
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.31

Е.Б. Солнцев, С.А. Петрицкий, С.Н. Юртаев

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Процесс перехода к цифровой энергетике связан с внедрением в электро-технические системы силовых управляемых устройств, основанных на современной полупроводниковой элементной базе. В статье рассмотрен тиристорный регулятор величины и фазы напряжения, являющийся фазоповоротным устройством и регулирующий параметры сети. Работа данного устройства может отрицательно сказываться на показателях качества электроэнергии. Статья посвящена исследованию искажений синусоидальности кривой тока и напряжения, вызванных работой трансформаторно-тиристорных регуляторов величины и фазы напряжения в распределительных сетях среднего напряжения. Исследования проведены с помощью разработанной в среде Matlab Simulink модели устройства. Для режима продольно-поперечного регулирования получены осциллограммы фазного и линейного напряжений. Установлено, что работа устройства вызывает в сети искажения гармонического состава тока и напряжения. Однако величина искажения не превышает допустимых значений. Корректность имитационного моделирования подтверждена совпадением полученных результатов с результатами аналитического расчета.

Ключевые слова: имитационное моделирование, качество электроэнергии, несинусоидальность напряжения, тиристорный регулятор напряжения, фаза напряжения.

1. Введение

В настоящее время во всех отраслях промышленности, в том числе, и в электроэнергетике, активно внедряются и используются различные типы устройств, основанные на современной полупроводниковой и микропроцессорной технике. С развитием преобразовательной техники на базе полностью управляемых полупроводниковых ключей (IGBT, GTO, IGCT),

а также мощных тиристоров, рассчитанных на применение в сетях напряжением 6, 10 кВ, появляются новые возможности контроля и управления, защиты, преобразования параметров и различные недоступные ранее функции и возможности [1, 2]. Все эти устройства постепенно преобразуют функции электрической сети из «пассивной» в «активную», по сути, реализуют концепцию активно-адаптивных сетей [3-5].

Силовые управляемые устройства при этом играют одну из решающих ролей в развитии активно-адаптивных сетей [3, 6]. Их можно разделить на следующие основные группы:

- устройства компенсации (регулировании) реактивной мощности, параллельного включения;
- устройства, регулирующие параметры сети, последовательного включения;
- устройства сочетающие функции первых двух групп, продольно-поперечного включения;
- устройства ограничения токов короткого замыкания;
- устройства преобразующие род тока;
- накопители энергии большой емкости.

В данной статье рассмотрено устройство, регулирующее параметры сети – тиристорный регулятор величины и фазы напряжения. Это одна из разновидностей фазопоротных устройств. Фазопоротные устройства предназначены для перераспределения потоков мощности, по параллельным ЛЭП, повышения пропускной способности ЛЭП, поддержание заданного уровня напряжения в конце ЛЭП [4-7].

Как следует из названия, в этом устройстве используются тиристорные ключи. Это и вызывает появление гармонических искажений тока и напряжения в сети, где будут использоваться данные устройства.

II. Материалы и методы

Целью разработки модели является анализ влияния тиристорного регулятора величины и фазы напряжения на уровни высших гармоник в системах электроснабжения, при различных параметрах регулирования и их взаимных комбинациях.

В качестве параметров модели были выбраны пределы регулирования разработанного в НГТУ твердотельного регулятора вольтодобавочного напряжения (ТРВДН). Это устройство представляет собой автоматический тиристорный регулятор величины и фазы напряжения с параллельным и последовательным трансформаторами [11].

Данное устройство предназначено для использования в сети среднего напряжения (6-20 кВ), и обеспечивает регулирование величины выходного напряжения относительно входного в диапазоне $\pm 10\%$ и изменение

угла сдвига основной гармоники выходного напряжения относительно входного в диапазоне $\pm 5^\circ$.

III. Имитационная модель

Для разработки имитационной модели была выбрана графическая среда имитационного моделирования Simulink, позволяющая создавать модели различного уровня сложности, в том числе, с наличием нелинейных элементов.

В модели использовались следующие стандартные блоки среды Simulink: идеальный однофазный источник переменного напряжения, управляемый источник переменного напряжения, последовательная RLC цепь, тиристор, генератор импульсов, а также измерительные блоки тока и измерительный блок напряжения, блок осциллографа, вывод информации в рабочее пространство MATLAB, блок определения действующего значения напряжения и блок отображения информации. Для моделирования логики работы устройства использовалась подсистема, позволяющая создать внутри блока необходимый набор логических устройств и математических операций.

