

УДК 621.31

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

РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 6-20 кВ С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Одно из ключевых направлений развития электротехнических систем связано с внедрением оборудования, позволяющего осуществлять активно-адаптивное управление параметрами систем. В НГТУ разработан твердотельный регулятор вольтодобавочного напряжения (ТРВДН), позволяющий регулировать величину выходного напряжения и угол сдвига основной гармоники. Однако, вследствие использования в конструкции устройства тиристорных коммутаторов, при своей работе ТРВДН вносит искажения в форму выходного напряжения. Статья посвящена разработке расчетно-аналитической модели участка распределительной электрической сети 6-20 кВ с тиристорным регулятором величины и фазы напряжения. Модель позволяет проводить исследование электромагнитной совместимости тиристорных регуляторов напряжения при их использовании в распределительных сетях среднего напряжения. Назначение модели заключается в определении в электрической сети несинусоидальности напряжений и токов, вызванных работой тиристорных регуляторов. С помощью модели проведен анализ гармонического состава напряжений на выходе ТРВДН и анализ гармонического состава токов, генерируемых ТРВДН в электрическую сеть. Полученные результаты будут использованы для определения оптимальных параметров устройства, обеспечивающих минимальное отрицательное воздействие на качество выходного напряжения.

Ключевые слова: несинусоидальность напряжения, расчетно-аналитическая модель, регулирование величины и фазы напряжения, тиристорный регулятор, электромагнитная совместимость.

1. Введение

Устройства автоматического регулирования величины и фазы напряжения относятся к элементам активно-адаптивного управления параметрами и конфигурацией электрических сетей [1-8]. Применение данных устройств выполняет функцию адаптации сети к текущему режиму ее работы, и позволяет:

- обеспечить оптимальный уровень напряжения у потребителей при разных длинах питающих линий, в результате чего регуляторы РПН рай-

онных понизительных подстанций могут не обеспечивать требуемый уровень напряжения у конечных потребителей;

- обеспечить оптимальное распределение потоков активной и реактивной мощности в сложных замкнутых электрических сетях;
- увеличить пропускную способность электрических сетей, снизить потери активной мощности при передаче.

Учеными НГТУ разработан твердотельный регулятор вольтодобавочного напряжения (ТРВДН). Это автоматический тиристорный регулятор величины и фазы напряжения с параллельным и последовательным трансформаторами [9].

На рис. 1 приведена однолинейная схема распределительной электрической сети с ТРВДН.

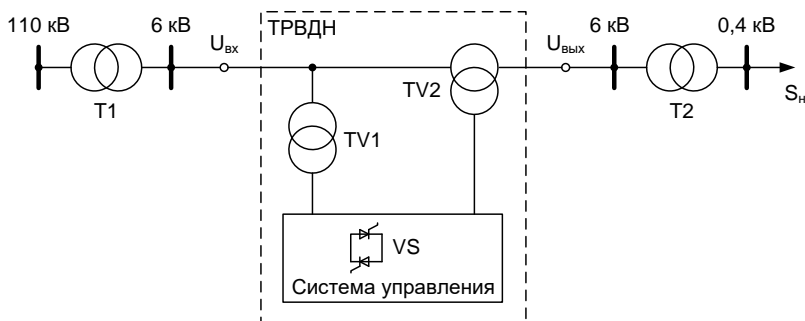


Рис. 1. Однолинейная схема распределительной электрической сети с ТРВДН

Силовая часть ТРВДН содержит параллельный трансформатор $TV1$ и последовательный трансформатор $TV2$. Первичные обмотки трансформатора $TV1$ подключены к входным зажимам ТРВДН (сеть 6-20 кВ). Его вторичные обмотки через тиристорные коммутаторы VS системы управления подключены к первичным обмоткам трансформатора $TV2$. Вторичные обмотки трансформатора $TV2$, включенные между входными ($U_{вх}$) и выходными ($U_{вых}$) зажимами ТРВДН (в расщелку линии), вносят продольно-поперечную составляющую напряжения, регулируемую тиристорными коммутаторами по фазе и величине.

