

УДК 621.314
DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-23-27

С. В. ВЛАСЬЕВСКИЙ
С. В. КЛИМАШ

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения,
г. Хабаровск

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ПОДКЛЮЧЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ НА ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

В разработанной системе для разгрузки электрической сети от реактивной мощности, содержащей конденсаторы и регулируемую часть на основе вольтодобавочного трансформатора и транзисторного преобразователя, исследованы динамические режимы при включении и отключении конденсаторов. Предложено рассматриваемую систему дополнить электронно-электрическим аппаратом, позволяющим с высоким быстродействием, без бросков тока и без влияния на напряжение потребителей производить подключения и отключения конденсаторов.

Ключевые слова: конденсаторы, вольтодобавочное устройство, компенсация реактивной мощности, электронно-электрический аппарат, трансформаторная подстанция, имитационное моделирование.

Конденсаторные установки применяют в компенсаторах реактивной мощности (КРМ), которые наиболее эффективны при подключении их вблизи потребителей. Различают прямую и косвенную компенсацию реактивной мощности [1].

При прямой компенсации производят дискретное переключение конденсаторов для генерации необходимой реактивной мощности. Переключение ступеней производят тиристорными ключами со специальным управлением.

К недостатку принципа прямой компенсации относят большое количество тиристорных ключей. Также для достижения требуемой точности регулирования необходимо частое переключение конденсаторов, что крайне нежелательно с точки зрения надежности.

При косвенной компенсации с помощью батареи косинусных конденсаторов генерируется постоянная реактивная мощность из расчета на максимально возможную реактивную мощность подстанции с силовым трансформатором СТ и нагрузкой Н (на $100\% Q_{СТ} + Q_H$). При изменении величины и характера нагрузки и возникновении перекомпенсации избыточную часть реактивной мощности нейтрализуют с помощью регулируемого реактора, который рассчитан на потребление также максимально возможной реактивной мощности

подстанции (т.е. также на $100\% Q_{СТ} + Q_H$). Регулирование индуктивного тока реактора производят подмагничиванием или при помощи тиристоров [1].

Недостатком принципа косвенной компенсации является большая установленная мощность нерегулируемого и регулируемого электрооборудования (100% от $Q_{СТ} + Q_H$). Кроме этого, установки, построенные по этому принципу, могут работать или в режиме поддержания напряжения, или в режиме поддержания реактивной мощности. Принцип косвенной компенсации не позволяет одновременно компенсировать отклонения напряжения у потребителей и реактивную мощность в сети.

Снизить в 2 раза установленную мощность (до 50% от $Q_{СТ} + Q_H$) и, соответственно, массу, габариты и стоимость конденсаторов и регулирующего устройства можно за счет изменения принципа регулирования.

Такой совмещенный принцип компенсации реактивной мощности и отклонений напряжения стал возможным благодаря построению и применению специального управляемого вольтодобавочного устройства ВДУ с четырехквadrантным непрерывным регулированием величины и фазы добавочного к сети напряжения и добавочного к цепи нагрузки тока [2]. ВДУ обладает свойствами генерации и потребления реактивной мощности, а также

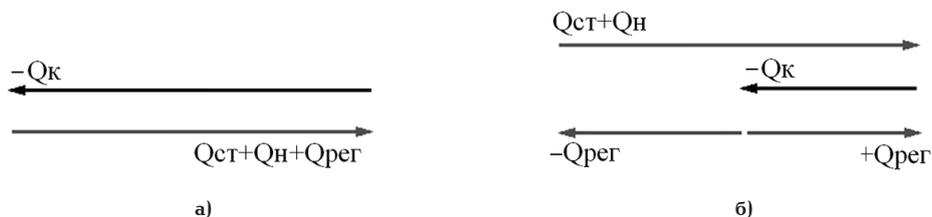


Рис. 1. Регулируемые и нерегулируемые составляющие реактивной мощности

поддержания напряжения у потребителей подстанции на заданном уровне независимо от положительных или отрицательных отклонений напряжения в сети от номинального уровня [3].