Построение имитационной модели ТРВДН осуществлялось с использованием однофазных источников напряжения, объединенных в трехфазную систему. Схема модели ТРВДН представлена на рис. 1. Модель состоит из пяти основных блоков. Блок 1, отвечающий за моделирование продольного регулирования напряжения; блок 2, отвечающий за поперечное регулирование напряжения; блок 3, подсистема, отвечающая за управление знаком продольной и поперечной добавки напряжения; блок 4, моделирующий сеть, питающую потребителей с возможностью продольного и поперечного регулирования напряжения и блок 5, моделирующий нагрузку. Также модель содержит вспомогательные блоки, позволяющие выводить информацию об угле сдвига напряжения с учетом регулирования, о действующих значениях фазного и линейного напряжения, о величине и форме кривой продольного и поперечного регулирования и прочих параметрах ТРВДН.

Блоки продольного и поперечного регулирования напряжения представляют собой источник переменного напряжения, подключенный с использованием тиристоров на RLC -цепь, моделирующую характер и величину нагрузки. Для задания времени открытия тиристоров используется блок генератора импульсов, время подачи импульсов зависит от заданного угла управления тиристорами. В имитационной модели предусмотрено отдельное управление блоками, отвечающими за продольное и поперечное регулирование напряжения.

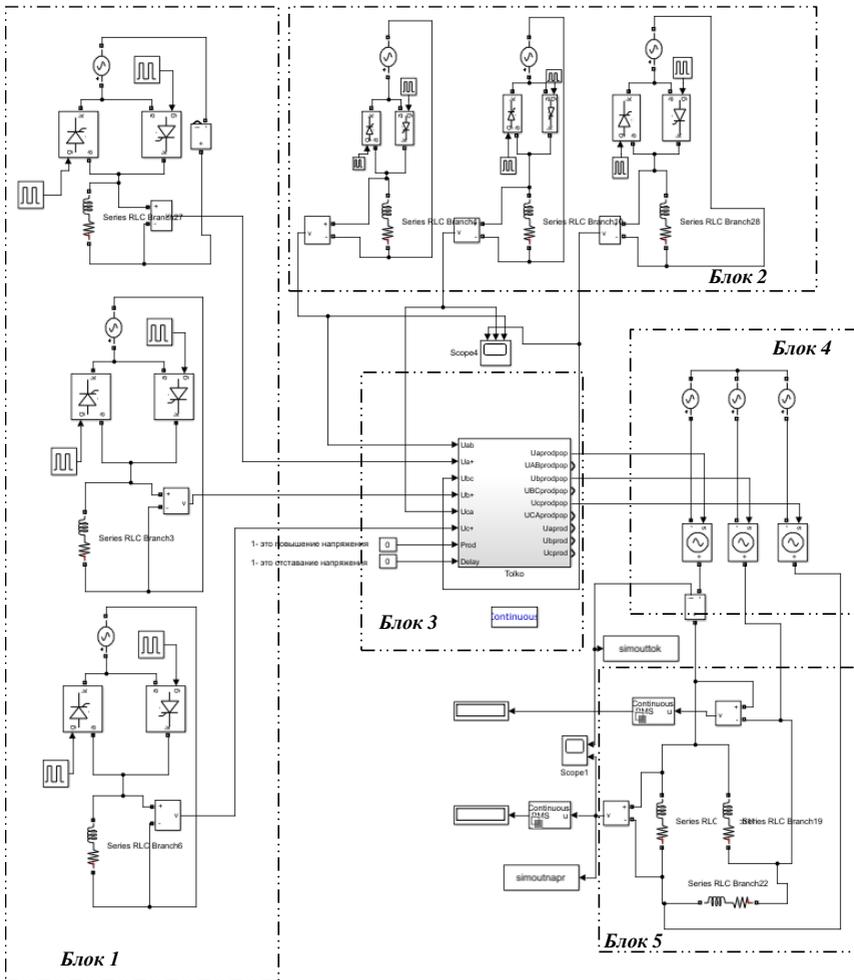


Рис. 1. Имитационная модель ТРВДН в среде MATLAB Simulink

Можно задавать различные углы управления для блока продольного и поперечного регулирования, а также знак регулирования, моделируя тем самым добавку и убавку напряжение, опережение и отставания по фазе. Это позволяет более точно анализировать различные режимы работы устройства, изменяя от 0 до 180 электрических градусов углы управления отдельными блоками. При необходимости возможно моделирование несим-

метричных режимов, когда открытие тиристоров происходит не синхронно. Для работы модели задаются следующие параметры: мощность устройства, мощность нагрузки, номинальное напряжение сети, характер нагрузки (угол между током и напряжением), угол управления тиристорами блока продольного регулирования, угол управления тиристорами блока поперечного регулирования, максимальная величина добавки при продольном регулировании, максимальная величина добавки при поперечном регулировании. Для большей наглядности модели задание области регулирования, а именно увеличение напряжение или его уменьшение, опережение или отставания по фазе, осуществляется вручную в самой модели.