Система управления ТРВДН включает модули продольного и поперечного регулирования, выполненные на тиристорных коммутаторах. Модуль продольного регулирования реализует регулирование величины, а модуль поперечного регулирования – фазы выходного напряжения ТРВДН относительно входного. Оба модуля с помощью принятых схемных соединений тиристорных коммутаторов могут быть включены или исключены

из цепи питания первичных обмоток трансформатора $TV2$. Совместное использование модулей поперечного и продольного регулирования позволяет реализовать продольно-поперечное регулирование выходного напряжения ТРВДН.

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 $\pm 5^\circ$.

ТРВДН, вследствие использования в его конструкции тиристорных коммутаторов, при своей работе вносит искажения в форму выходного напряжения, т.е. генерирует высшие гармонические составляющие, допустимый уровень которых ограничивается требованиями к качеству электроэнергии по показателям несинусоидальности напряжения.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013, показателями качества электроэнергии, относящимися к несинусоидальности напряжения, являются:

- значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(v)}$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей U_1 ;
- значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U (отношение среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей, выраженное в процентах) [10].

При этом искажения формы выходного напряжения ТРВДН генерируют гармонические токи, протекающие в электрических сетях. Эти токи создают соответствующие падения напряжений на сопротивлениях сетей, и таким образом оказывают влияние на гармонический состав напряжений в различных точках сети, к которой подключен ТРВДН.

II. Цели и задачи исследования

Целью разработки расчетно-аналитической модели участка распределительной электрической сети с ТРВДН является оценка влияния ТРВДН на несинусоидальность напряжения в электрической сети в различных режимах его работы.

При разработке модели поставлены следующие задачи: анализ гармонического состава напряжений на выходе ТРВДН; анализ гармонического состава токов, генерируемых ТРВДН в электрическую сеть.

III. Описание расчетно-аналитической модели ТРВДН

В основу модели заложены математические выражения, описывающие параметры трехфазной электрической сети и теоретические основы работы тиристорных коммутаторов [11-13].

В модели рассматривается схема участка распределительной электрической сети с ТРВДН, показанная на рис. 1. На рис. 2 приведена трехфазная схема замещения данного участка сети. Источником питания является трансформатор $T1$ районной понижительной подстанции 110/6 (10, 20) кВ, вторичные обмотки которого соединены по схеме «треугольник». Обмотки ТРВДН включены последовательно, в рассечку линии 6-20 кВ. В качестве нагрузки представлены эквивалентные сопротивления системы «трансформатор ($T2$) – нагрузка (S_{II})», первичные обмотки трансформатора $T2$ соединены по схеме «треугольник».

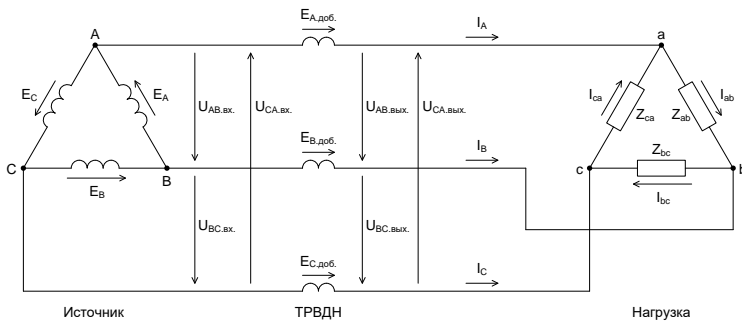


Рис. 2. Схема замещения участка трехфазной сети с ТРВДН

Регулирование величины напряжения под действием ТРВДН осуществляется введением в линию каждой фазы добавки напряжения U_2 , совпадающей или находящейся в противофазе с фазными напряжениями источника U_1 , что позволяет получить на выходе ТРВДН линейные напряжения, совпадающие по фазе со входными и увеличенные или уменьшенные относительно входных напряжений на величину U_2 .

Регулирование фазы напряжения реализуется введением в линию каждой фазы добавки напряжения U_3 , сдвинутой на $\pm 90^\circ$ относительно фазных напряжений сети U_1 , что позволяет получить на выходе ТРВДН линейные напряжения, отстающие или опережающие по фазе входные напряжения на угол θ . Отстающие напряжения формируются введением инверсных напряжений поперечного регулирования, опережающие – введением прямых напряжений.

