

УДК 621.314.26

А. Р. Мамутов, М. В. Пронин, А. Г. Воронцов

Моделирование обратимого статического многотактного преобразователя переменно-постоянного напряжения

Разработаны модели многотактного статического обратимого преобразователя переменно-постоянного напряжения, содержащего активный выпрямитель-инвертор и широтно-импульсный преобразователь. При моделировании использована методология описания систем по взаимосвязанным подсистемам. На моделях выполнен анализ режимов работы обратимого преобразователя. Даны рекомендации по выбору структуры силовой части преобразователя и алгоритмов управления.

Обратимый преобразователь, статический преобразователь, инвертор напряжения, широтно-импульсный преобразователь, методология моделирования, активный выпрямитель

На атомных электростанциях и на других ответственных объектах используются аварийные источники энергии с аккумуляторными батареями (АБ) и обратимыми электромашинными преобразователями (ОЭМП). ОЭМП содержат машины синхронные и постоянного тока, а также щиты управления. Электромашинные ОЭМП имеют ряд преимуществ. Однако вращающиеся элементы, смазка, угольная пыль, щетки, коллекторы снижают надежность систем, усложняют их производство и обслуживание. ОЭМП имеют также низкий КПД, низкое быстродействие. В связи с этим актуально создание статических обратимых преобразователей (СОП), не имеющих указанных недостатков.

СОП могут быть построены по однотактным схемам преобразования напряжений и токов при сравнительно небольшом количестве модулей IGBT. Но в этих схемах при работе модулей в режимах широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и широтно-импульсного преобразования (ШИП) значительно искажаются напряжения на входе и выходе. Для улучшения качества электроэнергии применяются мощные фильтры. В многотактных схемах используется большее количество менее мощных модулей IGBT, но при этом искажения напряжений меньше и упрощается их фильтрация.

В данной статье рассматривается многотактный СОП по схеме рис. 1, содержащий активные и широтно-импульсные преобразователи напряжения (информация по активным преобразователям представлена в технической литературе [1]–[6]).

Многотактный СОП содержит трансформатор напряжения (Тр), *RC*-фильтры, инверторы (активные выпрямители) АИН (АВ), конденсаторные батареи *C*, широтно-импульсные преобразователи (ШИП), фазные дроссели *L*, выключатели QS_1, QS_2 .







Рис. 3

Моделирование СОП осуществляется по схеме на рис. 2. В схеме источник питания представлен трехфазной системой ЭДС е_{sn}, активными сопротивлениями R_s и индуктивностями L_s . К источнику подключен RC-фильтр с емкостями C_f, активными сопротивлениями R_f , токами фаз i_{fn} . Трансформатор напряжения Тр представлен трехфазной первичной обмоткой и двумя трехфазными вторичными обмотками. АИН (AB) представлены трехфазными транзисторными мостами. В цепях постоянного напряжения имеются емкости С. ШИП представлены транзисторными мостами и уравнительными дросселями L. На выходе СОП включена RC-цепь с емкостью C_h , активным сопротивлением R_{ch} и током i_h. Нагрузка представлена источником ЭДС e_h, активным сопротивлением R_h и индуктивностью L_h. Нагрузка имеет ток i_h , напряжение u_h .

Модель СОП строится при разделении исходной системы на взаимосвязанные подсистемы [2]–[8]. Подсистемы и их связи описываются математически. Полученные уравнения объединяются в едином алгоритме расчета.

Первоначальное разделение схемы на части основано на замене емкостей и *RC*-фильтров зависимыми источниками напряжения:

$$\begin{aligned} & u_{cn} = C_f^{-1} \int i_{fn} dt, \quad u_{sn} = u_{cn} + R_f i_{fn}, \quad n = 1, 2, 3, \\ & u_{cm} = C^{-1} \int i_{cm} dt, \quad m = 1, 2, \\ & u_{ch} = C_h^{-1} \int i_{ch} dt, \quad u_h = u_{ch} + R_{ch} i_{ch}. \end{aligned}$$

Зависимые источники напряжения u_{sn} переносятся в фазы сети и первичной обмотки трансформатора, источники u_{cm} – в ветви АИН и ШИП, источник u_h – в ветви нагрузки и ШИП. При этом подсхемы, связанные друг с другом только одной точкой, разделяются.

Токи, найденные в подсхемах, можно рассматривать, как зависимые источники тока, воздействующие на конденсаторы и *RC*-цепи:

$$\begin{array}{l} i_{fn} = i_{sn} - i_{t1n}, \quad n = 1, 2, 3, \\ i_{cm} = i_{d1m} - i_{d2m}, \quad m = 1, 2, \\ i_{ch} = i_{l11} + i_{l21} + i_{l31} + i_{l12} + i_{l22} + i_{l32} - i_{h}. \end{array} \right\}$$
(2)

Разделение системы на части осуществляется также по электромагнитным связям обмоток трансформатора при учете индуктивностей рассеяния во вторичных обмотках и коэффициента трансформации $K_{\rm Tp}$. В результате указанных преобразований исходная схема СОП разделяется на подсхемы (рис. 3).

