

Анализ режимов коммутации тиристорного моста

переменного тока в среде PSpice

Павел Рашитов

rashitov333@mail.ru

Татьяна Ремизевич, к. т. н.

remizevichtv@mail.ru

Современное развитие силовых полупроводниковых приборов позволяет создавать специальные устройства для решения актуальных задач электроэнергетики. Увеличение пропускной способности линий электропередачи переменного тока, управление потоками активной мощности, компенсация реактивной мощности, повышение надежности и живучести энергосистем — это далеко не весь спектр вопросов, которые решаются с помощью гибких линий электропередачи переменного тока (FACTS). Внедрение мощной высоковольтной преобразовательной техники является необходимым условием реализации технологии FACTS.

Фазоповоротное устройство (ФПУ) — одна из разновидностей силовых полупроводниковых преобразователей для гибких линий электропередачи переменного тока. В его функции входит управление потоками мощности в электрических сетях путем создания дополнительного фазового сдвига между напряжениями на концах линии электропередачи. ФПУ состоит из шунтового (возбуждающего) трансформатора, серийного (вольтодобавочного) трансформатора и силового полупроводникового преобразователя. Принцип действия заключается в том, что преобразователь, представляющий собой последовательное соединение нескольких тиристорных мостов переменного тока, определенным способом подключает вторичные

обмотки шунтового трансформатора к первичной обмотке серийного трансформатора [1].

В статическом режиме работы ФПУ, т. е. при неизменном установленном фазовом угле, тиристоры в мостах работают в качестве переключателей переменного тока, протекающего в серийном трансформаторе. Включение и выключение тиристоры в работающем двунаправленном тиристорном ключе происходит один раз на половине периода сети при переходе тока через ноль, вследствие чего практически исключены динамические потери.

Для смены угла регулирования ФПУ необходимо изменить состояния тиристорных мостов. Для этого нужно выключить (снять импульсы управления) двунаправленный тиристорный ключ в одном плече моста и включить такой же ключ в другом плече. Коммутировать тиристорные ключи можно только в определенные моменты времени, обусловленные требуемым соотношением токов и напряжений.

Для создания алгоритмов надежного переключения было проведено исследование процессов коммутации в мостах переменного тока с целью определения влияния последних на длительность допустимых временных интервалов переключения тиристоры. Для этого в среде OrCAD Capture была составлена имитационная Spice-модель работы моста, представленная на рис. 1.

