УДК 621.314

https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-33-40

Климаш В.С.¹, Константинов А.М.²

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет

²Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

Стабилизатор трёхфазного напряжения для трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ и анализ способов его управления

Рассмотрена проблема нестабильного напряжения у трёхфазных потребителей электроэнергии при их питании от трансформаторных подстанций, включая комплектные трансформаторные подстанции напряжением 10/0,4 кВ. Выполнен сравнительный анализ существующих устройств регулирования и стабилизации трёхфазного напряжения. Выявлены их основные недостатки. Предложен вариант силовой схемы трёхфазного стабилизатора напряжения без входного преобразовательного трансформатора и его подключение в рассечку вторичной обмотки главного трансформатора подстанции, что позволяет минимизировать его массогабаритные параметры. Стабилизатор представляет собой маломощный блочно-модульный тиристорнотранзисторный канал, содержащий звено повышенной частоты, обеспечивающий формирование и регулирование напряжения вольтодобавки для нагрузки совместно с напряжением главного трансформатора подстанции. В качестве звена повышенной частоты применён понижающий трансформатор, работающий на частоте 450 Гц. В работе представлено краткое описание схемы и принципа действия предлагаемого стабилизатора трёхфазного напряжения, а также способов его управления. Выполнено построение регулировочных характеристик и проведен гармонический анализ напряжения на нагрузке при этих способах управления. Получены аналитические соотношения для действующего напряжения на нагрузке в процессе стабилизации, его первой гармоники и среднего значения, соответственно при амплитудном регулировании реверсивным выпрямителем и широтно-импульсном регулировании инвертором напряжения. Выполнено имитационное моделирование работы устройства в различных режимах работы, а именно при пониженном напряжении в сети и на нагрузке и при повышенном напряжении в сети и на нагрузке. Представлены некоторые результаты имитационного моделирования в программной среде Matlab/Simulink. Сделаны выводы по работе.

Ключевые слова: стабилизатор, звено повышенной частоты, комплектная трансформаторная подстанция, реверсивный выпрямитель, инвертор напряжения, непосредственный преобразователь частоты, главный трансформатор подстанции, амплитудный способ управления, широтно-импульсный способ управления, качество напряжения, потребители электроэнергии, имитационное моделирование, MATLAB/Simulink.

Введение

В настоящее время существует ряд потребителей, требовательных к стабильному напряжению. Особо остро проблема нестабильного напряжения возникает, когда отсутствуют какие-либо устройства для регулирования и стабилизации напряжения. К таким потребителям относятся различные цеховые трансформаторные подстанции, системы собственных нужд тяговых подстанций переменного тока, питающих потребителей автоблокировки через трансформаторы с системой ПБВ [1], когда в условиях интенсивного тяжеловесного движения возникают частые отклонения напряжения и его несимметрия по фазам. Для обеспечения стабильного напряжения у потребителей разрабатываются и применяются стабилизаторы напряжения. При их разработке актуальными становятся вопросы не только высоких энергетических показателей и быстродействия, но и снижения их собственных массогабаритных показателей, а также расширения функциональных возможностей в одном устройстве, что согласуется с современной тенденцией по компактизации и минимизации основного электрооборудования трансформаторных подстанций [2].

В настоящее время среди устройств для стабилизации и регулирования напряжения нашли применение в первичных (10 кВ) или во вторичных цепях (0,4 кВ) главного трансформатора подстанции:

1. Электромеханические устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) – на первичной

(высокой) стороне главного трансформатора подстанции [3, 4].

 Управляемые шунтирующие реакторы (УШР) – на первичной (высокой) стороне главного трансформатора подстанции [5-7].

3. Стабилизаторы типа СТС – во вторичных цепях главного трансформатора подстанции [8-10].

4. Стабилизаторы типа Odissey – во вторичных цепях главного трансформатора подстанции [11].

В табл. 1 представлены основные параметры стабилизаторов: удельная мощность $P_{y_{z_y}}$, время срабатывания (быстродействие) t_{cp} и диапазон регулирования D_p выходного напряжения.

Проведенный анализ показал, что среди недостатков устройств регулирования и стабилизации следует отметить следующие: низкое быстродействие (см. **табл. 1** от 3,8 до 0,04 с), завышенные массогабаритные показатели (от 4 до 6,1 кВА/кг для стабилизаторов во вторичных цепях главного трансформатора подстанции) и невысокая энергоэффективность.

Таблица 1 йств

Сравнительная оценка параметров устройств регулирования и стабилизации напряжения

Тип	<i>Р</i> _{уд} , кВА/кг	$t_{\rm cp},{ m c}$	$D_{ m p},$ %
РПН	5-7	1,5-3,8	±10 до ±16
УШР	0,5-3	1-4	±16 до ±20
CTC	6,1	0,2-0,45	±15 до ±20
Odissey	4-5	$\approx 0,04$	±15 (-20 / +10)

[©] Климаш В.С., Константинов А.М., 2020

В соответствии с чем была определена цель исследования – разработка компактного и быстродействующего стабилизатора трёхфазного напряжения с улучшенными энергетическими показателями.