.....

Для сетевой подсхемы справедливы уравнения для определения токов фаз сети:

$$\tau = \omega t, \ e_{sn} = E_{sm} \sin \left[\tau - 2\pi (n-1) / 3 \right],$$

$$u_{sn} = e_{sn} - L_s \frac{di_{sn}}{dt} - R_s i_{sn}, \ n = 1, 2, 3.$$
(3)

ЭДС фаз вторичных обмоток трансформатора:

$$e_{tn} = u_{sn} / K_{\rm Tp}, n = 1, 2, 3.$$
 (4)

После определения токов вторичных обмоток они приводятся к первичной обмотке:

$$i_{t1n} = (i_{t2n1} + i_{t2n2})/K_{\text{TP}}, n = 1, 2, 3.$$
 (5)

Уравнение для определения тока нагрузки:

$$u_h = e_h + L_h \frac{di_h}{dt} + R_h i_h.$$
(6)

На рис. З в подсхемах с АИН зависимые источники напряжения u_{cm} переносятся в плечи мостов, при этом образуются подсхемы (рис. 4).

В фазах АИН состояния полупроводника описываются функциями k_{nm} , которые принимают значения 1, если открыты ключи в ветви с источником напряжения, и значения 0, если открыты ключи в ветви без источника. Это позволяет преобразовать ветви с транзисторами, диодами и зависимыми источниками напряжения u_{cm} в источники u_{enm} :

$$u_{enm} = k_{vnm}u_{cm}, n = 1, 2, 3, m = 1, 2.$$
 (7)

При этом подсхемы рис. 4 преобразуются в подсхемы рис. 5.

В подсхемах рис. 5 источники u_{enm} содержат составляющие нулевой последовательности u_{0m} . Они удаляются:

$$u_{0m} = \frac{1}{3} (u_{e1m} + u_{e2m} + u_{e3m}),$$

$$e_{enm} = u_{enm} - u_{0m}.$$
(8)

В результате указанных преобразований схемы рис. 5 преобразуется к виду рис. 6.

Для подсхем рис. 6 справедливы уравнения для определения токов фаз:

$$e_{tn} - L_{ts} \frac{di_{t2nm}}{dt} - e_{enm} = 0, \ n = 1, 2, 3, \ m = 1, 2.$$
(9)

Токи в плечах мостов АИН:

$$i_{vnm} = k_{v1m}i_{t21m} + k_{v2m}i_{t22m} + k_{v3m}i_{t23m}, \ m = 1, 2. \ (10)$$

Выпрямленные токи АИН:

$$i_{d1m} = i_{v1m} + i_{v2m} + i_{v3m}, m = 1, 2.$$
 (11)



Аналогичные преобразования осуществляются для подсхем с ШИП. В результате переноса источников напряжения *u_{cm}* в ветви ШИП образуются подсхемы рис. 7.



В этих ветвях подсхем состояния полупроводников фазы описываются функциями k_{hnm} , которые принимают значения 1, если открыта ветвь с источником напряжения, и 0, если открыта ветвь без источника. Это позволяет заменить ветви с транзисторами и диодами зависимыми источниками напряжения:

$$u_{enm} = k_{hnm} u_{cm}, \ n = 1, 2, 3, \ m = 1, 2.$$
 (12)

При выполнении указанных замен схемы рис. 7 преобразуются в схемы рис. 8.

Для подсхем рис. 8 справедливы следующие уравнения для определения токов:

$$u_{enm} + L \frac{di_{hnm}}{dt} - u_n = 0, \ n = 1, 2, 3, \ m = 1, 2. (13)$$

Токи в плечах ШИП:

$$i_{shnm} = k_{hnm}i_{hnm}, n = 1, 2, 3, m = 1, 2.$$
 (14)
Выпрямленные токи ШИП:

$$i_{d2m} = i_{sh1m} + i_{sh2m} + i_{sh3m}, \ m = 1, 2.$$
(15)





Компьютерная модель СОП. Полученная система уравнений силовой части рассматриваемой системы (1)-(15) объединена в едином алгоритме расчета в компьютерной модели СОП. В модель СОП включены также уравнения, описывающие работу устройств управления АИН (AB) и ШИП [4], [5]. Алгоритм расчета процессов в СОП содержит внутренний итерационный цикл вычислений и внешний цикл интегрирования переменных. В итерационном цикле в каждый момент времени определяются параметры зависимых источников тока и напряжения, через которые подсхемы взаимосвязаны. Во внешнем цикле расчета определяются значения переменных при изменении их во времени. Компьютерная модель СОП выполнена в виде программы расчета на ЭВМ на языке С++. Модель пригодна для расчетов переходных и установившихся режимов работы.

