

УДК 621.3

А.А. Кралин, Е.В. Крюков, В.В. Гуляев

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРВДН
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Посвящена изучению регулировочных характеристик тиристорного регулятора вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) в режиме поперечного регулирования. Представлены результаты гармонического анализа выходного напряжения ТРВДН, полученные с использованием моделирования в пакете Simulink.

Ключевые слова: регулирование напряжения, тиристорный регулятор, имитационная модель, регулировочные характеристики, гармонический анализ.

Одной из актуальных задач энергетической стратегии России до 2035 является обеспечение эффективной надежности электроснабжения в сочетании с интеллектуализацией систем [1].

Переоснащение и повышение технического уровня распределительных сетей среднего напряжения являются первоочередной задачей. Общая протяженность распределительных электрических сетей 6–20 кВ в России составляет порядка 2150 тыс. км. В сетях установлено около 290 тыс. трансформаторных подстанций 6–10 кВ мощностью 100–630 кВА.

В последнее время нагрузка на городские и сельские распределительные сети возрастает каждый год на 2–3%. РЭС России выполняют, как правило, функции пассивного транспорта и распределения электроэнергии. Сети имеют большой износ, низкий процент автоматизации, большие потери электроэнергии.

При эксплуатации РЭС возможны ситуации, когда какой-либо участок сети не может пропускать требуемую мощность либо уровень напряжения у потребителя не будет соответствовать требованиям ГОСТ. В связи с этим часто возникают вопросы поддержания должного уровня и качества напряжения, а также увеличения пропускной способности РЭС.

Получение оптимального напряжения, а также регулирование потоков реактивной мощности наиболее оптимальным будет при скоординированном подходе к использованию устройств регулирования параметров электроэнергии, что требует внедрения новых автоматизированных интеллектуальных распределительных электрических сетей классов напряжений 6–20 кВ на основе применения технологии гибких управляемых линий электропередач переменного тока (ГЛЭП) или, в соответствии с терминологией *IEEE - Flexible AC Transmission Systems* (гибкие передающие системы переменного тока) [2].

Гибкие передающие системы переменного тока могут быть реализованы внедрением в структуру электрической сети устройств продольной, поперечной и продольно-поперечной компенсации на основе твердотельных регуляторов величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) [3]. ТРВДН выполненные на основе полупроводниковых устройств силовой электроники обладают большим ресурсом работы, лучшим быстродействием по сравнению с электромеханическими, лучшими массогабаритными показателями по сравнению с трансформаторами с подмагничиванием и феррорезонансными регуляторами, а также большей перегрузочной способностью по сравнению с тиристорными регуляторами напряжения. На рис. 1 представлен один из вариантов схема силовой части ТРВДН [4].

Следует отметить, что предлагаемый ТРВДН обладает свойствами РПН и фазоповоротного трансформатора и может использоваться для эффективного управления потоками мощности в интеллектуальных распределительных электрических сетях различной конфигурации [5]. Применение ТРВДН в распределительных сетях позволяет отказаться от совместного использования нескольких устройств: регулятора напряжения с вольтодобавочными

трансформаторами, фазоповоротного устройства и (или) регулятора реактивной мощности. При этом использование одного устройства ТРВДН вместо двух значительно сократит стоимость устанавливаемого силового оборудования. Также важно отметить, что сложность силовых схем ФПУ и ТРВДН сопоставима.