Задачами исследования являлись:

 Разработка схемных решений, обеспечивающих снижение массы и габаритов предлагаемого стабилизатора трёхфазного напряжения.

2. Проверка функционирования стабилизатора по предложенной схеме.

 Разработка быстродействующих алгоритмов управления стабилизатором.

4. Получение аналитических выражений для разработанных алгоритмов стабилизации напряжения на нагрузке.

5. Анализ регулировочных характеристик, а также характеристик гармонического влияния в процессе стабилизации напряжения.

6. Исследование пусковых, переходных и установившихся процессов на имитационной модели стабилизатора напряжения в программе MATLAB.

Методы

В соответствии с целью исследования был предложен стабилизатор трёхфазного напряжения нагрузки, однолинейная схема которого представлена на **рис. 1** [12].

На рис. 1 обозначены: С – энергосистема; ГТ – главный трансформатор подстанции; Н – нагрузка; PB – реверсивный трёхфазный мостовой выпрямитель; ИН – трёхфазный мостовой инвертор напряжения; ЗПЧ – звено повышенной частоты (представляющее собой трёхфазно-шестифазный высокочастотный трансформатор); НПЧ – непосредственный преобразователь частоты; Д1 – датчик отклонения напряжения сети; Д2 – датчик отклонения напряжения.

Подключение PB (**рис. 1**) осуществляется параллельно нагрузке подстанции, а НПЧ, который выполнен шестифазно-трёхфазным, в рассечку вторичных обмоток ГТ подстанции. Реверс напряжения на выходе PB необходим для перевода стабилизатора из режима вольтосложения (при пониженном напряжении на нагрузке) в режим вольтовычитания (при повышенном напряжении на нагрузке). Каждый из мостов PB выполнен на базе однооперационных тиристоров (SCR).

Стабилизатор (рис. 1) производит формирование добавочного напряжения вольтодобавки $U_{\rm д}$ для ГТ подстанции и продольное регулирование этого напряжения амплитудным способом – РВ по отклонению напряжения в сети или широтно-импульсным способом с помощью ИН по отклонению напряжения в нагрузке.



Рис. 1. Схема подключения стабилизатора напряжения на трансформаторной подстанции

Принцип действия трёхфазного стабилизатора заключается в следующем: переменное напряжение на нагрузке подается на вход PB, где происходит его преобразование в выпрямленное постоянное напряжение U_d . Среднее значение этого выпрямленного напряжения определяется по известной формуле:

$$U_{d} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_{2} \cos \alpha_{\scriptscriptstyle B}, \qquad (1)$$

где U₂ – действующее значение напряжения во вторичной обмотке главного трансформатора; α_в – угол регулирования трёхфазного реверсивного выпрямителя.

Далее выпрямленное напряжение поступает на промежуточный LC-фильтр (не показан на схеме **рис. 1**). После сглаживания напряжение подаётся на вход трёхфазного ИН, который выполнен по мостовой схеме на базе IGBT-транзисторов. В этом случае при интервале проводимости транзисторов, равном 180 эл. град., фазное напряжение на его выходе будет двухступенчатым с высотами ступеней $2U_d/3$ и $U_d/3$. Действующее значение линейного напряжения $U_{\mu n}$ на выходе ИН определяется в соответствии с выражением для двух случаев:

1) амплитудного регулирования PB ($\alpha_{u} = \alpha_{u.min} = const$):

$$U_{\rm HI} = \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot U_d; \tag{2}$$

2) широтно-импульсного регулирования ИН внутри периода коммутации (при этом действующее значение линейного напряжения зависит от угла управления инвертором $\alpha_{\mu} = var$):

$$U_{\mu\pi} = \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \frac{\sqrt{U_d^2 \left(\pi - 3\alpha_{\mu}N\right)}}{\sqrt{\pi}},\tag{3}$$

где *N* – число импульсов напряжения внутри периода коммутации транзисторов инвертора напряжения.

Преобразованное постоянное напряжение ИН в переменное подаётся на первичную обмотку трёхфазношестифазного высокочастотного трансформатора, вторичные обмотки которого выполняются на номинальное значение тока в цепи вторичных обмоток ГТ.

В ЗПЧ напряжение понижается до уровня добавочного напряжения U_{n} .