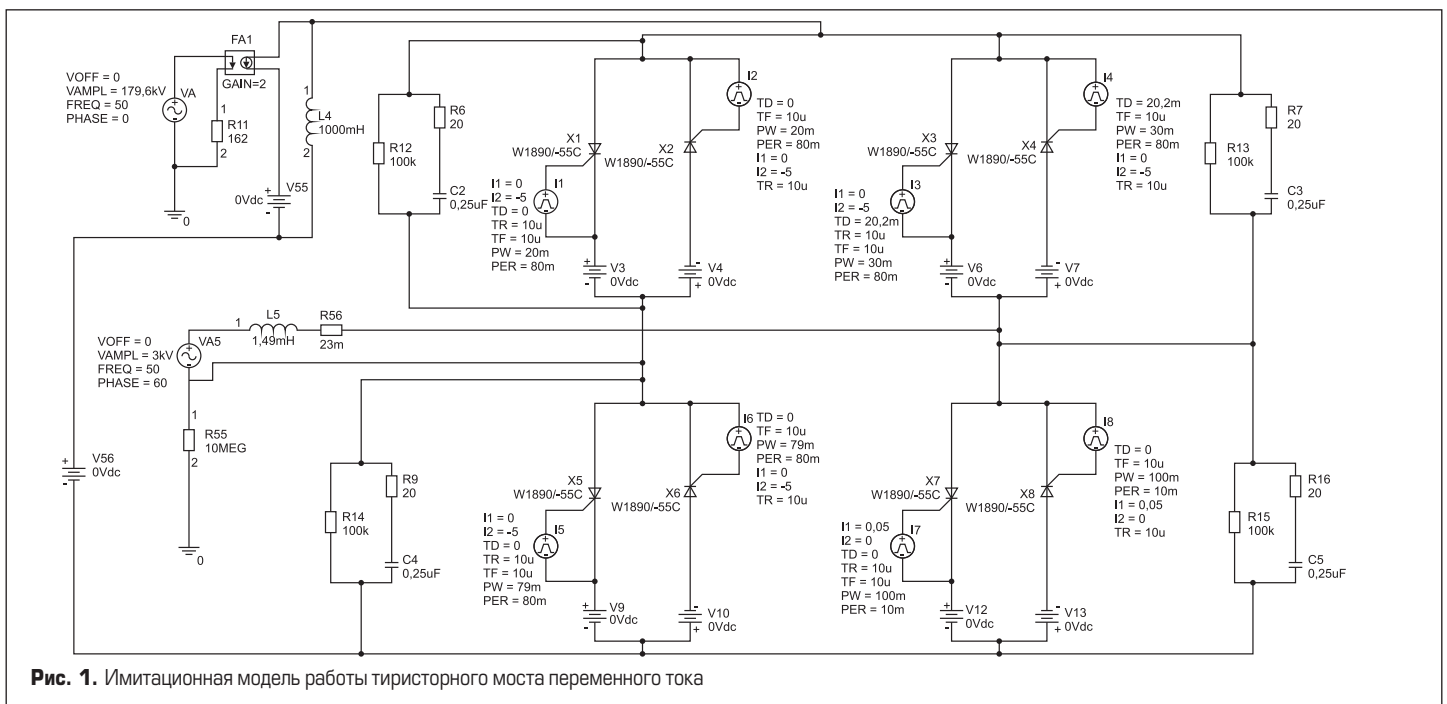


Рис. 1. Имитационная модель работы тиристорного моста переменного тока

В данной схеме вторичная обмотка шунтового трансформатора представлена источником ЭДС фазы В, индуктивностью рассеивания и активным сопротивлением обмотки; ток в первичной обмотке серийного трансформатора формируется от работы источника ЭДС фазы А на активную нагрузку. В качестве модели тиристора использовалась модифицированная NU-KI модель [2], составленная для тиристора T193-2000. Каждый двунаправленный тиристорный ключ защищен демпфирующей R-C-цепью.

Параметры моделируемой схемы:

- амплитуда источника ЭДС фазы В $U_{max} = 3000$ В;
- амплитуда тока в первичной обмотке серийного трансформатора $I_{max} = 2200$ А;
- индуктивность рассеивания шунтового трансформатора $L_s = 0,165$ мГн;
- активное сопротивление обмотки трансформатора $R_s = 23$ мОм;
- параметры цепи снаббера $R = 20$ Ом, $C = 0,1$ мкФ.

Исследование процесса коммутации на интервале t_0-t_1

Вначале моделировалась ситуация, когда в мосте включены ключи 1 и 2, а после смены режима должны работать ключи 2 и 3 (рис. 2а). Для этого с тиристоров VS11 и VS12 предварительно снимаются импульсы управления, а на тиристоры VS31 и VS32 импульсы управления должны начать поступать. Данное переключение осуществимо, когда ток, протекающий через мост, и напряжение, подводимое к мосту, имеют противоположные знаки. На рис. 2б соответствующие этому условию временные интервалы t_0-t_1 и t_2-t_3 отмечены цветом.

Для последующего рассмотрения выберем интервал t_0-t_1 , в силу симметрии процесс переключения на интервале t_2-t_3 будет аналогичным. Разобьем этот интервал на три участка и промоделируем процесс переключения в начале, посередине и в конце. На любом из этих временных отрезков ток в индуктивности рассеивания до момента коммутации отсутствовал, а после коммутации должен стать равным току фазы А с обратным знаком. До переключения моста ток проводил тиристор VS12, а после переключения должен включиться тиристор VS32; тиристор VS22 будет оставаться все время в проводящем состоянии.