В расчетно-аналитической модели участка сети с ТРВДН питающий источник замещается на эквивалентную систему ЭДС, соединенных по схеме «звезда». Схема модели представлена на рис. 3.

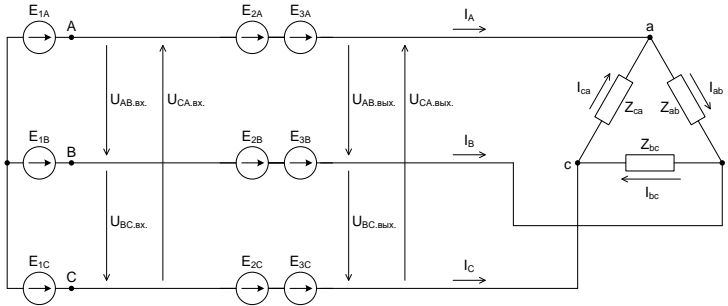


Рис. 3. Схема расчетно-аналитической модели участка электрической сети с ТРВДН

В схеме, представленной на рис. 3, система ЭДС E_{1A}, E_{1B}, E_{1C} с фазными напряжениями U_{1A}, U_{1B}, U_{1C} моделирует источник питания сети с неизменными параметрами. ЭДС E_{2A}, E_{2B}, E_{2C} с напряжениями U_{2A}, U_{2B}, U_{2C} и ЭДС E_{3A}, E_{3B}, E_{3C} с напряжениями U_{3A}, U_{3B}, U_{3C} являются регулируемы, и моделируют соответственно модуль продольного и поперечного регулирования ТРВДН.

Расчет выходных напряжений ТРВДН

Мгновенные значения фазных напряжений источника питания описываются уравнениями, (кВ):

$$\begin{aligned} u_{1A} &= U_{1m} \cdot \sin(\omega t); \\ u_{1B} &= U_{1m} \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi); \\ u_{1C} &= U_{1m} \cdot \sin(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_{1m} – амплитудное значение фазного напряжения эквивалентного источника, кВ; ω – угловая частота синусоидального тока, $1/c$; t – время, с.

Величина U_{1m} определяется по выражению:

$$U_{1m} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2};$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение сети (6, 10, 20 кВ).

Угловая частота синусоидального тока определяется по выражению:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

где f – номинальная частота синусоидального тока (50 Гц).

Мгновенные значения напряжения фазы A модуля продольного регулирования описываются уравнением, (кВ):

$$u_{2A} = \begin{cases} \pm U_{2m} \cdot \sin(\omega t) & \text{при } \alpha \leq \omega t \leq \pi + \varphi \\ 0 & \text{при } \varphi < \omega t < \alpha \end{cases}, \quad (2)$$

где U_{2m} – амплитудное значение напряжения модуля продольного регулирования, кВ; α – угол управления тиристорами, рад; φ – угол фазового сдвига между током и напряжением (угол нагрузки), рад.

Мгновенные значения напряжения фаз B и C модуля продольного регулирования определяются аналогично, с учетом угла сдвига фаз.

Величина U_{2m} определяется в зависимости от требуемого диапазона регулирования величины напряжения на выходе модели D (при $D = \pm 10\%$ $U_{2m} = 0,1 \cdot U_{1m}$).

Мгновенные значения напряжения фазы A модуля поперечного регулирования описываются уравнением, (кВ):

$$u_{3A} = \begin{cases} \pm U_{3m} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) & \text{при } \alpha + \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \pi + \varphi + \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{при } \varphi + \frac{\pi}{2} < \omega t < \alpha + \frac{\pi}{2} \end{cases}, \quad (3)$$

где U_{3m} – амплитудное значение напряжения модуля поперечного регулирования, кВ.

Мгновенные значения напряжения фаз B и C модуля поперечного регулирования определяются аналогично, с учетом угла сдвига фаз.

Величина U_{3m} определяется в зависимости от требуемого диапазона регулирования угла сдвига напряжения на выходе модели θ (при $\theta = \pm 5\%$ $U_{3m} = 0,1 \cdot U_{1m}$).