Первичные обмотки трёхфазно-шестифазного высокочастотного трансформатора могут быть соединены как в звезду, так и в треугольник, а вторичные обмотки могут быть соединены в шестифазную звезду, причем при наличии нулевого провода суммирование добавочного напряжения $U_{\rm A}$ и напряжения во вторичной обмотке главного трансформатора U_2 происходит в соответствии с выражением:

$$\begin{cases} U_{_{Ha}} = U_{_{2a}} + U_{_{\pi a}}; \\ U_{_{Hb}} = U_{_{2b}} + U_{_{\pi b}}; \\ U_{_{Hc}} = U_{_{2c}} + U_{_{\pi c}}, \end{cases}$$
(4)

где $U_{\rm Ha}$, $U_{\rm Hb}$, $U_{\rm Hc}$ – фазные значения напряжения на нагрузке; U_{2a} , U_{2b} , U_{2c} – фазные значения напряжения во вторичной обмотке главного трансформатора подстанции; $U_{\rm дa}$, $U_{\rm db}$, $U_{\rm dc}$ – фазные значения добавочного напряжения стабилизатора (на выходе НПЧ). Преобразованное в ЗПЧ пониженное напряжение подаётся в НПЧ с естественной коммутацией тиристоров, выполненный на базе SCR-тиристоров и представляющий собой шестифазно-трёхфазный преобразователь со средней точкой (может выполняться и на базе мостовых схем). НПЧ производит преобразование высокой частоты 450 Гц до частоты сети, равной 50 Гц.

Управление тиристорами НПЧ осуществляется с фиксированным углом управления $\alpha_{\text{нпч}} = \text{const} - \text{в вы-}$ прямительном режиме и управления $\beta_{\text{нпч}} = \pi - \alpha_{\text{нпч}} = \text{const} - \text{в инверторном режиме.}$

НПЧ выполнен с возможностью пофазного изменения углов управления тиристорами $\alpha_{\text{нпч}}$ и $\beta_{\text{нпч}}$, тем самым обеспечивая симметрирование напряжения на нагрузке в определенном диапазоне, в случае возникновения несимметрии напряжения по фазам.

Стабилизатор трёхфазного напряжения выполнен с улучшенными выходными характеристиками по отношению к стабилизатору с однофазным звеном повышенной частоты, при этом частота промежуточного преобразования в ЗПЧ принимается кратной частоте сети и числу фаз, поэтому работа НПЧ обеспечивает преобразование с частоты с числом пульсаций 12 за полупериод выходного напряжения 50 Гц, вместо 9 пульсаций с однофазным ЗПЧ [13].

Сочетание искусственной коммутации на IGBTтранзисторах в ИН и естественной коммутации в НПЧ на SCR-тиристорах повышает быстродействие стабилизатора и улучшает качество напряжения на нагрузке. К положительным свойствам стабилизатора по предлагаемой силовой схеме следует отнести встречнопараллельное включение SCR-тиристоров в каждой фазе вторичных шестифазных обмоток ЗПЧ, что приводит к снижению класса этих тиристоров по току.

Векторные диаграммы при стабилизации напряжения на нагрузке для фазы *a* при трёхфазной системе напряжений показаны на **рис. 2**.

Как видно из векторных диаграмм (**рис. 2**), регулирование напряжения производится без сдвига основной гармоники напряжения на нагрузке (продольное регулирование напряжения). Вектор добавочного несинусоидального напряжения $U_{\rm g}$ с требуемой амплитудой и фазой и частотой 50 Гц по его первой гармонике, полученный на выходе стабилизатора в случае повышенного напряжения в сети направлен в сторону, противоположную вектору напряжения на нагрузке, тем самым снижая до нуля возникшую $+\Delta U$. Аналогичным образом, но в противоположную сторону, происходит регулирование $U_{\rm g}$ для стабилизации напряжения на нагрузке до уровня номинального при возникновении $-\Delta U$.



Рис. 2. Векторная диаграмма при стабилизации напряжения на нагрузке

Результаты

Анализ регулировочных характеристик и гармонического влияния стабилизатора указанными способами производился на основании полученных аналитических выражений.

На **рис. 3** приведены поясняющие диаграммы для вывода аналитических выражений при амплитудном регулировании напряжения PB.

По диаграмме определяются пределы интегрирования и выражения при амплитудном регулировании РВ стабилизатора напряжения.

