

УДК 621.311

Голованов Игорь Григорьевич,
к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: golovanov_ig@mail.ru
Алексеева Алёна Алексеевна,
обучающийся группы ЭЭ-19-1,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: Leksi2014@yandex.ru
Проскуряков Владимир Валерьевич,
обучающийся группы ЭЭ-19-1,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: LaryPIAY@yandex.ru
Самчук Роман Максимович,
обучающийся группы ЭЭ-19-1,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: rark_rrrrr@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА НЕФТЕХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Golovanov I. G., Alekseeva A. A., Proskuryakov V. V., Samchuk R. M.

MODERN METHODS OF REACTIVE POWER COMPENSATION IN PETROCHEMICAL PRODUCTION

Аннотация. Рассмотрены электрические схемы компенсации реактивной мощности на базе тиристорных схем управления в системе электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий. Сформулированы основные достоинства, преимущества перед традиционными системами компенсации реактивной мощности и направления внедрения в систему электроснабжения современного производства.

Ключевые слова: реактивная мощность, система электроснабжения, компенсация реактивной мощности, надёжность электроснабжения.

Abstract. Electrical circuits of reactive power compensation on the basis of thyristor control circuits in the power supply system of oil refineries are considered. The main advantages, advantages over traditional reactive power compensation systems and directions of introduction into the power supply system of modern production are formulated.

Keywords: reactive power, power supply system, reactive power compensation, reliability of power supply.

Быстрые изменения напряжения происходят под воздействием быстро изменяющейся нагрузки сети.

Источниками быстрых изменений напряжения являются мощные электроприёмники с импульсным, резкопеременным характером потребления активной и реактивной мощностей:

- электросварочные машины;
- электродвигатели при пуске;
- машины контактной сварки;
- синхронные двигатели;
- приводы насосов и компрессоров.

Изменения напряжения, усугублённые резкопеременным характером, ещё более снижают эффективность работы и срок

службы оборудования, вызывают брак продукции, способствуют отключению автоматических систем управления и повреждению оборудования.

Так, например, изменения амплитуды и, в большей мере фазы напряжения вызывают вибрации электродвигателей, приводных механизмов и систем. Это ведёт к снижению срока их службы, а при размахах изменений напряжения более 15 % могут отключаться магнитные пускатели и реле.

Не менее опасна вызываемая быстрыми изменениями напряжения пульсация светового потока ламп освещения. Её восприятие человеком – фликер – утомляет, снижает производительность труда и, в ко-

нечном счёте, влияет на здоровье людей. Доза фликера – мера восприятия человеком пульсаций светового потока. Наиболее раздражающее действие фликера проявляется при частоте колебаний 8,8 Гц и размахах изменения напряжения $\delta U_i = 29\%$ [1].

Мероприятия по снижению быстрых изменений напряжения:

- применение оборудования с улучшенными характеристиками (с уменьшенным потреблением реактивной мощности).

- применение электродвигателей со сниженным пусковым током и улучшенным коэффициентом мощности ($\cos \varphi$). Или применение частотного регулирования электроприводов, а также устройств плавного пуска-останова двигателя.

- подключение к мощной системе электроснабжения (увеличение мощности короткого замыкания).

- применение быстродействующих источников реактивной мощности.

Основной нагрузкой в электросетях нефтеперерабатывающей промышленности являются асинхронные электродвигатели и распределительные трансформаторы. Эта индуктивная нагрузка в процессе работы является источником реактивной электроэнергии (реактивной мощности), которая совершает колебательные движения между нагрузкой и источником (генератором), не связана с выполнением полезной работы, а расходуется на создание электромагнитных полей и создает дополнительную нагрузку на силовые линии питания. Реактивная мощность характеризуется задержкой (в индуктивных элементах ток по фазе отстает от напряжения) между синусоидами фаз напряжения и тока сети. Показателем потребления реактивной мощности является коэффициент мощности, численно равный косинусу угла φ между током и напряжением и отношению активной мощности (P) к полной (S): $\cos(\varphi) = P/S$. Этим коэффициентом принято характеризовать уровень реактивной мощности двигателей, генераторов и сети предприятия в целом. Чем ближе значение $\cos(\varphi)$ к единице, тем меньше доля взятой из сети реактивной мощности. Основные потребители реактивной мощности [1]:

- асинхронные электродвигатели, которые потребляют 40 % всей мощности совместно с бытовыми и собственными нуждами;

- электрические печи, потребляют 8 %;

- полупроводниковые преобразователи, потребляют 10 %;

- трансформаторы всех ступеней трансформации, потребляют 35 %;

- линии электропередач, потребляют 7 %.

Реактивная мощность и энергия ухудшают показатели работы энергосистемы, что выражается следующими моментами:

- загрузка реактивными токами генераторов электростанций увеличивает расход топлива;

- снижается пропускная способность распределительной сети;

- увеличиваются потери в подводящих сетях и приёмниках;

- увеличивается падение напряжения в сетях.

Реактивный ток дополнительно нагружает линии электропередачи, что приводит к увеличению сечений проводов и кабелей и соответственно к увеличению капитальных затрат на внешние и внутренние сети.

По оценкам отечественных и зарубежных специалистов [2-4], доля энергоресурсов, и в частности электроэнергии, занимает величину порядка от 30 до 40 % в стоимости продукции.

Компенсация реактивной мощности применяется [1]:

- для обеспечения баланса реактивной мощности;

- для снижения потерь электрической энергии в сети;

- для регулирования напряжения.

Во всех случаях при применении компенсирующих устройств необходимо учитывать ограничения по следующим техническим и режимным требованиям:

- необходимому резерву мощности в узлах нагрузки;

- располагаемой реактивной мощности на шинах её источника;

- отклонениям напряжения;

- пропускной способности электрических сетей.

Для уменьшения перетоков реактивной мощности по линиям и трансформаторам источники реактивной мощности должны размещаться вблизи мест её потребления. При этом передающие элементы

сети разгружаются по реактивной мощности, чем достигается снижение потерь активной мощности и напряжения. Эффект установки компенсирующих устройств в конце линии представлен на рисунке 1 [1], где приведены схемы замещения и векторные диаграммы токов и мощностей. Без применения компенсирующих устройств в линии протекает ток и мощность нагрузки (рисунок 1, а):