Временные диаграммы процесса переключения в начале участка t_0-t_1 представлены на рис. 3. Коммутация происходит в момент $t_{k1} = 20,2$ мс. В процессе переключения можно выделить следующие этапы:

- На интервале $t_{k1}-t_{k2}$ происходит коммутация тока. Ток в тиристоре VS12 спадает, а в тиристоре VS32 нарастает. К индуктивности рассеивания прикладывается напряжение фазы В. Длительность этого интервала составляет 128 мкс.
- В момент времени t_{k2} включается тиристор VS11, и образуется контур короткого замыкания $U_b-VS32-VS11-R_s-L_s-U_b$. В результате тиристоры VS11 и VS32 попадают под удар-

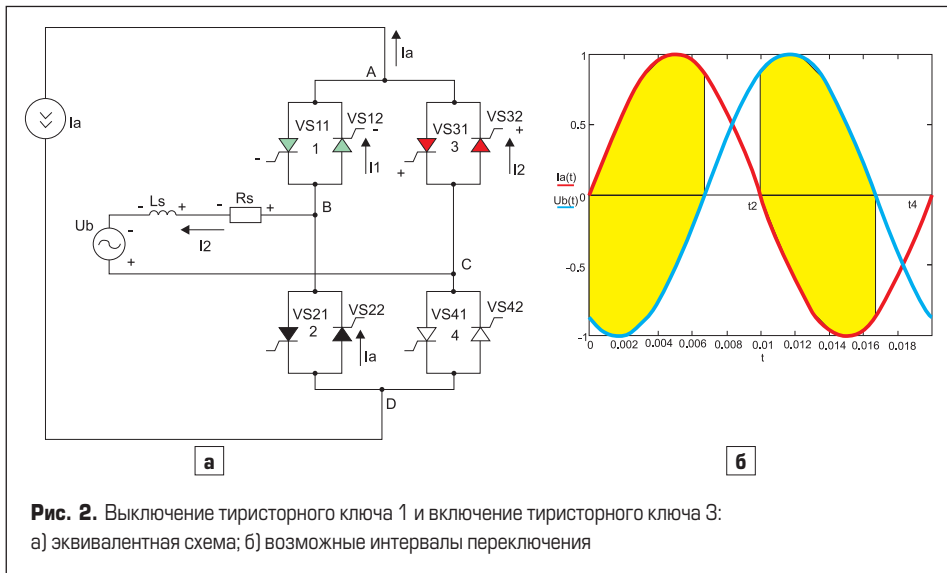


Рис. 2. Выключение тиристорного ключа 1 и включение тиристорного ключа 3: а) эквивалентная схема; б) возможные интервалы переключения

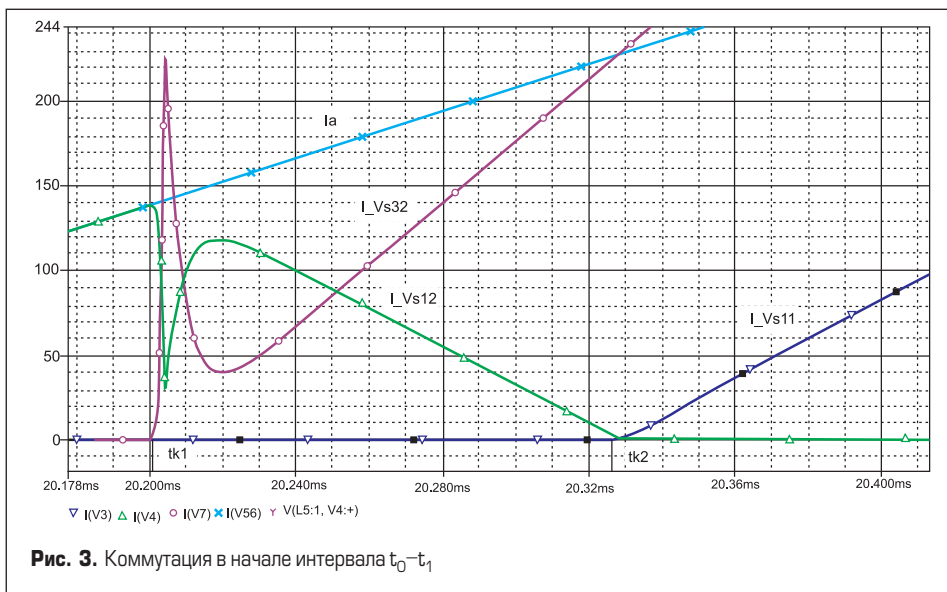


Рис. 3. Коммутация в начале интервала t_0-t_1

ный ток, что может привести к выходу их из строя.