Аналитические выражения действующего значения напряжения на нагрузке для стабилизатора напряжения при амплитудном регулировании PB ($\alpha_{\rm B}$ = var, $\alpha_{\rm u}$ = const, $\alpha_{\rm нпч} = \alpha_{\rm нпч.min}$ ($\beta_{\rm нпч} = \beta_{\rm нпч.min}$), N = 36), полученные для схемы с нулевым проводом, представленные для процесса вольтосложения (вольтовычитания). Действующее значение фазного напряжения нагрузки $U_{\rm H}$ в общем случае определяется как среднеквадратичное по формуле:

$$U_{\mu} = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 3} \left(\frac{12 \cdot U_{\mu} U_{2m}}{\sin \beta} \left(\left(\sin \frac{2}{3} \beta (\cos \beta + 1) - 2\sin \frac{1}{3} \beta \right) + \left(2 + \cos \frac{1}{3} \beta - \cos \frac{2}{3} \beta \right) \right) + 2\pi \cdot \left(\frac{9}{2} U_{2m}^2 + 2U_{\mu}^2\right) \right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (6)$$

где $U_{\rm a}$ – величина добавочного напряжения; U_{2m} – амплитудное значение напряжения во вторичной обмотке ГТ; $\beta = \pi/N$ – число интервалов в течение полупериода напряжения в сети.

Действующее значение первой гармоники фазного напряжения на нагрузке для стабилизатора напряжения при амплитудном регулировании PB:

$$U_{\mu(1)} = \frac{\sqrt{2}}{6\pi\sin\beta} \left[2U_{\pi} \left(\sin\beta \left(\left(2 + \cos\frac{1}{3}\beta - \cos\frac{2}{3}\beta \right) + \left(\cos\frac{2}{3}\beta - \cos\frac{1}{3}\beta \right) \times \left(\cos\beta + 1 \right) \right) + 3\pi U_{2m} \sin\beta \right],$$
(7)

Действующее значение фазного напряжения высших гармоник на нагрузке определяется по формуле

$$U_{\rm H\Sigma} = \sqrt{U_{\rm H}^2 - U_{\rm H(1)}^2},$$
 (8)



Рис. 3. Поясняющая диаграмма при амплитудном регулировании PB

Среднее значение фазного напряжения на нагрузке для стабилизатора напряжения при амплитудном регулировании PB:

$$U_{\rm cp} = \frac{2}{9} \left(\frac{9}{\pi} U_{2m} + 2U_{\rm g} \right). \tag{9}$$

В формулах (6), (7) и (9) величина добавочного напряжения U_{μ} зависит от угла регулирования реверсивного выпрямителя $\alpha_{\rm B}$ и записывается в виде:

$$U_{\mu} = \frac{3\sqrt{6}/\pi}{k_{\tau}} U_{2\phi} \cos\alpha_{\rm B}, \qquad (10)$$

где $U_{2\phi}$ – величина фазного действующего напряжения во вторичной обмотке ГТ; $k_{\rm T}$ – коэффициент трансформации в ЗПЧ; $\alpha_{\rm B}$ – угол регулирования реверсивного выпрямителя.

Поясняющие диаграммы для определения пределов интегрирования и вывода аналитических выражений при широтно-импульсном регулировании напряжения на нагрузке ИН показаны на **рис. 4**.

Определение пределов интегрирования (**рис. 4**) выполняется аналогично, как и для амплитудного регулирования (**рис. 3**), но только при числе импульсов N = 72 в течение периода добавочного напряжения $U_{\rm A}$ и при учёте угла регулирования инвертора напряжения $\alpha_{\rm H}$.

Действующее значение фазного напряжения на нагрузке $U_{\rm H}$ для стабилизатора напряжения при ШИР ($\alpha_{\rm B}$ = const, $\alpha_{\rm H}$ = var, $\alpha_{\rm H\Pi 4}$ = $\alpha_{\rm H\Pi 4.min}$ ($\beta_{\rm H\Pi 4}$ = $\beta_{\rm H\Pi 4.min}$)) ИН запишется в виде

$$U_{\mu} = \left[\frac{1}{36\pi\sin\beta} \left(\sin\beta \left(\left(8U_{\mu}^{2} \left(\pi - 12\alpha_{\mu}\frac{\pi}{\beta} \right) + \right. \right. \right) + 18\pi U_{2m}^{2} \right) - 24U_{\mu}U_{2m} \cdot \left(\sin\alpha_{\mu} \times \left(2\left(1 + \sin\beta \left(\sin\frac{5}{6}\beta + \sin\frac{1}{6}\beta + \right. \right) + \left(\cos\frac{1}{6}\beta + \cos\beta \right) \right) \right) + \cos\beta \times \left(\cos\frac{5}{6}\beta - 2\cos\frac{1}{2}\beta \right) + \left(\cos\frac{5}{6}\beta + \right) \right) + \cos\beta \times \left(\cos\frac{5}{6}\beta - 2\cos\frac{1}{2}\beta \right) + \cos\frac{5}{6}\beta + \left(11 \right) + 2\cos\frac{1}{2}\beta \right) - \cos\alpha_{\mu} \left(\sin\beta \left(\cos\frac{2}{3}\beta - \right) - \cos\frac{1}{3}\beta - 2 \right) + \sin\frac{1}{3}\beta - \sin\frac{2}{3}\beta - \left(-\cos\beta \left(\sin\frac{2}{3}\beta + \sin\frac{1}{3}\beta \right) \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

где α_{u} – угол регулирования инвертора напряжения.