$$I_H = I_H' - I_H'', \quad S_H = P_H + jQ_H.$$

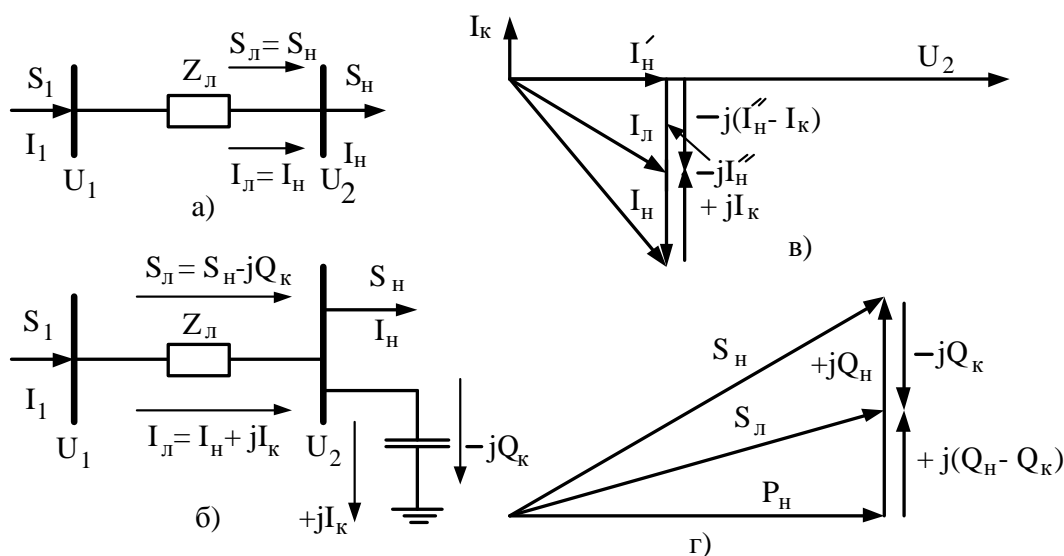


Рисунок 1 – Применение компенсирующих устройств: а, б – токи и потоки мощности до и после компенсации; в – векторная диаграмма токов; г – треугольник мощностей

Таким образом, вследствие применения компенсирующих устройств на подстанции при неизменной мощности нагрузки реактивные мощности и ток в линии уменьшаются – линия разгружается по реактивной мощности. При этом в линии уменьшаются потери мощности и потери напряжения, что подтверждают аналитические выражения:

$$\Delta P_L = \frac{P_H^2 + (Q_H - Q_K)^2}{U_{ном}^2} R_L,$$

$$\Delta U_L = \frac{P_{H'L} + (Q_H - Q_K)X_L}{U_{ном}}.$$

Все устройства для компенсации реактивной мощности можно условно разделить на синхронные и статические, в которых соответственно используются компоненты с движущимися и неподвижными (статическими) элементами.

К традиционным устройствам компенсации реактивной мощности относят [2]:

При установке компенсирующих устройств реактивный ток и реактивная мощность в линии уменьшаются на величину реактивного тока и реактивной мощности, генерируемых в компенсирующем устройстве I_K и Q_K . В линии будут протекать меньшие по модулю ток и мощность, соответственно равные (рисунок 1, б) :

$$I_H = I_H' - j(I_H'' - I_K), \quad S_H = P_H + j(Q_H - Q_K).$$

– косинусные конденсаторы, блоки и батареи, интегрируемые в шкафы компенсации и используемые в способах индивидуальной и групповой компенсации реактивной мощности;

– нерегулируемые установки коррекции коэффициента мощности, используемые для «срезания» фонового потребления реактивной энергии;

– релейные (контакторные) многоступенчатые установки компенсации реактивной мощности с ручным или автоматическим переключением, ограниченные по применению для сетей со скачкообразным и быстрым изменением реактивной нагрузки из-за значительных рисков перекомпенсации, скачков и провалов напряжения;

– автоматические установки компенсации реактивной мощности с тиристорным (полупроводниковым) управлением типа TSC (Thyristor Switched Capacitor) и бинар-

ными тиристорно-диодными переключателями (рисунок 2) [2].

Переключаемые тиристорные установки компенсации реактивной мощности типа TSC – это статические конденсаторные установки с различным числом ступеней, управляемые тиристорными переключателями, обеспечивающими быстрое подключение или отключение ступеней в момент равенства напряжений на конденсаторных блоках и в сети. Впервые статические установки компенсации реактивной мощности типа TSC были использованы электротехнической компанией ASEA в 1971 году [3], имели среднюю задержку переключения от половины до цикла колебаний по току/напряжению, по факту не генерировали гармоник и отличались простотой конструктивных решений. Оптимальные методы компенсации реактивной мощности «индивидуальны» для каждой определенной потребительской сети, могут и должны определяться профильной компанией и исключительно на базе энергоаудита и всестороннего анализа текущих и перспективных нагрузок с учётом дефицита или профицита реактивной мощности распределительной сети электросетевой компании и финансовых возможностей предприятия.