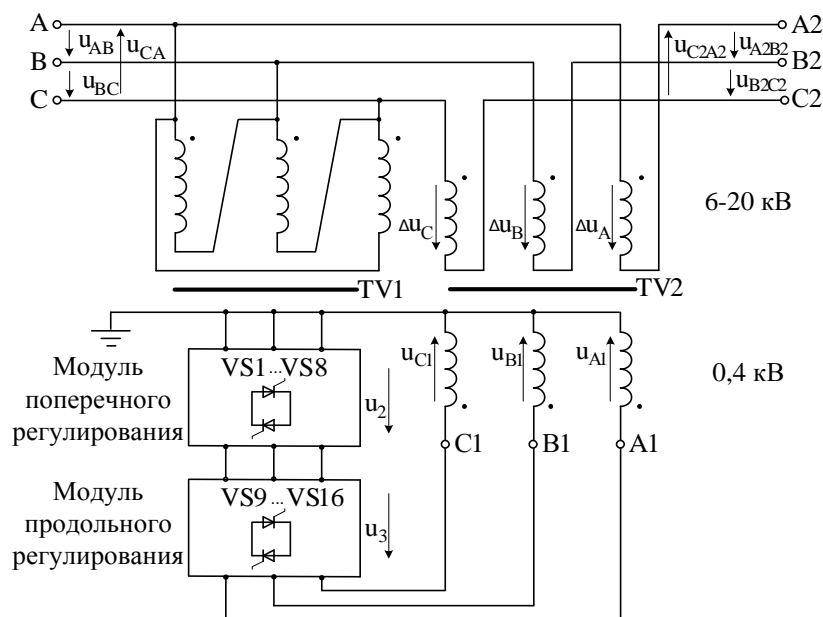


Рис. 1. Схема силовой части ТРВДН

Исследование электромагнитных процессов ТРВДН целесообразно выполнять на имитационных моделях. Имитационное моделирование позволяет построить регулировочные характеристики устройства, определить гармонический состав выходного напряжения, рассчитать основные электромагнитные величины для определения оптимальных режимов работы исследуемого устройства.

Основными составными элементами имитационной модели ТРВДН, выполненной в программе Simulink, являются модель трехфазной сети, модели шунтового и сервисного трансформаторов, модели тиристорных ключей, нагрузки и системы управления. Разработанные модели позволяют получить зависимости мгновенного и действующего значения выходного напряжения, определить величины углов сдвига между векторами входного и выходного напряжения, выполнить гармонический анализ выходного напряжения.

При поперечном регулировании ТРВДН формирует выходное напряжение, опережающее или запаздывающее относительно входного на угол α . Следует отметить, что поперечное регулирование напряжения вызывает увеличение выходного линейного напряжения.

Исследование выходного напряжения ТРВДН при поперечном регулировании проводилось при различных углах нагрузки φ . В качестве примера на рис. 2 представлены зависимости действующего значения выходного напряжения U_{rms} ТРВДН от напряжения управления U^* при поперечном регулировании в режиме опережения напряжения при углах нагрузки $\varphi=0^\circ$, $\varphi=30^\circ$, $\varphi=60^\circ$.

В модуле поперечного регулирования используется ступень вторичной обмотки шунтового трансформатора с напряжением, составляющим 8,3% от фазного напряжения сети. В процессе поперечного регулирования выходного напряжения ТРВДН изменение действующего значения выходного напряжения U_{rms} составляет не более 2,8%. Таким образом, значительное изменение напряжения управления U^* не приводит к существенному изменению действующего значения выходного напряжения ТРВДН.

Режим поперечного регулирования позволяет изменять угол сдвига фазы Θ между векторами входного и выходного напряжения. Диапазон изменения данного параметра в ре-

жиме отставания напряжения для различных углов нагрузки поясняют зависимости, представленные на рис. 3.

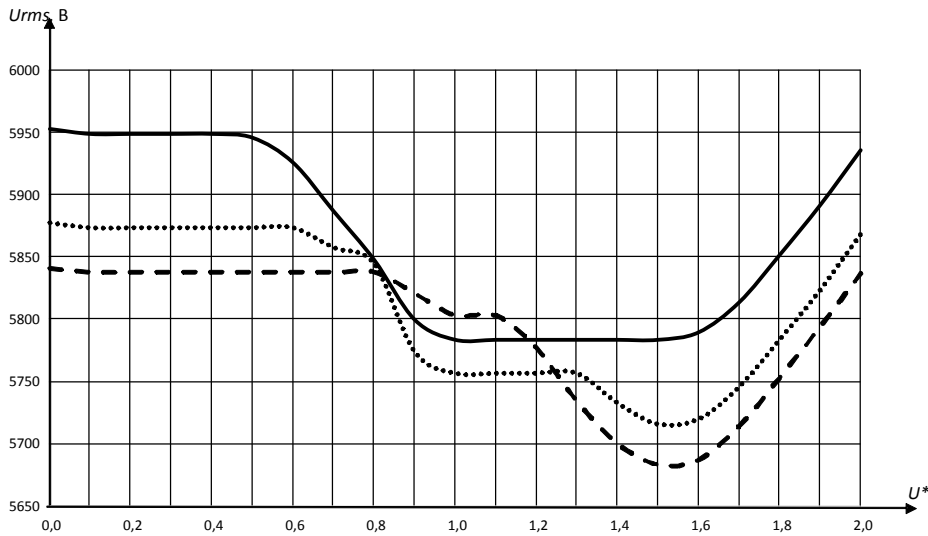


Рис. 2. Зависимости выходного напряжения U_{rms} ТРВДН от напряжения управления U^* при поперечном регулировании в режиме опережения напряжения при углах нагрузки: — $\varphi=0^\circ$; $\varphi=30^\circ$; - - $\varphi=60^\circ$