Рис. 4. Поясняющая диаграмма при широтно-импульсном регулировании ИН

Действующее значение первой гармоники фазного напряжения на нагрузке $U_{n(1)}$ для стабилизатора напряжения при ШИР ($\alpha_{B} = \text{const}, \alpha_{H} = \text{var}, \alpha_{H\Pi \Psi} = \alpha_{H\Pi \Psi.min}$ ($\beta_{H\Pi \Psi} = \beta_{H\Pi \Psi.min}$)) ИН запишется в виде:

$$U_{\mu(1)} = \frac{1}{6} \left[\frac{\sqrt{2}}{\pi(\cos\beta - 1)} \left(4U_{\mu}\sin\alpha_{\mu} \cdot (\sin\beta \times \left(1 + \cos\frac{5}{6}\beta + \cos\frac{1}{6}\beta + 2\cos\frac{1}{2}\beta + \frac{3}{2} \left(\cos\frac{2}{3}\beta + \cos\frac{1}{3}\beta\right) - \cos\beta \times \left(\sin\frac{5}{6}\beta - \frac{3}{2} \left(\sin\frac{2}{3}\beta + \sin\frac{1}{3}\beta\right) - \sin\frac{1}{6}\beta - 2\sin\frac{1}{2}\beta\right) + 2\sin\frac{1}{2}\beta + (12)$$
$$+\sin\frac{5}{6}\beta + \frac{3}{2} \left(\sin\frac{1}{3}\beta + \sin\frac{2}{3}\beta\right) + \sin\frac{1}{6}\beta + 4U_{\mu}\cos\alpha_{\mu} \left(\frac{1}{2}\sin\beta \times \left(\sin\frac{1}{3}\beta - \sin\frac{2}{3}\beta\right) + \cos\frac{1}{2}\beta \times \left(\sin\frac{1}{3}\beta - \sin\frac{2}{3}\beta\right) + \cos\frac{1}{2}\beta \times \left(2 + \cos\frac{1}{3}\beta + \cos\frac{2}{3}\beta\right) - \frac{1}{2} \left(\cos\frac{1}{3}\beta + \cos\frac{2}{3}\beta\right) - 1 + 3\pi \cdot U_{2m} (\cos\beta - 1) \right].$$

Действующее значение фазного напряжения высших гармоник на нагрузке при ШИР-регулировании определяется по формуле (8).

Среднее значение фазного напряжения на нагрузке для стабилизатора напряжения при ШИРрегулировании ИН:

$$U_{\rm cp} = \frac{-48U_{\rm g} \left(\alpha_{\rm u} N + 2\pi\right) + 9U_{2m}}{9\pi}.$$
 (13)

Оценка регулировочных свойств стабилизатора производится через степень регулирования фазного напряжения на нагрузке $\varepsilon_{\rm H}$, выраженную в относи-

тельных единицах, которая представляется в следующем виде [14]:

$$\varepsilon_{_{\rm H}} = \frac{U_{_{\rm H}}}{U_{_{\rm c}}},\tag{14}$$

где $U_{\rm c}$ – номинальное напряжение во вторичной обмотке ГТ.

Тогда с учётом полученных аналитических выражений (6), (7), (8) и (10) выполнялось построение регулировочных характеристик при амплитудном регулировании РВ при различных коэффициентах трансформации трёхфазно-шестифазного высокочастотного трансформатора $k_{\rm T} = 8$, 10, 12, 14, а по формулам (10), (11) и (12) – построение регулировочных характеристик при широтно-импульсном регулировании ИН при тех же коэффициентах трансформации $k_{\rm T}$, что и для амплитудного способа регулирования. При этом регулировочные характеристики при амплитудном способе показаны при относительной степени регулирования $\varepsilon_{\rm H} = f(\alpha_{\rm B})$ на **рис. 5**, а для ШИР способа $\varepsilon_{\rm H} = f(\alpha_{\rm H})$ на **рис. 6**.



гис. 5. гегулировочные характеристики стаоилизатора при амплитудном регулировании PB



Рис. 6. Регулировочные характеристики стабилизатора при широтно-импульсном регулировании ИН

Регулировочные характеристики получены для режима вольтосложения в процессе стабилизации напряжения на нагрузке при изменении угла регулирования $\alpha_{\rm B}$ от 0 до 90 эл. град, а также для режима вольтовычитания при изменении угла регулирования $\alpha_{\rm B}$ от 90 до 180 эл. град.

Идентично, как и для **рис. 5**, изменение угла регулирования α_{μ} (**рис. 6**) на интервале от 0 эл. град. до 1,25 эл. град. приводило к изменению величины степени регулирования в режиме вольтосложения, а изменение угла α_{μ} от 1,25 до 2,25 эл. град – к изменению степени регулирования для режима вольтовычитания.