Наблюдаемый процесс объясняется следующим. Перед началом интервала t_0-t_1 проводил тиристор VS11, и когда вступает в работу реверсивный ему тиристор VS12, то к VS11 прикладывается запирающее напряжение около 1,5 В. Если после окончания последующей

коммутации тока из тиристора VS12 в VS32 тиристор VS11 не успел восстановить свои управляющие свойства, он попадает под положительное напряжение и может включиться. Для осуществления надежной коммутации следует организовать задержку на время восстановления управляющих свойств тиристора VS11 и только потом выполнять переключе-

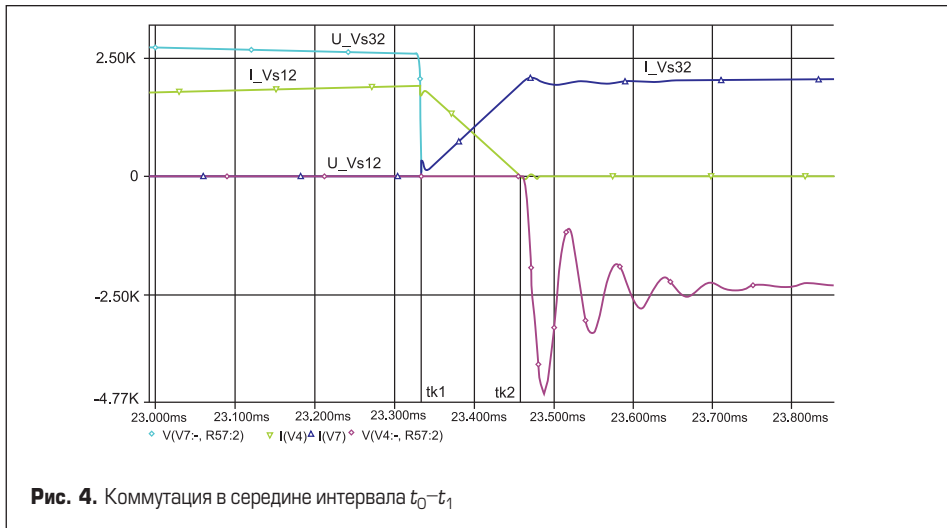


Рис. 4. Коммутация в середине интервала t_0-t_1

ние. Для тиристора T193-2000 паспортное время выключения составляет $t_q = 500$ мкс.

Процесс переключения в середине участка t_0-t_1 представлен на рис. 4. Коммутация происходит в момент $t_{k1} = 23,3$ мс. На полученных временных диаграммах можно выделить следующие этапы переключения:

- На интервале $t_{k1}-t_{k2}$ происходит коммутация тока. Ток в тиристоре VS12 падает, а в тиристоре VS32 нарастает. К индуктивности рассеивания прикладывается напряжение фазы В. Длительность этого интервала составляет 127 мкс;
- После момента времени t_{k2} вначале наблюдается некоторый колебательный затухающий процесс, связанный с перезарядом конденсаторов демпферных цепочек, стоящих параллельно тиристорам (рис. 1). Период колебаний составляет $T = 2\pi\sqrt{L_s C}$ и равен в данном случае 62 мкс. После окончания колебательного процесса мост начинает нормально работать в требуемом режиме.