Для упрощения модели принято допущение, вследствие которого в модели не учитывается сопротивление самого устройства и влияние этого сопротивления на уровни гармоник, генерируемых устройством. Это допущение может приводить к некоторому завышению уровня гармоник на выходе ТРВДН, что приемлемо для данной модели, предназначенной для определения предельного уровня гармоник, возникающих в сети при работе ТРВДН.

IV. Результаты исследования

Осциллограммы фазного и линейного напряжения в режиме продольно-поперечного регулирования приведены на рис. 2-5.

В табл. 1 представлены предельные значения коэффициента несинусоидальности напряжения K_U при различных режимах совместной работы модулей продольного и поперечного регулирования, при нагрузке с различными значениями коэффициента мощности.

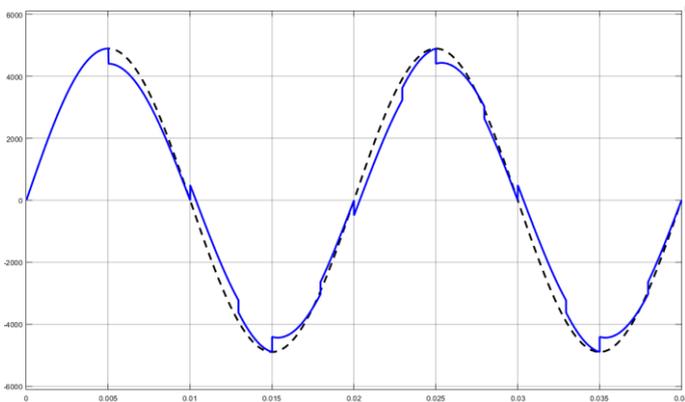


Рис. 2. Напряжение фазы A до и после регулирования ($\cos\varphi = 0,5$, режим понижения/отставания напряжения $\alpha = 90^\circ/90^\circ$)

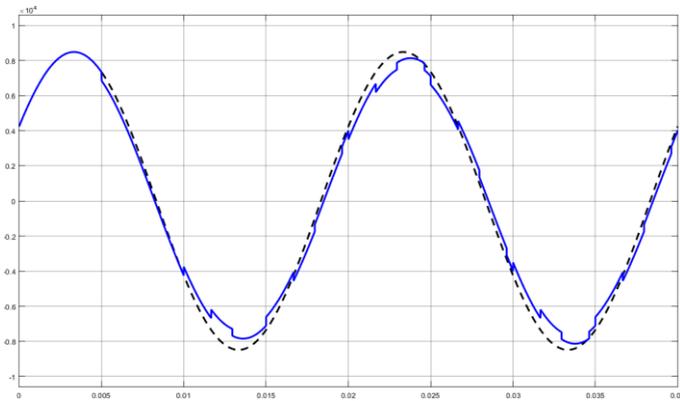


Рис. 3. Линейное напряжение пары фаз AB до и после регулирования ($\cos\varphi = 0,5$, режим понижения/отставания напряжения $\alpha = 90^\circ/90^\circ$)

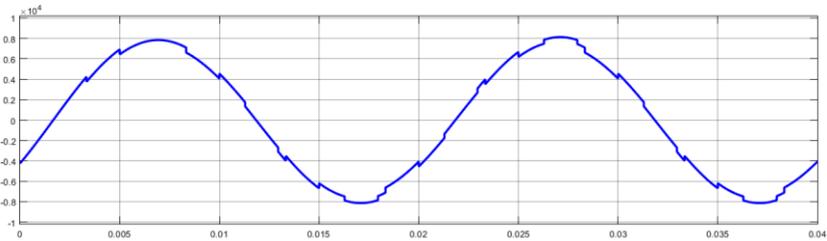


Рис. 4. Осциллограмма линейного напряжения пары фаз CA на нагрузке. ($\cos\varphi = 0,5$, режим понижения/отставания напряжения $\alpha = 90^\circ/90^\circ$)

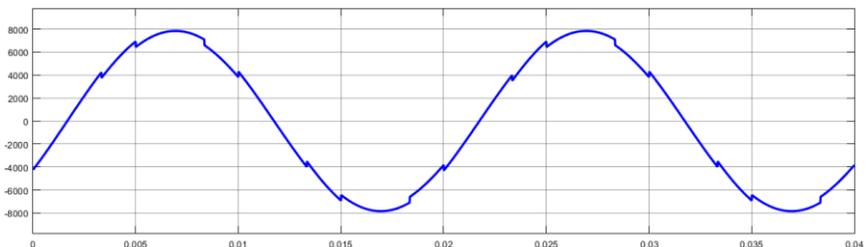


Рис. 5. Осциллограмма линейного напряжения на нагрузке. Режим продольно поперечного регулирования, углы по 90° , понижение напряжения, отставание фазы, $\cos\varphi = 1$

Таблица 1.