Как видно из полученных регулировочных характеристик (**рис. 5**, 6) широтно-импульсное регулирование по характеру изменения стабилизируемого напряжения на нагрузке обладает большей линейностью, что имеет значение в случае стабилизации напряжения при резкопеременной нагрузке для наиболее быстрого устранения отклонения напряжения. В то же время регулировочные характеристики при амплитудном регулировании обладают некоторой нелинейностью, что может быть скомпенсировано в условиях при относительно невысокой скорости изменения напряжения в сети.

Анализ гармонического влияния в процессе стабилизации напряжения производился в соответствии с коэффициентом несинусоидальности напряжения на нагрузке:

$$K_U = \frac{U_{\text{H}\Sigma}}{U_{\text{H}1}}.$$
(15)

Полученные характеристики по формуле (15) при амплитудном регулировании РВ представлены на **рис.** 7 и при широтно-импульсном регулировании ИН на **рис.** 8.

Как видно из полученных характеристик (**рис. 7, 8**), коэффициент несинусоидальности напряжения на нагрузке K_U для случая амплитудного и широтноимпульсного регулирования не превысил 8% при коэффициенте трансформации трёхфазно-шестифазного высокочастотного трансформатора $k_{\rm T} = 8$, что не превышает значений для уровня напряжения 0,4 кВ, установленных в действующем ГОСТ 32144-2013 [15].



Рис. 7. Зависимости коэффициента несинусоидальности напряжения на нагрузке при амплитудном регулировании РВ



Рис. 8. Зависимости коэффициента несинусоидальности напряжения на нагрузке при широтно-импульсном регулировании ИН

Проверка предложенных схемных решений и способов автоматического управления стабилизатора напряжения производилась в программной среде компьютерного моделирования MATLAB (R2018b) в подпрограмме Simulink, где была разработана имитационная модель трансформаторной подстанции напряжением 10/0,4 кВ мощностью 1000 кВА. Модель включала ряд силовых и измерительных элементов из библиотеки SimPowerSystems.

В ходе моделирования производилась проверка предложенных принципов функционирования стабилизатора при его подключении в рассечку вторичных обмоток ГТ подстанции с анализом пусковых и переходных процессов. На модели также исследовались и установившиеся режимы работы подстанции со стабилизатором в условиях изменения напряжения (появлении отклонений от номинального уровня в положительную и отрицательную сторону) в сети и на нагрузке, при которых стабилизатор в имитационной модели функционировал в режимах вольтосложения или переводился в режим работы с вольтовычитанием.

Временные диаграммы в процессе стабилизации при регулировании методом ШИР при пониженном напряжении - $\Delta U = 10\%$, $\phi_{\rm H} = 30$ эл. град, $\alpha_{\rm B} = 30$ эл. град, $\alpha_{\rm HI} = 0.45$ эл. град (N = 72), $k_{\rm T} = 10$, $\alpha_{\rm HIII} = 7$ эл. град ($\beta_{\rm HIIII} = 173$ эл. град.) приведены на **рис. 9**.

В ходе моделирования контролировались параметры действующих значений (RMS) сигналов и осциллограммы мгновенных значений сигналов токов и напряжений с помощью виртуального осциллографа (Scope) (рис. 9): напряжения на нагрузке *u*_н, в первичной обмотке u_1 и во вторичной обмотке u_2 ГТ, токов в первичной обмотке (сети) i_1 и во вторичной обмотке i_2 ГТ, напряжение $u_{\rm H}$ и ток $i_{\rm H}$ в нагрузке, напряжение $u_{\rm B1}$ и ток $i_{\rm B1}$ на входе PB, напряжение u_d и ток i_d на выходе PB, напряжение u_{u1} и ток i_{u1} на входе ИН, напряжение u_{u2} и ток i_{u2} на выходе ИН, напряжение $u_{\rm HII q1}$ и ток $i_{\rm HII q1}$ на входе НПЧ, напряжение $u_{\rm HПЧ2}$ (добавочное напряжения $u_{\rm d}$) и ток $i_{\text{нпч2}}$ на выходе НПЧ, токи намагничивания $i_{0\text{гг}}$ главного и высокочастотного і_{овт} трансформаторов. Из временных диаграмм на рис. 9 видно, что напряжение на нагрузке $u_{\rm H}$ стабилизируется до уровня номинального напряжения во вторичной обмотке ГТ подстанции.



Заключение

1) Имитационно-математическое моделирование показало правильность принципов функционирования предложенного стабилизатора напряжения.

2) Преимуществом данного стабилизатора является отсутствие преобразовательного трансформатора (выполненного для рабочей частоты 50 Гц) на входе реверсивного выпрямителя, а также применение высокой частоты промежуточного преобразования (450 Гц) и схемы подключения стабилизатора главному трансформатору подстанции, что способствует снижению массы и габаритов электромагнитных частей и всего стабилизатора.

