденсатора в каждой ячейке 2000 мкФ. Коэффициент трансформации трансформатора равен 1 (трансформатора нет), напряжение короткого замыкания трансформатора – 4 % (эквивалент трансформатора – трехфазный реактор), частота ШИМ – 4000 Гц. Шаг интегрирования – 0.5 мкс, шаг записи информации в файл результатов – 20 мкс, заданное число итераций на каждом шаге расчета по времени – 12.

Результат расчета процессов в ЭЭС при подключении нагрузки к источнику с последующим подключением к нагрузке СТАТКОМа представлен на рис. 7. Длительность рассчитанного процесса – около 0.9 с. В момент времени 0.03 с (от начала процесса) к источнику электроэнергии через ЛЭП подключается нагрузка. Тогда в фазах источника и нагрузки появляются токи, которые сравнительно быстро увеличиваются до номинального уровня. При этом СТАТКОМ отключен от ЭЭС, работает на холостом ходу и в его системе управления в течение некоторого времени обеспечиваются условия синхронизации напряжений СТАТКОМа и ЛЭП.

После выполнения условий синхронизации напряжений СТАТКОМ подключается к ЛЭП. В момент подключения СТАТКОМа (вертикальная штриховая линия на рис. 7) наблюдается кратковременный переходный процесс, при котором токи фаз СТАТКОМа увеличиваются. Процесс увеличения токов СТАТКОМа сравнительно кратковременный, более длителен процесс перераспределения реактивной мощности между источником электроэнергии и СТАТКОМом – около 0.5 с. Весь процесс подключения нагрузки к источнику электроэнергии, синхронизации напряжения СТАТКОМа с напряжением ЛЭП, подключения СТАТКОМа к ЛЭП и затухания переходных процессов в ЭЭС с перераспределением реактивных мощностей длится около 0.85 с.

Результаты гармонического анализа кривых в установившемся режиме работы ЭЭС (после затухания переходных процессов) представлены в таблице.

Напряжение 1-й фазы источника, В		6063.5
Частоты гармоник, Гц	Действующее значение гармоник	Фаза, ... °
50	6063.479	-0.1658
Коэффициент искажения синусоидальности		0.005058
Ток 1-й фазы источника, А		115.426
Частоты гармоник, Гц	Действующее значение гармоник	Фаза, ... °
50	115.390	-1.8523
Коэффициент искажения синусоидальности		0.02505
Ток 1-й фазы СТАТКОМа, А		52.610
Частоты гармоник, Гц	Действующее значение гармоник	Фаза, ... °
50	52.530	-90.0081
Коэффициент искажения синусоидальности		0.05527
Ток 1-й фазы нагрузки, А		128.314
Частоты гармоник, Гц	Действующее значение гармоник	Фаза, ... °
50	128.314	-26.0052
Коэффициент искажения синусоидальности		0.0001733
Напряжение конденсатора 1 ячейки, В		789.610
Максимальное значение		818.732
Минимальное значение		755.226
Активная мощность нагрузки, МВт		2.100
Реактивная мощность ЛЭП ₁ , МВАр		0.0768
Реактивная мощность СТАТКОМа, МВАр		0.960
Напряжение управления, о. е.		0.636
Максимальное значение, о. е.		0.765
Минимальное значение, о. е.		-0.765
Частоты гармоник, Гц	Действующее значение гармоник	Фаза, ... °
50	0.624	179.5759
150	0.119	178.9850

Одна из задач, которая решается в процессе создания высоковольтных ММ СТАТКОМов, заключается в выравнивании напряжений конденсаторов транзисторно-емкостных мостовых ячеек. В реализованной модели ЭЭС с ММ СТАТКОМом эта задача решена сравнительно эффективно – средние значения напряжений конденсаторов СТАТКОМа находятся в пределах заданного значения 800 В с допуском $\pm 5\%$.

Разработаны модели ЭЭС с модульными многоуровневыми СТАТКОМами с использованием в фазах последовательно соединенных транзисторно-емкостных ячеек низкого напряжения, количество которых задается при расчетах.

Разработан вариант алгоритма управления и структура системы регулирования модульного многоуровневого СТАТКОМа.

Разработана компьютерная модель ЭЭС с поперечным СТАТКОМом в среде Visual Studio на языке программирования C++ для расчетов в среде ComSim1_5.

Моделирование ЭЭС со СТАТКОМом выполнено по методологии взаимосвязанных подсхем, что обеспечивает минимальные затраты машинного времени при расчетах на ЭВМ длительных процессов с малыми шагами интегрирования.

Приведен пример расчета на ЭВМ электромагнитных процессов в ЭЭС при компенсации СТАТКОМом реактивной мощности нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромеханические комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2020.
2. Моделирование ЭЭС с продольным СТАТКОМом методами взаимосвязанных подсхем для анализа режимов синхронизации напряжений двух ЛЭП / А. Г. Воронцов, М. В. Пронин, В. В. Глушаков, Н. И. Фёдоров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 3. С. 72–79.
3. Моделирование ЭЭС с продольным СТАТКОМом методами взаимосвязанных подсхем в режимах распределения нагрузок между двумя ЛЭП / А. Г. Воронцов, М. В. Пронин, В. В. Глушаков, Н. И. Фёдоров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 5. С. 65–72.
4. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих сдвоенных моделях // Электротехника. 2021. № 1. С. 20–25.
5. Св. 2019661058 Ru ComSim1_5: программа для ЭВМ / А. Г. Воронцов; правообладатель А. Г. Воронцов. № 2019619973 заявл. 12.08.19; опубл. 19.08.19.
6. Кнут Д. Искусство программирования Т. 3. Сортировка и поиск. М.: Вильямс, 2007.
7. Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ от 30.04.2008 г. № 216 «Об утверждении Методических рекомендаций по определению предварительных параметров выдачи мощности строящихся (реконструируемых) генерирующих объектов в условиях нормальных режимов функционирования энергосистемы, учитываемых при определении платы за технологическое присоединение таких генерирующих объектов к объектам электросетевого хозяйства». URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=120632> (дата обращения 22.08.21).

A. G. Vorontsov, M. V. Pronin
Saint Petersburg Electrotechnical University

A. S. Adalev, V. Yu. Shelyuh, I. A. Dikun
JSC «Power machines»

MODULAR MULTILEVEL STATCOM MODELS

STATCOM are used to control the operations of the sources of electricity and power lines. Modular multilevel STATCOM are used for high voltage power lines, in which in each phase bridge low-voltage transistor-capacitive cells are connected sequentially. The article describes STATCOM model with an arbitrary amount of sequentially connected cells in the phases when the phases are connected to the star. The model of the power part of STATCOM includes a description of the transformer. It is possible to replace the transformer to the current-limiting reactor. When modeling STATCOM, the structure of its control system was developed, in which the regulation of reactive and active power is provided, as well as stabilization of voltages of all capacitors of low-voltage transistor-capacitive cells. The calculations of the electromagnetic processes in electric power system voltage of 10 kV are performed. The calculation results confirmed the performance of the considered STATCOM and its control system.

STATCOM, electric power system, high voltage power line, modeling, reactive power compensation