Тиристорные установки компенсации реактивной мощности отличаются быстрым переключением ступеней, практически отсутствием генерации токов гармоник, а в установках с бинарными тиристорно-диодными переключателями (рисунок 2, б) нивелированы импульсные токи во время переключения, хотя время переходного процесса больше, чем у установок TSC (рисунок 2, а). Отчасти недостатки финансовой доступности установок типа TSC были устранены применением тиристорно-диодных схем, к тому же выгодно отличающихся почти полным отсутствием импульсных токов при переключении, однако имеющих запаздывание включения/отключения ступени не менее одного цикла в сравнении половиной цикла у установок TSC. Вместе с тем, устройства типа TSC остались ступенчатыми, а значит дискретными по потокам генерируемой мощности, а каждая батарея конденсаторов оборудовалась своим тиристорным переключателем, что делало установку материалоемкой и финансово затратной.

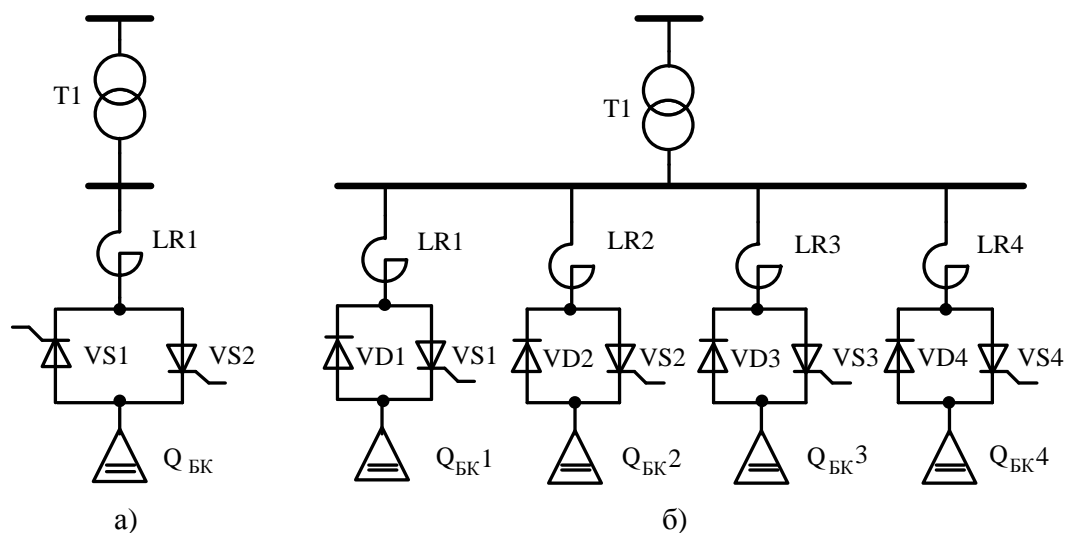


Рисунок 2 – Автоматические установки компенсации реактивной мощности с тиристорными (а) и бинарными тиристорно-диодными переключателями (б)

Управляемые тиристорами реакторы (тип TCR) (рисунок 3 [2]), как правило, имеют батареи статических конденсаторов, фильтры гармоник низшего порядка и управляемую тиристорами индуктивность (собственно реактор), интегрируемую в ка-

ждую фазу питающей сети. Управляемая тиристорами индуктивность используется для демпфирования избытка реактивной мощности, генерируемой конденсаторами, что исключает риски перенапряжения.