3) Расчеты показали, что мощность стабилизатора составляет около 25 % (около 250 кВА) от мощности подстанции 1000 кВА то есть удельная мощность Руд предложенного стабилизатора напряжения составит не более 3-3,5 кВА/кг.

4) Исследования на имитационно-математической модели показали, что быстродействие стабилизатора составило при амплитудном регулировании не более 0,019 с, а при регулировании методом ШИР – не более 0,012 с.

5) Коэффициент несинусоидальности напряжения на нагрузке при регулировании, как при амплитудном, так и при методе ШИР, не более 8%.

6) Стабилизатор повышает КПД нагрузки в условиях как симметричного отклонения напряжения по фазам, так и несимметричного отклонения при пусках, в переходных и установившихся режимах.

Список литературы

- ГОСТ Р 58408-2019. Сети электрические собственных нужд и оперативного тока железнодорожных тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения. Технические требования, правила проектирования, методы электрических расчетов. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 мая 2019 г. №194-ст. М.: Стандартинформ, 2019. 64 с.
- СТО 70238424.29.240.10.009-2011. Распределительные электрические сети. Подстанции 6-20/0,4 кВ. Условия создания. Нормы и требования. Утвержден и введен в действие приказом НП «ИНВЭЛ» от 02.06.2011 № 54. М.: Некоммерческое Партнерство «Инновации в электроэнергетике», 2011. 23 с.
- СТО 34.01-3.2-010-2017. Устройства регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой (РПН). Общие требования. Утвержден и введен в действие распоряжением ПАО «Россети» от 28.02.2017. М.: ПАО «Россети», 2017. 22 с.
- Haibin Zhou1, Xiaojiang Yan, and Guanwei Liu. A review on voltage control using on-load voltage transformer for the power grid. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, Sci. 252 032144, pp. 1-10 (doi:10.1088/1755-1315/252/3/032144).
- СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения. М.: Изд-во НЦ ЭНАС. 2007. 131 с.
- 6. Controlling power system parameters through reactive power (VAr) compensation. [Electronic resource]. Access mode: https://electrical-engineering-portal.com/reactive-power-var-compensation, free. (date of request: 24.03.2020).
- 7. Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы:

учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2005. 199 с.

- Стабилизаторы напряжения. Руководство по эксплуатации СТС-5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://td-elmash.ru/produkciya/stabilizatoryi-napryazheniya, свободный (дата обращения: 24.03.2020).
- Зинин Ю., Смирнов Ю., Яковлев В. Разработка программируемого блока управления мощными трёхфазными стабилизаторами напряжения типа СТС // Силовая электроника. 2013. №1. С. 78-83.
- Киреева Э.А. Новая серия промышленных трехфазных стабилизаторов напряжения СТС-5 // Промышленная энергетика. 2009. №12. С. 51-52.
- Digital voltage stabilisers (DVS) Ortea (Odyssey). [Electronic resource]. Access mode: https://www.ortea.it/en/categorie_prodotti/digital-voltagestabilisers/, free. (date of request: 24.03.2020).
- Пат. 2071633 Российская Федерация, МПК МПК Н 02 М 5/45, G 05 F 1/30. Стабилизатор напряжения трансформаторной подстанции со звеном повышенной частоты / Климаш В.С., Андриенко П.Д.; заявитель «Комсомольский-на-Амуре политехнический институт». № 93 93039673; заявл. 02.08.93; опубл. 10.01.97.
- Климаш В.С., Константинов А.М. Математическое моделирование трёхфазного компенсатора отклонений напряжения и реактивной мощности с однофазным звеном повышенной частоты // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2008. №1. С. 20-23.
- Климаш В.С. Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием: монография. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 58-59.
- 15. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: принят Межгосударственным советом по стандартизации, методологии и сертификации (протоколом №55-П от 25 марта 2013 г.). М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

Поступила в редакцию 31 марта 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

THREE-PHASE VOLTAGE STABILIZER FOR 10/0.4 KV TRANSFORMER SUBSTATIONS AND ANALYSIS OF ITS CONTROL METHODS

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: klimash@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8150-5013

Andrey M. Konstantinov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: kamfes@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2342-1142