Принципы компенсации на высокой стороне трансформаторной подстанции (ТП) можно охарактеризовать балансом реактивной мощности в соответствии с выражениями:

для конденсаторов с регулируемым реактором

$$Q_{CT} + Q_H + Q_{REG} - Q_K = 0, \quad (1)$$

для конденсаторов с ВДУ

$$Q_{CT} + Q_H \pm \frac{1}{2} Q_{REG} - \frac{1}{2} Q_K = 0. \quad (2)$$

Здесь Q_{CT} — реактивная мощность СТ, Q_H — реактивная мощность ТП с потребителями, Q_{REG} — регулируемая реактивная мощность, Q_K — нерегулируемая реактивная мощность конденсаторов.

Регулируемые и нерегулируемые составляющие реактивной мощности для сравнения двух принципов показаны векторами на рис. 1

На рис. 1а представлены вектора реактивной мощности для принципа косвенной компенсации, а на рис. 1б — для совмещенного принципа компенсации, которые показывают, что регулируемая Q_{REG} и нерегулируемая Q_K составляющие реактивной мощности при применении ВДУ уменьшились в 2 раза.

Преимуществом компенсатора на основе конденсаторов с ВДУ является то, что собственно ВДУ может обеспечить и прямую, и косвенную компенсацию, обладая свойством как генерировать, так и потреблять реактивную мощность. Благодаря этому при недокомпенсации ВДУ дополняет действие конденсаторов, а при перекомпенсации нейтрализует их действие. Кроме этого, в процессе компенсации реактивной мощности ВДУ может с высокой точностью и быстродействием регулировать вверх и вниз напряжение на входе ТП относительно напряжения сети, поддерживая его у потребителей на заданном уровне.

Функциональная схема трансформаторной подстанции с батареей конденсаторов и вольтодобавочным устройством представлена на рис. 2. Подстанция с такой комплектацией, работая в условиях изменений напряжения в сети, величины и характера нагрузки, позволяет быстро и точно разгружать электропередачу от реактивной мощности и снабжать потребителей стабильным напряжением [4].

ВДУ состоит из вольтодобавочного трансформатора ВТ и транзисторного преобразователя со звеном постоянного тока и четырехквadrантным ШИМ-регулированием выходного напряжения

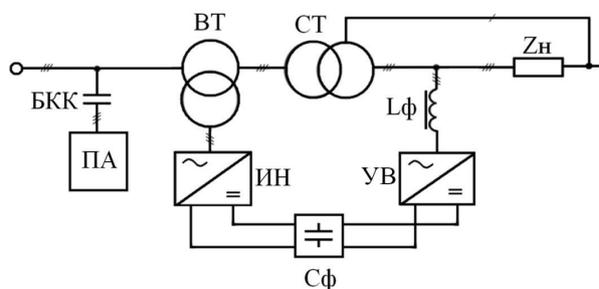


Рис. 2. Функциональная силовая схема ВДУ в составе трансформаторной подстанции (6–10) / 0,4 кВ: СТ и ВТ — силовой и вольтодобавочный трансформаторы; УВ — управляемый выпрямитель с L-фильтром; ИН — инвертор напряжения с С-фильтром; Z_H — нагрузка; БКК — батарея косинусных конденсаторов; ПА — пусковой аппарат конденсаторов

и входного тока, в состав которого входит управляемый выпрямитель УВ с входным L-фильтром и инвертор напряжения ИН с входным С-фильтром.

Батарея косинусных конденсаторов в системе генерирует постоянную реактивную мощность, а недостающую или избыточную ее часть генерирует или потребляет ВДУ.

Помимо снижения размера и мощности батареи косинусных конденсаторов при применении совмещенного принципа компенсации, предлагается также решить проблему ее подключения и отключения от сети.

Модель трансформаторной подстанции с ВДУ более подробно описана в [2].

Для мягкого пуска батареи косинусных конденсаторов предлагается применить сравнительно простой и надежный гибридный электронно-электрический аппарат. В отличие от широко применяемого реостатного пуска конденсаторов [5], предлагаемый способ и аппарат для его реализации не создают бросков тока и перенапряжений.

Сочетание электронных и электрических аппаратов имеет особое значение в электротехнике и является перспективным направлением [6, 7].