Мгновенные значения фазных напряжений на выходе ТРВДН определяются по выражениям, (кВ):

$$\begin{aligned} u_{A, \text{вых.}} &= u_{1A} + u_{2A} + u_{3A}; \\ u_{B, \text{вых.}} &= u_{1B} + u_{2B} + u_{3B}; \\ u_{C, \text{вых.}} &= u_{1C} + u_{2C} + u_{3C}. \end{aligned} \quad (4)$$

Мгновенные значения линейных напряжений на входе ТРВДН, (кВ):

$$\begin{aligned} u_{AB, \text{вх.}} &= u_{1A} - u_{1B}; \\ u_{BC, \text{вх.}} &= u_{1B} - u_{1C}; \\ u_{CA, \text{вх.}} &= u_{1C} - u_{1A}. \end{aligned} \quad (5)$$

Мгновенные значения линейных напряжений на выходе ТРВДН, (кВ):

$$\begin{aligned} u_{AB, \text{вых.}} &= u_{A, \text{вых.}} - u_{B, \text{вых.}}; \\ u_{BC, \text{вых.}} &= u_{B, \text{вых.}} - u_{C, \text{вых.}}; \\ u_{CA, \text{вых.}} &= u_{C, \text{вых.}} - u_{A, \text{вых.}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Расчет выходных токов ТРВДН.

Расчет выходных токов ТРВДН с использованием модели, показанной на рисунке 3, производится в следующей последовательности.

1. Определяются мгновенные значения фазных токов нагрузки при соединении нагрузочных сопротивлений в «звезду», (А):

$$\begin{aligned} i_a &= i_{1a} + i_{2a} + i_{3a}; \\ i_b &= i_{1b} + i_{2b} + i_{3b}; \\ i_c &= i_{1c} + i_{2c} + i_{3c}, \end{aligned} \quad (7)$$

где i_1, i_2, i_3 , – мгновенные значения токов в фазах нагрузки a, b, c , протекающих под действием напряжений u_1, u_2, u_3 соответствующих фаз.

Значения i_{1a}, i_{1b}, i_{1c} описываются уравнениями, (А):

$$\begin{aligned} i_{1a} &= \frac{U_{1m}}{Z} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \cdot 10^3; \\ i_{1b} &= \frac{U_{1m}}{Z} \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3} \cdot \pi - \varphi) \cdot 10^3; \\ i_{1c} &= \frac{U_{1m}}{Z} \cdot \sin(\omega t + \frac{2}{3} \cdot \pi - \varphi) \cdot 10^3, \end{aligned} \quad (8)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – полное сопротивление нагрузки одной фазы, Ом.

Активное (R) и индуктивное (X) сопротивления фазы нагрузки определяются по выражениям, (Ом):

$$\begin{aligned} R &= 3 \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \cdot \cos \varphi \cdot 10^3; \\ X &= 3 \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \cdot \sin \varphi \cdot 10^3, \end{aligned} \quad (9)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное (линейное) напряжение нагрузки, кВ; $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность нагрузки, кВА.

Значения i_{2a} описываются уравнением, (А):

$$i_{2a} = \left\{ \begin{array}{l} \pm \frac{U_{2m}}{Z} \cdot \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{\frac{-(\omega t - \alpha)}{\text{tg}\varphi}} \right] \cdot 10^3 \quad \text{при } \alpha \leq \omega t \leq \pi + \varphi \\ 0 \quad \text{при } \varphi < \omega t < \alpha \end{array} \right\}. \quad (10)$$

Значения i_{2b} , i_{2c} определяются аналогично, с учетом угла сдвига фаз.
Значения i_{3a} описываются уравнением, (А):

$$i_{3a} = \left\{ \begin{array}{l} \pm \frac{U_{3m}}{Z} \cdot \left[\sin(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{\frac{-(\omega t - \pi/2 - \alpha)}{\text{tg}\varphi}} \right] \cdot 10^3 \quad \text{при } \alpha + \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \pi + \varphi + \frac{\pi}{2} \\ 0 \quad \text{при } \varphi + \frac{\pi}{2} < \omega t < \alpha + \frac{\pi}{2} \end{array} \right\}. \quad (11)$$

Значения i_{3b} , i_{3c} определяются аналогично, с учетом угла сдвига фаз.