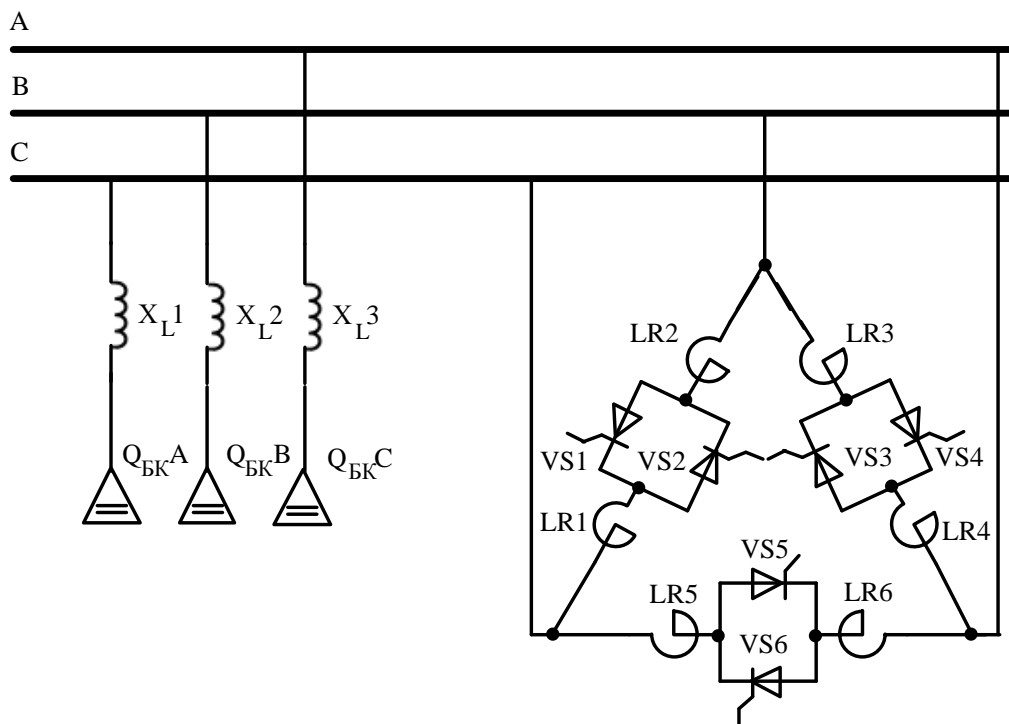


Рисунок 3 – Управляемые тиристорами реакторы по трёхимпульсной топологии

Установки компенсации реактивной мощности с реакторами и конденсаторными блоками – это дорогие управляемые тиристорные генераторы, построенные по трех, шести и более импульсной топологии. В то же время тиристорное управление, как конденсаторными блоками, так и индуктивностью позволяет формировать батареями TSC-TCR, TCR (рисунок 4 [2]), управляемыми тиристорными ключами – мощности с динамическим (плавным) регулированием индуктивного элемента (реактора) и нерегулируемой (TCR) или регулируемой (TSC-TCR) части – блока конденсаторных батарей (или фильтров высших гармоник). Индуктивность (реактор) в топологии устройства используется для демпфирования излишков генерируемой конденсаторами реактивной мощности, попадающих в сеть при переключении ступеней конденсаторных батарей. Регулируемые с применением управляемых вентилей конденсаторные батареи (TSC-TCR) в определенной степени решают проблему дискретности по генерации реактивной мощности. По факту управляемые тиристорами реакторы (TCR) и комбинированные установки TSC-TCR – статические компенсирующие установки

косвенной компенсации с применением управляемых вентилей (тиристоров). Нивелирование перепадов сетевого напряжения достигается за счёт потребления генерируемой конденсаторами реактивной мощности управляемым реактором тогда, когда она не востребована нелинейной нагрузкой (и наоборот), причём регулирование и быстроедействие устройства должно обеспечивать баланс наброса и сброса реактивной мощности в соответствии с потребностью нагрузки.

Статические источники реактивной мощности (STATCOM) предназначены для плавной (регулируемой) генерации или потребления реактивной мощности, что достигается в STATCOM использованием нерегулируемой батареи конденсаторов и включенного последовательно или параллельно с ней регулируемого реактора (рисунок 5[4]). Применение STATCOM впервые было предложено советскими учёными. Это преобразователи на полупроводниковых управляющих схемах (IGBT и IGCT) с регуляторами потока UPFC и динамическими восстановителями напряжения DVR для регулирования потоков реактивной мощности.