Функциональная схема аппарата для подключения батареи косинусных конденсаторов к сети приведена на рис. 3.

Диодный выпрямитель с реактором в цепи постоянного тока обладает замечательным свойством. Независимо от момента подключения к сети он плавно увеличивает выпрямленный ток по экспоненциальному закону и из него формирует плавно нарастающую амплитуду входного тока. У трехфазного мостового выпрямителя с RL-нагрузкой в процессе пуска происходит плавное равномерное и симметричное нарастание входных токов во всех фазах. Это свойство предлагается использовать

для мягкого подключения к сети трехфазного электрооборудования, включая его между сетевым автоматом и диодным выпрямителем. После завершения пускового переходного процесса диодный выпрямитель шунтируется контактором и через его диодные ветви производится гашение электромагнитной энергии, накопленной в реакторе.

Таким образом, предлагается гибридный электронно-электрический аппарат для безударного пуска электрооборудования переменного тока. Наиболее целесообразной областью применения предлагаемого пускателя могут стать системы электроснабжения с высоковольтным электрооборудованием (конденсаторные батареи и фильтрокомпенсирующие устройства, реакторы и силовые трансформаторы).

Для исследования динамических свойств гибридного пускателя рассмотрим процессы подключения

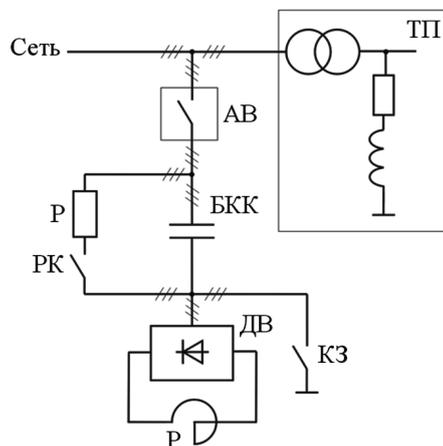


Рис. 3. Функциональная схема аппарата для подключения конденсаторов

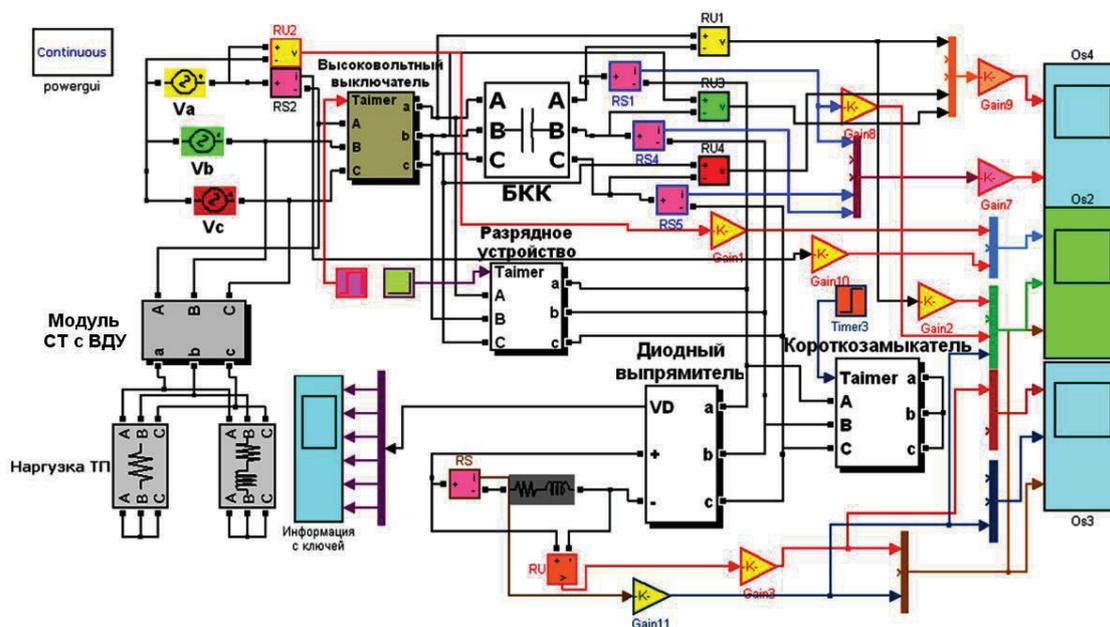


Рис. 4. Имитационная модель для исследования процессов подключения конденсаторов к модулю трансформаторной подстанции с ВДУ