2. Определяются мгновенные значения фазных токов нагрузки при соединении нагрузочных сопротивлений в «треугольник» – в соответствии со схемой модели на рисунке 3, (А):

$$\begin{aligned} i_{ab} &= i_a - i_b; \\ i_{bc} &= i_b - i_c; \\ i_{ca} &= i_c - i_a. \end{aligned} \quad (12)$$

3. Определяются мгновенные значения линейных токов на выходе ТРВДН по уравнениям, составленным по первому закону Кирхгофа для узлов a , b , c на рис. 3, (А):

$$\begin{aligned} i_A &= i_{ab} - i_{ca}; \\ i_B &= i_{bc} - i_{ab}; \\ i_C &= i_{ca} - i_{bc}. \end{aligned} \quad (13)$$

Определение гармонического состава выходных напряжений и токов.

Кривые напряжений и токов на выходе ТРВДН строятся по выражениям (6), (13). Гармонический состав напряжений и токов определяется разложением полученных кривых в ряд Фурье вида:

$$f(t) = A_0 + \sum_{v=1}^{\infty} A_v \cdot \sin(v \cdot \omega t + \psi_v), \quad (14)$$

где A_0 – постоянная составляющая или нулевая гармоника; v – номер гармоники; A_v – амплитуда v – й гармоники; ψ_v – начальная фаза v – й гармоники.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013, нормированию подлежат гармонические составляющие напряжения до 40-го порядка. Для анализа гармонического состава токов и напряжений с использованием полученных из (14) коэффициентов ряда Фурье, используются следующие выражения:

$$K_{A(v)} = \frac{A_v}{A_1} \cdot 100\%;$$

$$K_A = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} A_v^2}}{A_1} \cdot 100\%, \quad (15)$$

где $K_{A(v)}$ – коэффициенты гармонических составляющих (до 40-ого порядка), %; K_A – суммарный коэффициент гармонических составляющих (коэффициент несинусоидальности), %.

Описанная модель позволяет проводить исследования гармонического состава напряжений и токов ТРВДН в различных режимах его работы при различных значениях угла управления тиристорами в диапазоне $(0-180)^\circ$ (один полупериод), при активной нагрузке и при активно-индуктивной нагрузке с различными значениями угла φ .

На рис. 4 показаны построенные с использованием модели временные диаграммы линейных напряжений фазы АВ на входе и выходе ТРВДН при совместной работе модулей продольного и поперечного регулирования в граничных режимах повышения/отставания и понижения/опережения напряжения, демонстрирующие принцип регулирования выходного напряжения ТРВДН относительно входного.

На рис. 5 и 6 показаны примеры полученных с использованием модели временных диаграмм выходных напряжений и токов ТРВДН и их гармонический состав в сравнении с нормируемыми ГОСТ значениями, при некоторых режимах работы ТРВДН.

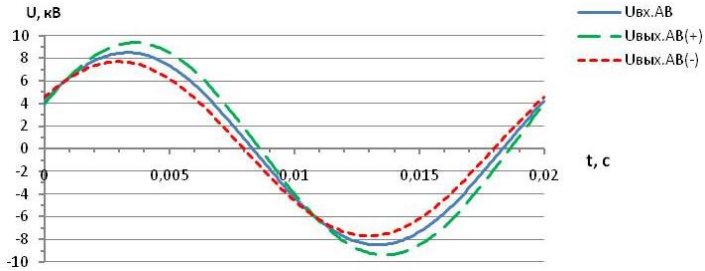
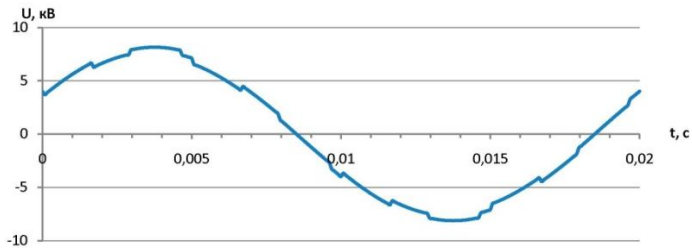
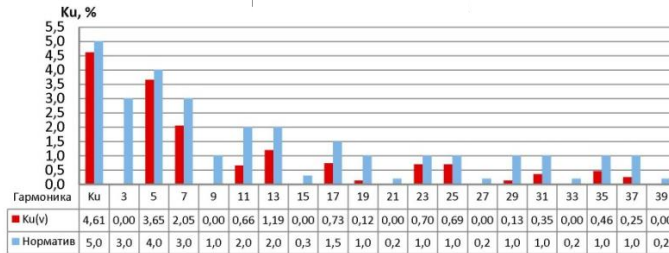