Расчеты режимов работы СОП. При использовании компьютерной модели СОП выполнены расчеты режимов работы системы. При расчетах принято: номинальная мощность СОП – 500 кВт, напряжение АБ в номинальном режиме СОП – 220 В, напряжение трехфазной сети – 380 В, частота – 50 Гц. Частоты ШИМ и ШИП – 2000 Гц. Один из расчетов выполнен при номинальном выпрямительном режиме работы СОП (при передаче мощности 500 кВт из сети переменного напряжения 380 В в сеть постоянного напряжения 220 В). Трехфазные мостовые преобразователи СОП работают как АВ, поддерживая выпрямленные напряжения на уровне 660 В, что обеспечивает синусоидальность токов фаз, и за-

данный коэффициент мощности сети, равный 1. Результат расчета представлен на рис. 9, где изображены: трехфазные системы напряжений и токов сети 380 В, 50 Гц, опорное напряжение и трехфазная система напряжений управления AB₁, опорное напряжение и напряжение управления 1 ветви ШИП₁, выпрямленное напряжение, напряжение сети 220 В, токи трех ветвей ШИП₁.

При анализе рассчитанного выпрямительного режима работы СОП получено, что его заданный режим работы по всем заданным параметрам обеспечивается с погрешностями до 2 %, коэффициент искажения синусоидальности напряжений сети 380 В составляет 2.6 %, размах пульсаций напряжений нагрузки – 2.5 %.

Другой расчет выполнен для случая перехода СОП из выпрямительного режима работы в инверторный. Время изменения направления передачи электроэнергии 0.15 с. Результат расчета представлен на рис. 10.



Анализ режимов работы СОП свидетельствует о том, что модели правильно отображают характерные режимы работы системы и позволяют выполнять расчеты с достаточной точностью. Таким образом, модели могут быть использованы при разработке СОП. Анализ электромагнитных процессов в СОП показал, что требуемое качество электромагнитных процессов в сетях переменного и постоянного напряжения обеспечивается при использовании многотактных схем преобразования, при повышении частоты ШИМ и ШИП, а также при установке RC-цепей на входе и выходе СОП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Р. Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001.

2. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Система с многофазным асинхронным генератором и несколькими активными преобразователями // Электротехника. 2007. № 10. С. 41–45.

3. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Терещенков В. В. Управление многотактным активным выпрямителем экскаватора ЭКГ-35К // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 10. С. 29–33.

4. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Хон А. Ю. Управление сверхпроводящим индуктивным накопителем энергии // Информационно-управляющие системы (науч. журн.). 2012. № 4 (59). С. 20–24.

5. Pronin M., Shonin O., Vorontsov A., Gogolev G. Control system of the multistage active rectifier ener-

A. R. Mamutov, M. V. Pronin, A. G. Vorontsov

gizing power shovel multi-motor variable-frequency drive for mining applications / EPE-2011. En. URL: http://www.epe-association.org/epe/index.php?main=/ epe/documents.php%3Fcurrent=1979.

6. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / ОАО "Электросила" СПб., 2003.

7. Пронин М. В. Электромеханотронные системы. Создание на основе комплекса уточненных быстродействующих моделей. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2011.

8. Пронин, М. В. Моделирование и анализ системы с многофазным асинхронным генератором и многотактным активным выпрямителем // Электротехника. 2006. № 5. С. 55–61.

SIMULATION OF REVERSIBLE MULTISTAGE STATIC AC/DC VOLTAGE CONVERTER

The paper presents the models of reversible multistage static AC/DC voltage converter, which includes an active rectifierinverter and a converter. When simulating, the model is built up by decomposing the system into subsystems and mathematical representation thereof. The model-based analysis of the reversible converter operating modes is described. Furthermore, provided are recommendations for choosing a power converter structure and control algorithms.

Reversible converter, static converter voltage inverter, modeling methodology, active rectifier

УДК 621.365.69

В. В. Царевский, А. Ю. Печенков, С. А. Галунин

Перенос тепла излучением в газовых средах

Предложен способ доопределения системы линейных уравнений, описывающих теплообмен излучением в замкнутых пространствах из серых поверхностей, заполненных газом. Уравнение, доопределяющее систему, получено путем использования аналогии между электрическими токами в цепях и тепловыми потоками излучения в замкнутых системах серых поверхностей. Дано схематическое представление процесса.

Теплообмен излучением, серые поверхности, тепловое сопротивление, газовая среда

В первом приближении, для упрощения расчета стационарного теплообмена излучением, принимают, что все излучающие поверхности непрозрачны, т. е. падающее на эти поверхности излучение не проходит через них. Процесс можно схематически представить, используя аналогию