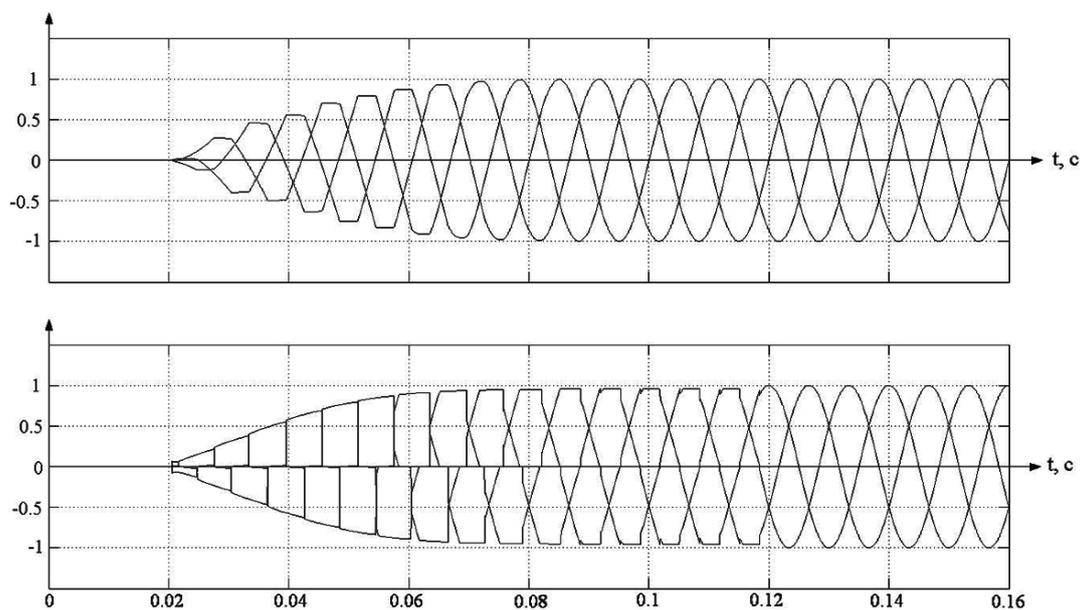


Рис. 5. Осциллограммы трехфазных напряжений (сверху) и токов (снизу) конденсаторов при пуске