Предельные значения коэффициента несинусоидальности напряжения K_U

Наименование режима	$\cos\varphi=1,0$	$\cos\varphi=0,9$	$\cos\varphi=0,9$	$\cos\varphi=0,5$
Повышение/отставание напряжения	3,18	3,6	4,1	4,27
Понижение/опережение напряжения	3,35	3,94	4,43	4,73
Повышение/опережение напряжения	3,06	2,7	3,09	4,09
Понижение/отставание напряжения	3,55	3,12	3,59	4,79

Максимальное значение коэффициента несинусоидальности напряжения K_U при совместной работе модулей продольного и поперечного регулирования составляет 4,79 % и соответствует совместной работе модулей продольного регулирования в режиме понижения с углом управления тиристорами $\alpha = 90^\circ$ и поперечного регулирования в режиме отставания напряжения с углом управления тиристорами $\alpha = 90^\circ$, при коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi = 0,5$.

В табл. 2 представлены предельные значения коэффициента несинусоидальности тока K_I при различных режимах совместной работы модулей продольного и поперечного регулирования, при нагрузке с различными значениями коэффициента мощности.

Таблица 2.

Предельные значения коэффициента несинусоидальности тока K_I

Наименование режима	$\cos\varphi=1,0$	$\cos\varphi=0,9$	$\cos\varphi=0,9$	$\cos\varphi=0,5$
Повышение/отставание напряжения	3,18	1,52	1,1	0,88
Понижение/опережение напряжения	3,35	1,59	1,19	0,91
Повышение/опережение напряжения	3,06	0,96	0,74	0,79
Понижение/отставание напряжения	3,55	1,11	0,86	0,92

Максимальное значение коэффициента несинусоидальности тока K_I при совместной работе модулей продольного и поперечного регулирования составляет 3,54 %, и соответствует совместной работе модулей продольного регулирования в режиме понижения с углом управления тири-

сторонами $\alpha = 90^\circ$ и поперечного регулирования в режиме отставания напряжения с углом управления тиристорами $\alpha = 120^\circ$, при чисто активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$). При активно-индуктивной нагрузке максимальное значение коэффициента несинусоидальности тока составляет 1,59 % и соответствует совместной работе модулей продольного регулирования в режиме понижения с углом управления тиристорами $\alpha = 90^\circ$ и поперечного регулирования в режиме опережения напряжения с углом управления тиристорами $\alpha = 60^\circ$, при коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi = 0,9$.

Наибольшие значения коэффициентов гармонических составляющих тока $K_{I(k)}$ и коэффициента несинусоидальности тока K_I наблюдаются при активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$). При активно-индуктивной нагрузке значения коэффициента несинусоидальности тока снижаются вследствие сглаживания бросков тока на индуктивности.

V. Заключение

1. Применение тиристорного регулятора напряжения в сети вызывает искажения гармонического состава тока и напряжения. Но, как показал анализ, эти искажения находятся в пределах требований ГОСТ 32144-2013, при уровнях регулирования $\pm 10\%$ по амплитуде и ± 5 электрических градусов по фазе. Уже при этих параметрах искажения практически достигли максимальных значений требований ГОСТ 32144-2013. При более глубоком регулировании и напряжения, и фазового угла, необходимо будет применить специальных устройств, позволяющих снизить уровень гармонических искажений.

2. Результаты работы имитационной модели практически полностью совпадают с результатами аналитического моделирования данного устройства, представленными авторами ранее [8]. Это подтверждает корректность разработанной модели.

3. Разработанная модель позволяет анализировать работу устройства во всех возможных режимах. При этом переключение режимов и изменение настроек модели занимает минимально возможно время, что значительно снижает трудоемкость выполняемого анализа.

4. Разработанная модель позволяет анализировать различные варианты соединения нагрузки: звезда, треугольник, однофазная нагрузка, несимметричная нагрузка.

5. Модульный принцип построения модели позволяет в дальнейшем легко модифицировать и совершенствовать модель для актуализации и настройки ее под конкретные задачи.