Рис. 4. Временные диаграммы линейных напряжений AB на входе ($U_{вх.АВ}$) и выходе ($U_{вых.АВ}$) ТРВДН в граничных режимах повышения/отставания (+) и понижения/опережения (-) напряжения

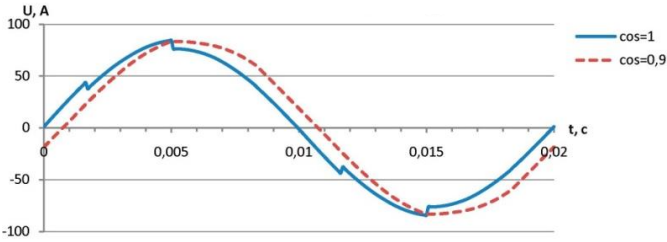


а.

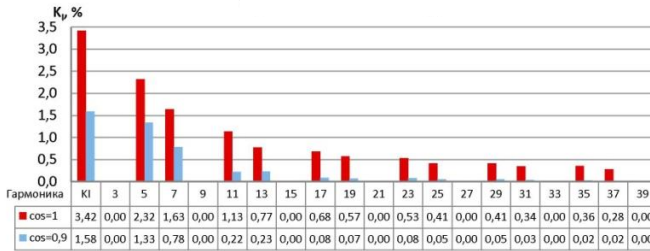


б.

Рис. 5. Временная диаграмма напряжения U_{AB} на выходе ТРВДН (а) и его гармонический состав (б) при $\cos \varphi = 0,5$, режим понижения/отставания напряжения $\alpha = 90^\circ/90^\circ$



а.



б.

Рис. 6. Временные диаграммы тока I_A на выходе ТРВДН (а) и его гармонический состав (б) при $\cos \varphi = 1,0$: режим понижения/отставания напряжения $\alpha = 90^\circ/120^\circ$; $\cos \varphi = 0,9$: режим понижения/опережения напряжения $\alpha = 90^\circ/60^\circ$

IV. Заключение

1. Разработана расчетно-аналитическая модель участка распределительной электрической сети с ТРВДН, позволяющая определять гармонический состав напряжений и токов на выходе ТРВДН в различных режимах его работы с различными параметрами нагрузки.
2. Разработанная модель позволяет проводить исследования электромагнитной совместимости ТРВДН при его применении в распределительных сетях среднего напряжения.
3. Модель обеспечивает многовариантность расчетов с различными параметрами ТРВДН и нагрузки, что позволяет определять оптимальные параметры устройства на стадиях проектирования устройства и его реализации в электрической сети.

Библиографический список

- [1] Лоскутов А.Б. Решение проблем при переходе электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1 (1). С. 9-25.
- [2] Соснина Е.Н. Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 5. С. 25-28.
- [3] Кралин А.А., Асабин А.А., Крюков Е.В. Фазоповоротное устройство для распределительных сетей среднего напряжения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород. 2017. Т. 78. № 2. С.62-67.
- [4] Добрусин Л.А. Проблемы энергоэффективности и энергосбережения в России. Информационно-аналитический обзор. Часть III. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике // Силовая электроника. 2012. № 4. С. 60-66.
- [5] Sosnina E., Loskutov A., Sevostyanov A., Bedretdinov R. EMC research of transformer – thyristor regulator // 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America, Jan. 2017. Pp. 1-6.
- [6] Ashpazi M.A., Mohammadi-Ivatloo B., Zare K., Abapour M. Probabilistic allocation of thyristor – controlled phase shifting transformer for transient stability enhancement of electric power system // IETE Journal of Research. 2015. № 61. Pp. 382-391.
- [7] Khelfi A., Mesbah T., Djellad A. TCPST (thyristor control phase shifting transformer) impact on power quality. 2013.
- [8] Sharma A., Jaswal R.A. Congestion Management by TCPST in IEEE 9 bus system using Matlab Simulink // International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. 2013.
- [9] Асабин А.А., Верховский С.Я., Соснина Е.Н., Гардин А.И., Бедретдинов Р.Ш., Кисель Д.А. Полупроводниковое фазоповоротное устройство, Пат. 157116 РФ, опубл. 2016. – Бюл. № 3.
- [10] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
- [11] Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979. – 616 с.
- [12] Соловьев В.А. Системы управления электроприводами. Ч.2. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2004. – 153 с.
- [13] Тиристоры. Технический справочник: пер. с англ., под ред. Лабунцова В.А., Обухова А.Ф., Свиридова С.Г. М.: Энергия, 1971. – 560 с.