The problem of improving the quality of voltage for threephase electricity consumers when they are powered from transformer substations, including complete transformer substations, with a voltage of 10/0.4 kV is considered and a comparative analysis of existing three-phase voltage stabilization devices is performed. Their main disadvantages are revealed. A variant of the power circuit without an input converter transformer and the connection of a three-phase voltage stabilizer to the secondary winding of the main transformer of the substation is proposed, which allows minimizing its massdimensional parameters. The stabilizer is a low-power blockmodular thyristor-transistor channel containing a high-frequency link that provides the formation and regulation of the voltage of the voltage booster for the load together with the voltage of the main transformer of the substation. A step-down transformer operating at a frequency of 450 Hz is used as a link of increased frequency. The paper provides a brief description of the scheme and principle of operation of the proposed three-phase voltage stabilizer as well as ways to control it. The construction of the adjustment characteristics and the harmonic analysis of the load voltage for these control methods are performed. Analytical relations are obtained for the current voltage on the load during stabilization, its first harmonic and average value, respectively, when the amplitude is regulated by a reverse rectifier and pulsewidth regulation by a voltage inverter. Simulation of the device operation in various operating modes, namely, at low voltage in the network and at load, and at high voltage in the network and at load, was performed. Some results of simulation modeling in the Matlab/Simulink software environment are presented. Conclusions on the work are made.

Keywords: stabilizer, high frequency link, complete transformer substation, reverse rectifier, voltage inverter, direct frequency converter, main transformer substation, amplitude control method, pulse width control method, voltage quality, electricity consumers, simulation, MATLAB/Simulink.

References

- GOST R 58408-2019. Auxiliary electric networks for railway traction substations, transformer substations and power supply linear devices. Technical requirements, design rules, electric calculation methods. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 64 p. (In Russian)
- STO 70238424.29.240.10.009-2011. The electrical distribution system. Substations 6-20/0,4 kV. The conditions of the building. Norms and requirements. Moscow, Non-profit Partnership - Innovations in electric power engineering Publ., 2011. 23 p. (In Russian)
- STO 34.01-3.2-010-2017. Devices On-load tap-changer (OLTC). General requirements. Moscow, Rosseti Publ., 2017. 22 p. (In Russian)
- Haibin Zhou1, Xiaojiang Yan, and Guanwei Liu. A review on voltage control using on-load voltage transformer for the power grid. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, Sci. 252 032144, pp. 1-10 (doi:10.1088/1755-1315/252/3/032144).
- STO 56947007-29.240.30.010-2008. Schematic diagrams of electrical switchgears of 35-750 kV substations. Typical solutions. Moscow, ENAS Publ., 2007. 131 p. (In Russian).
- Controlling power system parameters through reactive power (VAr) compensation. [Electronic resource]. – Access mode: https://electrical-engineering-portal.com/reactive-power-varcompensation, free. – (accessed 24 March 2020).
- 7. Aleksandrov G.N., Lunin V.P. Upravlyaemye reaktory [Con-

Климаш В.С., Константинов А.М. Стабилизатор трёхфазного напряжения для трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ и анализ способов его управления // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 33-40. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-33-40 trolled reactor]. St. Petersburg, Energy training center Publ., 2005. 199 p. (In Russian)

- Voltage stabilisers. User manual STS-5. [Electronic resource]. Access mode: http://tdelmash.ru/produkciya/stabilizatoryi-napryazheniya, free (accessed 24 March 2020). (In Russian)
- Zinin Yu., Smirnov Yu., Yakovlev V. Development of programmable control unit of powerful three-phase voltage stabilizers of STS type. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2013, no. 1, pp. 78-83. (In Russian)
- Kireeva E.A. New series of industrial three-phase voltage stabilizers STS-5. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power]. 2009, no. 12, pp. 51-52. (In Russian)
- Digital voltage stabilisers (DVS) Ortea (Odyssey). [Electronic resource]. Access mode: https://www.ortea.it/en/categorie_prodotti/digital-voltagestabilisers/, free (accessed 24 March 2020).
- 12. Klimash V.S., Andrienko P.D. *Stabilizator napryazheniya transformatornoy podstantsii so zvenom povyshennoy chastoty* [Voltage stabilizer of a transformer substation with a link of the raised part]. Patent RF, no. 2071633, 1997.
- Klimash V.S., Konstantinov A.M. Mathematical simulation of three-phase compensator of voltage and reactive power deviations with single-phase link of increased frequency. Elektro. *Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost* [Electro. Electrical engineering, electric power engineering, electrical engineering industry]. 2008, no. 1, pp. 20-23. (In Russian)
- Klimash V.S. Voltodobavochnye ustroystva dlya kompensatsii otkloneniy napryazheniya i reaktivnoy energii s amplitudnym, impulsnym i fazovym regulirovaniem [Voltage Booster Aimed at Compensation of Voltage Fluctuations and Reactive Energy Fluctuations with Amplitude, Pulse and Phase Control]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002, pp. 58-59. (In Russian)
- 15. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. (In Russian).

Klimash V.S., Konstantinov A.M. Three-Phase Voltage Stabilizer for 10/0.4 kV Transformer Substations and Analysis of its Control Methods. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 33-40. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-33-40