© Солнцев Е.Б., 2018

© Петрицкий С.А., 2018

© Юртаев С.Н., 2018

Библиографический список

- [1] Ситников В.Ф. Силовая электроника в системах электроснабжения переменного тока // Электричество. 2008. № 2. С. 33-38.
- [2] Satoh K., Yamamoto M. The present state of the art in high power semiconductor devices // Proceedings of the IEEE. 2001. № 89 (6). С. 813-821.
- [3] Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш. Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 5. С. 25-28.
- [4] Кралин А.А., Асабин А.А., Крюков Е.В. Фазоповоротное устройство для распределительных сетей среднего напряжения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 2 (117). С. 62-67.
- [5] Sosnina E.N., Loskutov A.A., Sevostyanov A. A., Bedretdinov R.Sh. EMC research of transformer – Thyristor regulator 2017 // in proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Latin America (ISGT Latin America 2017), 2017. С. 1-6.
- [6] Добрусин Л.А. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике // Силовая электроника. 2012. Том 4. № 37. С. 60-66.
- [7] Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: Учебное пособие. М.: МЭИ, 2012. – 360 с.
- [8] Солнцев Е.Б., Петрицкий С.А., Юртаев С.Н. Расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети 6-20 кВ с тиристорным регулятором напряжения // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 2. С. 39-52.
- [9] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
- [10] ABB Review: FACTS – solution to power flow control & stability problems. Sweden: ABB Power System AB, 1999.
- [11] Асабин А.А., Верховский С.Я., Соснина Е.Н., Гардин А.И., Бедретдинов Р.Ш., Кисель Д.А. Полупроводниковое фазоповоротное устройство, Пат. 157116; опубл. 2016. – Бюл. № 3.

E.B. Solntsev, S.A. Petritskiy, S.N. Iurtaev

**DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL
OF THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The process of transition to digital energy is associated with the introduction of controlled power devices based on modern semiconductor components into power systems. The article describes a thyristor regulator of the magnitude and phase of the voltage, which is a phase shifting device and regulates the network parameters. The operation of this device may adversely affect the power quality. The article is devoted to the study of the distortion of the sinusoidal curves of current and voltage caused by the operation of transformer-thyristor regulators of the magnitude and phase of the voltage in the distribution networks of medium voltage. The studies were carried out using the device model developed in Matlab Simulink. Oscillograms of phase and linear voltages were obtained for the mode of longitudinal-transverse regulation. It is established that the operation of the device causes a distortion of the harmonic composition of the current and voltage in the network. However, the magnitude of the distortion does not exceed the permissible values. The correctness of the simulation was confirmed by the coincidence with the results of the analytical calculation.

Keywords: simulation modeling, thyristor voltage regulator, power quality, non-sinusoidal voltage, voltage phase.

References

- [1] V.F. Sitnikov. Power electronics in AC power supply systems // *Elektrichestvo*, vol. 2, pp. 33-38, 2008.
- [2] K. Satoh and M. Jamamoto. The present state of the art in high power semiconductor devices // *IEEE Proc.*, vol. 89, no. 6, pp. 813-821, June 2001.
- [3] E.N. Sosnina and R.Sh. Bedretdinov. The main directions of development of intelligent electrical networks based on adaptive control // *Electrical equipment: operation and repair*, vol. 5, pp. 25-28, 2012.
- [4] A.A. Kralin, A.A. Asabin and E.V. Kryukov. Phase-turning device for medium-voltage distribution network // *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, vol. 2, no. 117, pp. 62-67, 2017.
- [5] E.N. Sosnina, A.A. Loskutov, A.A. Sevostyanov and R.Sh. Bedretdinov. EMC research of transformer – Thyristor regulator // in proc. 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Latin America, Jan. 2017, pp. 1-6.
- [6] L.A. Dobrusin. Tendencies of use of phase-shifting transformers in power industry // *Power electronics*, vol. 4, no. 37, pp.60-66, 2012.
- [7] A.P. Burman, Yu.K. Rozanov and Yu.G. Shakaryan, *Managing electricity flows and improving the efficiency of electric power systems*. Moscow: MEI, 2012.
- [8] E.B. Solntsev, S.A. Petritsky and S.N. Iurtaev. Design and analytical model of 6 – 20 kV distribution electric network section with thyristor voltage regulator // *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 39-52, 2018.
- [9] *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*, EN 50160-2010 ed3.0, July 2010.
- [10] *ABB Review: FACTS – solution to power flow control & stability problems*. Sweden: ABB Power System AB, 1999.
- [11] A.A. Asabin, S.Y. Verkhovskiy, E.N. Sosnina, A.I. Gardin, R.Sh. Bedretdinov and D.A. Kisel. Semiconductor phase shifter // R.F. Patent 157116, 2016.