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

**DESIGN AND ANALYTICAL MODEL
OF 6 – 20 kV DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORK
SECTION WITH THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR**

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

Abstract. One of the key areas of the development of electrical systems is associated with the introduction of equipment that provides an active and adaptive control of system parameters. A solid – state voltage regulator (SSVR) has been developed in the NNSTU. It allows adjusting the output voltage and the fundamental harmonic shift angle. However, due to the use of thyristor switches in the device design, the SSVR distorts the shape of the output voltage. The article is devoted to the development of a computational and analytical model of a 6 – 20 kV distribution network section with a voltage magnitude and phase thyristor regulator. The model allows one to study of electromagnetic compatibility of thyristor voltage regulators in medium voltage distribution networks. The purpose of the model is to determine the non-sinusoidal voltages and currents caused by the operation of thyristor regulators in the electrical network. An analysis of the harmonic composition of the voltages at the SSVR output and an analysis of the harmonic composition of the currents generated by the SSVR into the electrical network have been carried out with the help of the model. The results will be used to determine the optimal parameters of the device, ensuring minimal negative impact on the quality of the output voltage.

Keywords: calculated-analytical model, electromagnetic compatibility, non-sinusoidal voltage, regulation of the magnitude and phase of the voltage, thyristor controller.

References

- [1] A.B. Loskutov. Problem solving in the transition of electric power industry to digital technologic // *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 9-25, 2018.
- [2] E.N. Sosnina. The main directions of development of intelligent electrical networks based on adaptive control // *Electrical equipment: operation and repair*, vol. 5, pp. 25-28, 2012.
- [3] A.A. Kralin, A.A. Asabin and E.V. Kryukov. Phase-turning device for medium-voltage distribution network // *Proceedings of the NNSTU R.E. Alekseev*, vol. 2 (78), p. 62-67, 2017.
- [4] L.A. Dobrusin. Problems of energy efficiency and energy saving in Russia. Information and analytical review. Pt. III. Tendencies of application of phase-shifting transformers in power industry // *Power electronics*, vol. 4, pp. 60-66, 2012.

- [5] E. Sosnina, A. Loskutov, A. Sevostyanov and R. Bedretdinov. EMC research of transformer-thyristor regulator // in proc. 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference. Latin America, Jan. 2017, p. 1-6.
- [6] M.A. Ashpazi, B. Mohammadi-Ivatloo, K. Zare and M. Abapour. Probabilistic allocation of thyristor-controlled phase shifting transformer for transient stability enhancement of electric power system // IETE Journal of Research, vol. 61, pp. 382-391, 2015.
- [7] A. Khelfi, T. Mesbah, A. Djellad. TCPST (thyristor control phase shifting transformer) impact on power quality. 2013.
- [8] A. Sharma, R.A. Jaswal. Congestion Management by TCPST in IEEE 9 bus system using Matlab Simulink // International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. Aug. 2013.
- [9] A.A. Asabin, S.Y. Verkhovsky, E.N. Sosnina, A.I. Gardin, R.Sh. Bedretdinov and D.A. Kisel. Semiconductor phase shifter// R.F. Patent 157116, 2016.
- [10] Voltage characteristics of energy supplied by public electricity networks, EN 50160 – 2010 ed.3.0, July 2010.
- [11] M.G. Chilikin, V.I. Klyuchev and A.S. Sandler, Theory of automated electric drive. Moscow: Energy, 1979.
- [12] V.A. Soloviev, Electric drive control systems. Part 2. Komsomolsk-on-Amur: KnASTU, 2004.
- [13] Thyristors. Technical reference: 2nd ed. Ed by V.A. Labuntsov, A.F. Obukhov and S.G. Sviridov. Moscow: Energy, 1971.