Процесс переключения в конце участка t_0-t_1 представлен на рис. 5. Коммутация происходит в момент $t_{k1} = 25,8$ мс. В процессе переключения можно выделить следующие временные интервалы:

- На интервале $t_{k1}-t_{k2}$ происходит коммутация тока. Ток в тиристоре VS12 падает, а в VS32 нарастает. К индуктивности рассеивания прикладывается напряжение фазы В. Длительность этого интервала составляет 645 мкс.
- На интервале $t_{k2}-t_{k3}$ тиристор VS32 перехватывает полностью ток фазы А. Ток в тиристоре VS12 отсутствует. Напряжение к VS12 прикладывается в этот момент отрицательное, что способствует восстановлению его управляющих свойств. Длительность этого интервала — 275 мкс.
- В момент времени t_{k3} напряжение фазы В меняет знак и к тиристору VS12 прикладывается положительное напряжение. Поскольку длительность интервала $t_{k2}-t_{k3}$ была недостаточна для восстановления управления тиристором VS12, он начинает включаться, а тиристор VS32 выключаться. Т. е. на интервале $t_{k3}-t_{k4}$ происходит процесс обратной (реверсивной) коммутации.
- В момент времени t_{k4} ток в тиристоре VS32 падает до нуля, а в тиристоре VS12 станет равным I_a . К тиристору VS31 начнет прикладываться прямое напряжение, и, так как на него поступил отпирающий импульс, он включится. В результате образуется контур короткого замыкания: $U_b-L_s-R_s-VS12-VS31-U_b$. Амплитуда ударного тока будет ограничена в основном сопротивлением индуктивности рассеивания: $U_{max}/(\omega/2 \times L_s) = 115,8$ кА.

Проведенный анализ коммутационных процессов в различные моменты отрезка времени t_0-t_1 показывает, что в конце интервала для надежной коммутации необходимо сделать временной отступ, равный сумме времени коммутации и паспортного времени восстановления управляющих свойств тиристора. В начале интервала t_0-t_1 следует сделать отступ только на время восстановления

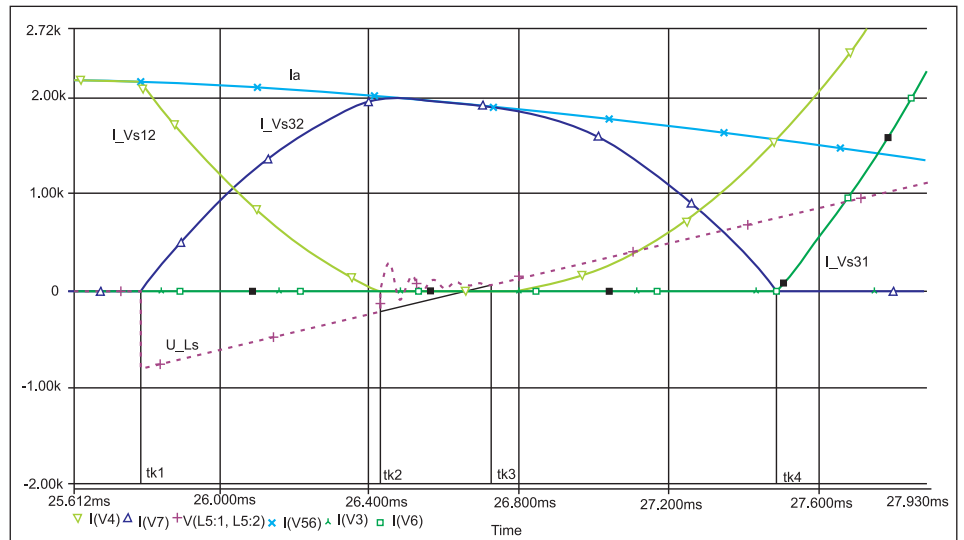


Рис. 5. Коммутация в конце интервала t_0-t_1

управляющих свойств тиристора. На рис. 6 интервал надежного переключения тиристора на участке t_0-t_1 отмечен цветом.

Введенные временные ограничения определяются следующим образом:

$$t_0-t_{trp1} = t_q = 500 \text{ мкс}, t_0-t_{trp1} = t_q + t_k$$

где t_q — паспортное время выключения тиристора, t_k — время коммутации тока в тиристоре.

Расчет времени коммутации

Длительность времени коммутации t_k определяется начальными значениями тока и напряжения в момент коммутации и параметрами схемы. Будем считать, что на этапе переключения значение коммутируемого тока остается постоянным. Также для упрощения

расчета примем значение активного сопротивления обмотки равным нулю, поскольку оно значительно меньше сопротивления индуктивности рассеивания.