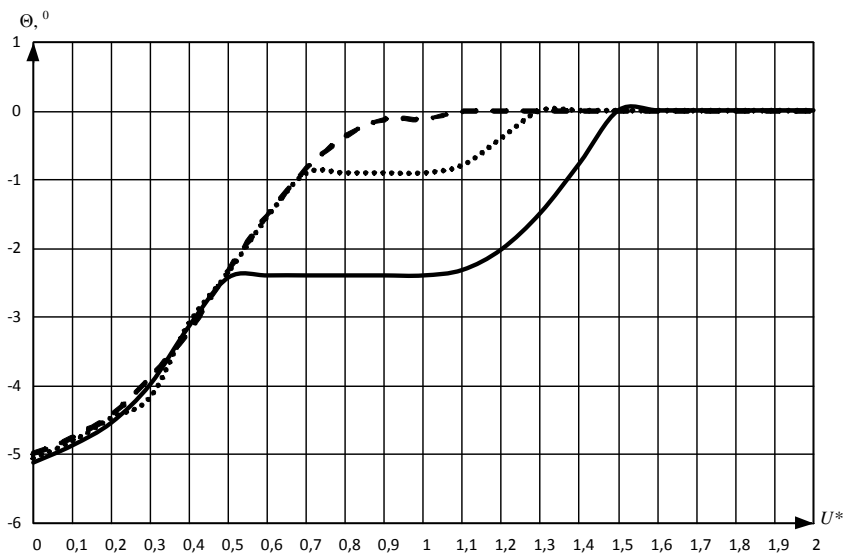


Рис. 3. Зависимость угла Θ от напряжения управления U^* при поперечном регулировании в режиме отставания напряжения при углах нагрузки: — $\varphi=0^\circ$; $\varphi=30^\circ$; - - $\varphi=60^\circ$

В ходе проведенного моделирования установлено, что при поперечном регулировании угол сдвига между векторами входного и выходного напряжения изменяется на 5 град. в сторону опережения и на 5 град. в сторону отставания.

В процессе импульсно-фазового регулирования напряжения происходит изменение структуры силовой схемы ТРВДН, вызванное коммутацией тиристорных соответствующих модулей. При этом происходит искажение формы выходного напряжения. На рис. 4 представлены зависимости коэффициента нелинейных искажений в режиме запаздывания выходного напряжения. Указанные зависимости позволяют установить, что максимальное значение коэффициента нелинейных искажений k_D составляет 2,7% и соответствует активной нагрузке $\varphi=0^\circ$. При значениях фазового угла нагрузки $\varphi=30^\circ$ и $\varphi=60^\circ$ k_D не превышает значения 2,4%.

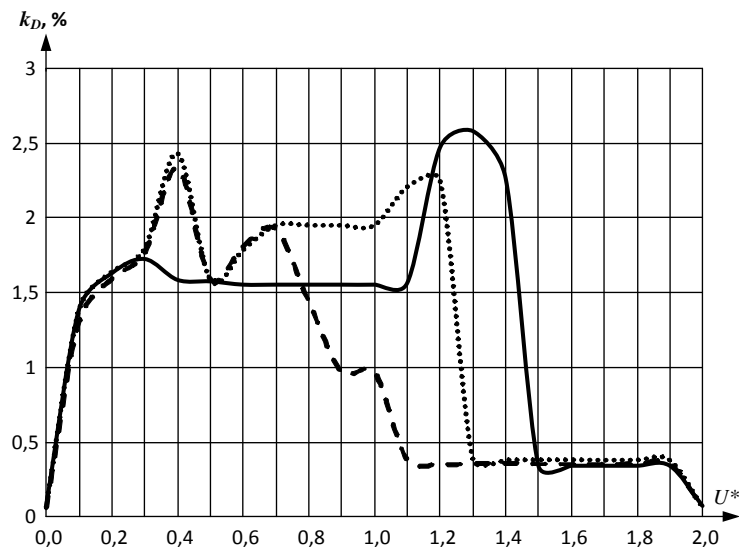


Рис. 4. Зависимости коэффициента нелинейных искажений от напряжения управления при поперечном регулировании с запаздыванием напряжения для углов нагрузки:
 — $\varphi=0^{\circ}$, $\varphi=30^{\circ}$, - - - $\varphi=60^{\circ}$

Следует отметить, что в случае трехпроводной системы электроснабжения в гармоническом составе выходного напряжения отсутствуют четные гармоники, кратные трем, гармоники и постоянная составляющая. Поэтому при исследовании процессов регулирования целесообразно анализировать зависимости коэффициента нелинейных искажений, коэффициентов пятой, седьмой и одиннадцатой гармонических составляющих.