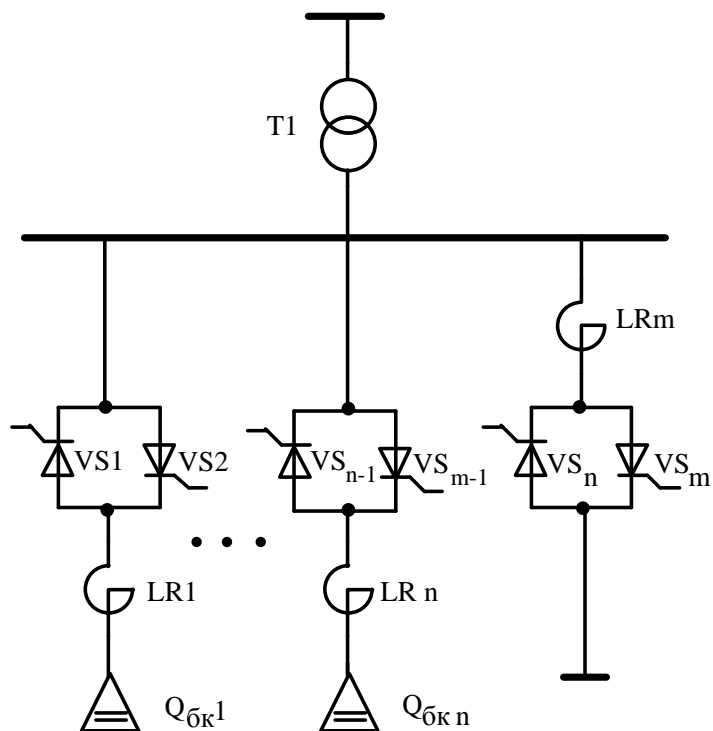


Рисунок 4 – Комбинированные установки компенсации реактивной мощности с реакторами и конденсаторными батареями TSC-TCR

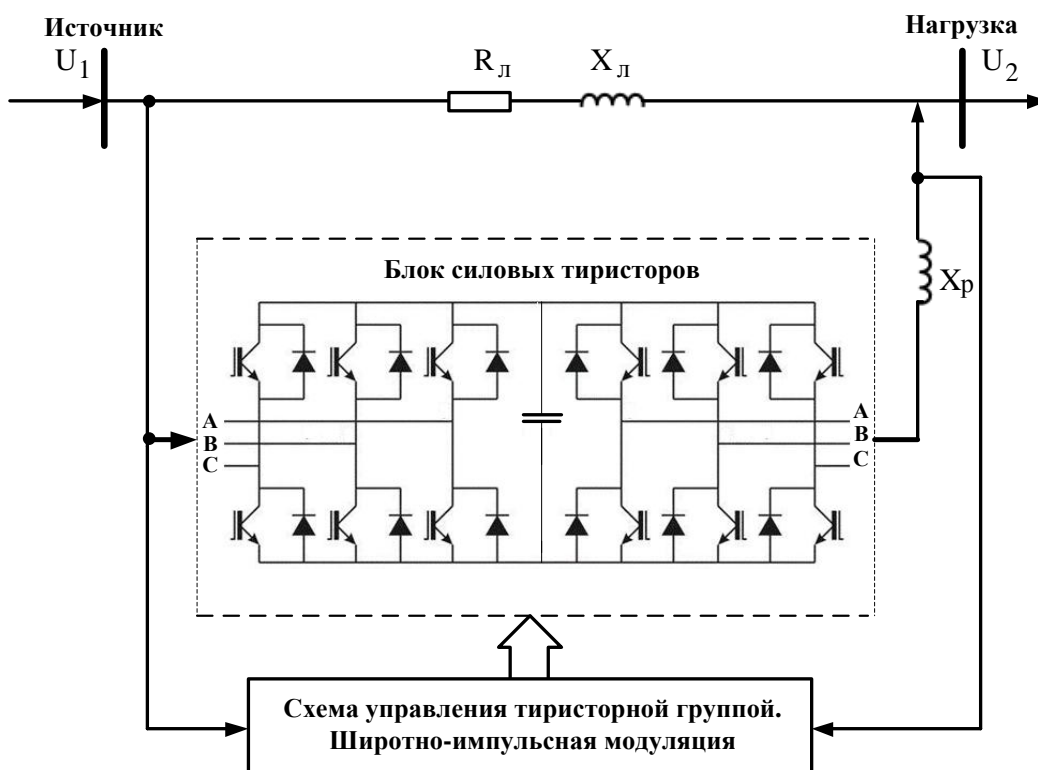


Рисунок 5 – Структурная схема статического синхронного компенсатора STATCOM

Схемы STATCOM весьма разнообразны и позволяют вырабатывать или потреблять реактивную мощность с токами индук-

тивного или ёмкостного характера [5].