На этапе коммутации включенными оказываются оба тиристора VS12 и VS32, поэтому можно считать потенциалы точек В и С равными (рис. 2а). Источник ЭДС U_b и индуктивность рассеивания L_s образуют замкнутый контур, для которого справедливо соотношение:

$$L_s \times di/dt = U_b, U_b = U_{max} \sin(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Коммутация начинается в момент времени t_{k1} , время ее окончания — t_{k2} . Напряжение источника ЭДС в момент начала этапа коммутации:

$$U_0 = U_{max} \sin(\omega t_{k1} + \varphi).$$

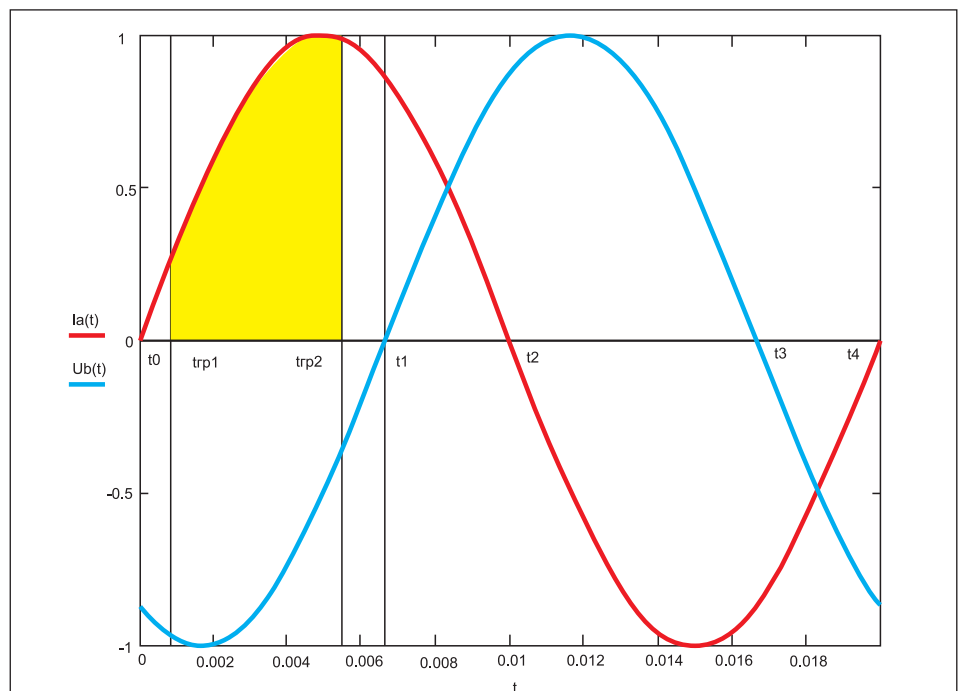


Рис. 6. Интервал надежной коммутации на участке t_0-t_1

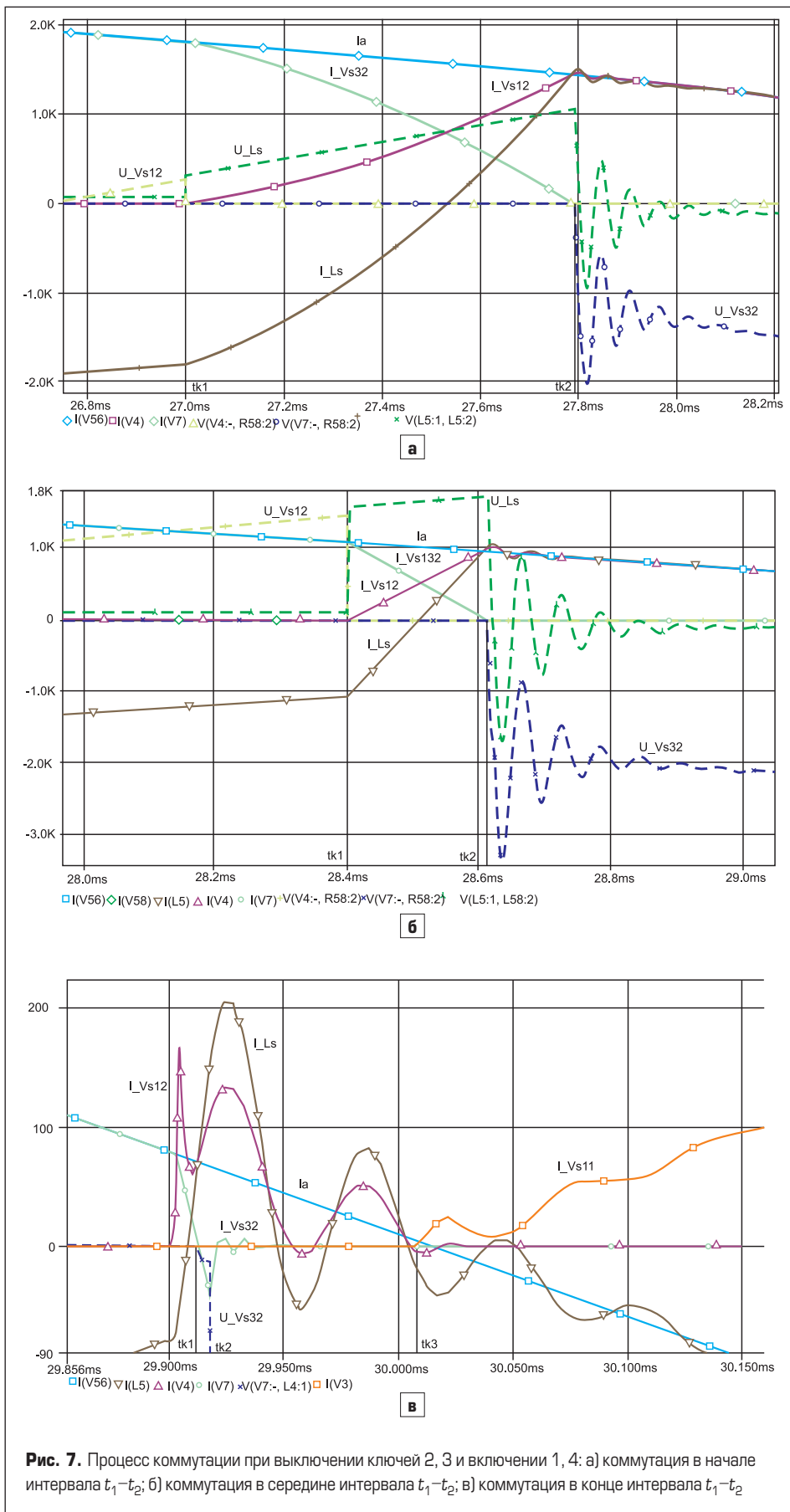


Рис. 7. Процесс коммутации при выключении ключей 2, 3 и включении 1, 4: а) коммутация в начале интервала t_1-t_2 ; б) коммутация в середине интервала t_1-t_2 ; в) коммутация в конце интервала t_1-t_2

$$t_{\kappa} = \frac{-\frac{U_0}{U_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{U_0}{U_{\max}}\right)^2 + 2 \times \omega \times \frac{L_s \times \Delta I}{U_{\max}} \times \sqrt{1 - \left(\frac{U_0}{U_{\max}}\right)^2}}}{\omega \times \sqrt{1 - \left(\frac{U_0}{U_{\max}}\right)^2}} \quad (2)$$

Изменение тока в индуктивности на этом этапе — ΔI . Найдем зависимость значения времени коммутации $t_{\kappa} = t_{\kappa 2} - t_{\kappa 1}$ от U_0 и ΔI . Для этого необходимо решить дифференциальное уравнение (1) на этапе переключения. Решение представлено в выражении (2)

Из выражения (2) следует, что чем больше U_0 и меньше ΔI , тем быстрее произойдет коммутация. Величина напряжения U_0 задает скорость процесса коммутации тока, а ΔI — границы изменения тока.