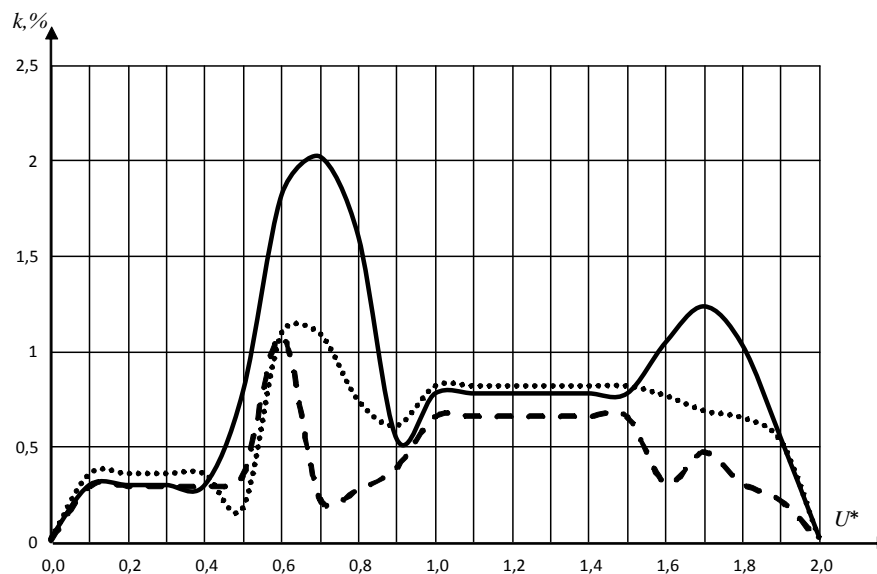


Рис. 5. Зависимости изменения коэффициентов 5, 7, 11 гармоник выходного напряжения от величины напряжения управления при опережении напряжения для угла нагрузки $\varphi=0^{\circ}$:
 — коэффициент пятой гармоники; коэффициент седьмой гармоники;
 - - - коэффициент одиннадцатой гармоники

Установлено, что коэффициент пятой гармоники при поперечном регулировании имеет наибольшее значение 2,1% при активной нагрузке ($\varphi=0^{\circ}$). Значения коэффициентов седьмой и одиннадцатой гармоник в процессе регулирования не превышают 1,2% (рис. 5). С ростом номера гармоники значение ее амплитуды снижается.

Выводы

1. В процессе поперечного регулирования угол сдвига между векторами входного и выходного напряжения изменяется на 5 град. в сторону опережения и на 5 град. в сторону отставания.
2. С уменьшением угла нагрузки при поперечном регулировании возрастают значения высших гармонических выходного напряжения.
3. При всех значениях угла нагрузки преобладает величина пятой гармоники, при этом максимальное её значение соответствует активной нагрузке $\varphi=0^0$.
4. Выходное напряжение ТРВДН при поперечном регулировании отвечает требованиям ГОСТ 32144-2013 для сетей среднего напряжения: значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не превышает 5%; значения коэффициентов пятой, седьмой, одиннадцатой гармонических составляющих не превышают соответственно 4, 3 и 2%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0242 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0242).

Библиографический список

1. Концепция реализации национального проекта “Интеллектуальная энергетическая система России”. – М., 2015. – 25 с.
2. **Соснина, Е.Н.** Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления / Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – №5. – С. 25–28.
3. **Соснина, Е.Н.** Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6–20 кВ / Е.Н. Соснина [и др.] // Пром-инжиниринг: сб. трудов 2-й Междунар. научно-технич. конф. «». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 322–327.
4. **Sosnina, E.N.** Power flow control device prototype tests / E.N. Sosnina [et al.]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Asia. – 2016. – P. 312–316.
5. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст., 2017. – С. 132–136.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2018*

A.A. Kralin, E.V. Kryukov, V.V. Gulyaev

RESEARCH OF TVR REGULATING CHARACTERISTICS AT OUTPUT VOLTAGE TRANSVERSE REGULATION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Research of the TVR regulating characteristics and harmonic analysis.

Design/methodology/approach: The analysis was carried out using simulation model. The TVR model has been developed in the visual programming environment MATLAB - Simulink with the use of the elements of the library of SimPowerSystems electrical devices.

Findings: The study of the TVR output voltage regulatory characteristics and harmonic analysis was conducted. The shift angle between the input and output voltage vectors changes by 5 degrees in advance and by 5 degrees in the direction of the lag. The output voltage higher harmonic component values increase with the decrease of the angle. The fifth harmonic magnitude is dominated at all values of the load angle, while its maximum value corresponds to the resistive load.

Key words: voltage regulation, thyristor regulator, simulation model, operating characteristics, harmonic analysis.