В последние годы широко начали применяться STATCOM на базе использова-

ния ёмкости р-п перехода полупроводниковых элементов (рисунок 5).

Управление мощностью реакторов осуществляется либо с помощью встречно-параллельно соединённых управляемых тиристорных преобразователей, либо путём изменения подмагничивания реактора.

Статические синхронные компенсаторы (STATCOM) являются частью семейства продуктов гибких систем передачи переменного тока (FACTS) и построены на современной технологии силовой электроники IGBT. STATCOM используются для обеспечения компенсации реактивной мощности в режиме реального времени и активной фильтрации высших гармоник в сложных случаях применения. Они минимизируют колебания напряжения и снижают фликер, вызванный резкопеременной нагрузкой.

Передающие и распределительные сети часто сталкиваются с быстрыми изменениями реактивной мощности в результате часто или постоянно меняющихся нагрузок. Это приводит к значительным колебаниям напряжения и может даже вызывать полный коллапс напряжения при определенных тяжёлых условиях. STATCOM является отличным масштабируемым решением для стаби-

лизации напряжения сети и быстрой компенсации реактивной мощности при различных условиях нагружения. Функциональные испытания системы STATCOM на подстанции 35 кВ с номинальной мощностью 100 Мвар, дали следующие результаты [6, 7]:

- время задержки на ступенчатое изменение уставки не превышает 0,04 с;
- полное восстановление работы STATCOM происходит через 0,26 с после пробоя любого моста;
- суммарный уровень высших гармоник до 50 порядка в выходном токе составил около 1,2 %;
- суммарные потери не превысили 1,05 % от полной реактивной мощности установки.

Стоимость STATCOM имеет тенденцию к снижению с увеличением мощности устройства. Есть основания считать, что совершенствование тиристорных, составляющих значительную часть стоимости STATCOM, в ближайшее время приведет к улучшению их технико-экономических показателей. При этом применение статических STATCOM может оказаться более целесообразным, чем установка синхронных компенсаторов на базе синхронного электродвигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

2. Современные методы компенсации реактивной мощности с помощью традиционных и новых устройств. [Электронный ресурс] // <https://www.mircond.com/blog/sovremennye-metody-kompensatsii-reaktivnoy-moshchnosti/>

3. Продольная компенсация реактивной мощности – физический смысл и техническая реализация. [Электронный ресурс] // <https://oovvna.ru/prodolnaa-kompensacia-reaktivnoy-moshnosti-fiziceskij-smysl-i-tehniceskaa-realizacia/>

4. Структурные схемы регуляторов напряжения [Электронный ресурс] // Электроснабжение и электротехника. Статические

источники реактивной мощности. Управление возбуждением регуляторов напряжения. <https://switch-case.ru/72173311>

5. Зуев Э.Н. Технико-экономические основы проектирования электрических сетей / Э.Н. Зуев. – М.: МЭИ, 1988. – 71 с.

6. STATCOM. Статический компенсатор реактивной мощности принцип работы. Статический тиристорный компенсатор реактивной мощности. Необходимость компенсации реактивной мощности. [Электронный ресурс] // <https://erfa.ru/statkom-staticheskii-kompensator-reaktivnoi-moshchnosti-princip-raboty-staticheskii-tiristornyi-kompensa.html>

7. Веников В.А., Идельчик В.И., Лисев М.С. Регулирование напряжения в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 265 с.