Аналитическое выражение (2) может быть использовано для нахождения граничного момента времени начала коммутации t_{zp2} , для которого $t_{zp2} + t_{\kappa} + t_q = t_1$. Подача импульсов управления позже t_{zp2} может привести к срыву коммутации из-за недостаточного времени, предоставляемого для выключения тиристора. Для расчета t_{zp2} необходимо решить уравнение (3) с учетом выражения (2):

$$\sin(\pi - \omega t_{\kappa} - \omega t_q) = U_0 / U_{\max} \quad (3)$$

Частное решение было найдено с использованием численных методов для следующих значений параметров схемы: $U_{\max} = 3000$ В, $\Delta I_{\max} = 4400$ А, $L_s = 0,165$ мГн, $\omega = 314$ рад/с. В результате расчета получены следующие значения: $U_{0zp} = 990$ В, $t_{\kappa} = 580$ мкс, $t_1 - t_{zp2} = t_q + t_{\kappa} = 1080$ мкс.

Расчитанное значение $t_q + t_{\kappa} = 1080$ мкс соответствует самому худшему случаю, когда коммутируется максимально возможный ток, поэтому, введя такой ограничительный интервал при всех возможных фазовых соотношениях между током и напряжением, можно уверенно считать, что коммутация будет надежной.

Исследование процесса коммутации на интервале t_1-t_2

Процесс переключения моста из состояния, когда включены ключи 2 и 3, а после смены режима должны работать ключи 1 и 4, отличается от рассмотренного ранее. Данное переключение осуществляется на временном интервале, когда протекающий через мост ток и напряжение, подводимое к мосту, имеют одинаковые знаки. На рис. 2б этому условию удовлетворяют временные интервалы t_1-t_2 и t_3-t_4 .

Разобьем интервал t_1-t_2 на три участка и промоделируем процесс переключения в начале, посередине и в конце. На любом из этих отрезков ток в индуктивности рассеивания до момента коммутации был в противофазе току фазы А, а после должен стать равным току фазы А. До переключения моста ток проводили тиристоры VS22 и VS32, а после переключения должны включиться тиристоры VS12 и VS42.

Результаты моделирования процесса переключения представлены на рис. 7. Процессы коммутации в начале, середине и конце интервала t_1-t_2 успешно завершились. Из этого можно сделать следующий основной вывод: интервал t_1-t_2 целиком пригоден для смены режима тиристорного моста переменного тока.

Выводы

Все допустимые временные интервалы переключения тиристорных мостов ФПУ можно разбить на два типа:

1. В начале интервала ток нарастает от нуля, а в конце напряжение спадает до нуля и собирается поменять знак;
2. В начале интервала напряжение нарастает от нуля, а в конце – ток спадает до нуля и собирается поменять знак.

По результатам моделирования установлено, что допустимый интервал переключения 2-го типа целиком подходит для надежной коммутации тиристором: длительность процесса коммутации в конце интервала стремится к нулю, поскольку коммутируемый

ток стремится к нулю, и, следовательно, наложение ограничения в конце интервала не требуется.

Интервал переключения 1-го типа нуждается в следующих ограничениях:

- от начала интервала необходимо сделать отступ, соответствующий времени восстановления тиристором управляющих свойств (для тиристора T193-2000 это 500 мкс);
- от конца интервала необходимо сделать временной отступ длительностью $t_1 - t_{p2} = t_q + t_k$ (для заданных параметров схемы моделирования — 1080 мкс) и ко времени восстановления тиристором управляющих свойств необходимо добавить максимальное время коммутации, которое может быть рассчитано с использованием выражений (2) и (3).

Введение этих ограничений при некоторых фазовых сдвигах между током и напряжением в различных режимах работы ФПУ может привести к исчезновению допустимых интервалов переключения. Полученные выводы следует учитывать в дальнейшем при синтезе алгоритмов работы системы управления.

Литература

1. Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Издательство МЭИ. 2007.
2. Avant R. L., Lee F. C., Chen D. Y. A Practical SCR model for computer aided analysis of AC resonant charging circuits // IEEE Power Electronics Specialist Conference. 1981.