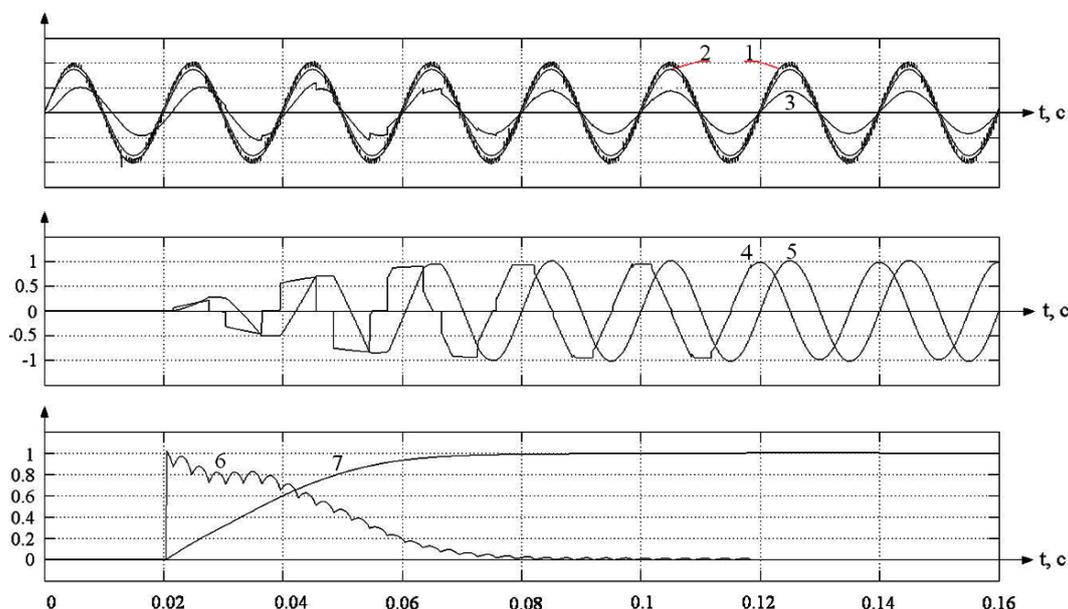


Рис. 6. Осциллограммы напряжений и токов одной фазы сети (сверху), конденсатора той же фазы (в середине) и реактора (снизу)

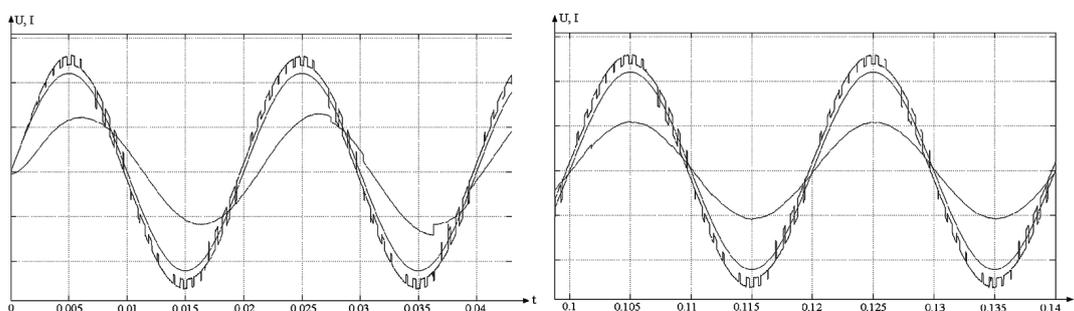


Рис. 7. Фрагменты осциллограмм напряжений сети, на входе ТП и тока сети в начальный момент и на завершающей стадии подключения конденсаторов

конденсаторов к трехфазной сети, полученные на имитационной модели в среде MatLab [8, 9].

Блочная модель пускателя, подключающего конденсаторы на высокой стороне трансформаторной подстанции, приведена на рис. 4.

Переходные процессы в электронно-электрическом аппарате на конденсаторах и в сети иллюстрируют рис. 5 и 6.

Из осциллограмм на рис. 5 видно, что после момента включения конденсаторов выключателем в 0,02 секунды напряжения и токи всех трех фаз плавно и быстро возрастают до номинальных значений по экспоненциальному закону. Для удобства сопоставления результатов численного эксперимента осциллограммы представлены в относительных единицах.

На осциллограммах (рис. 6) введены следующие обозначения: 1 — напряжение на входе силового трансформатора подстанции, 2 и 3 — напряжение и ток сети, 4 и 5 — ток и напряжение конденсатора, 6 и 7 — напряжение и ток реактора.

В момент времени, равный 0,08 секунды, конденсаторы во всех фазах (рис. 5, 6) полностью зарядились и в 0,12 секунды электронная часть гибридного пускового аппарата, как выполнившая свою функцию, была зашунтирована короткозамыкателем и таким образом отключена от заряженных конденсаторов.

Численным экспериментом показано (рис. 6) изменение тока, потребляемого одной фазой ТП из сети в процессе заряда конденсатора этой же фазы по закону изменения тока реактора в цепи выпрямленного тока диодного выпрямителя. Увеличенные фрагменты осциллограммы, представленной сверху на рис. 6, отдельно иллюстрированы на рис. 7.

Из численного эксперимента видно, что после завершения процесса подключения конденсаторов ток в сети уменьшился и стал совпадать по фазе с напряжением сети. Уменьшение тока произошло пропорционально повышению коэффициента мощности.

Следует отметить, что переходные процессы в пусковом аппарате не повлияли на напряжение питания подстанции и потребителей. Это обусловлено тем, что мощность источника в модели выбрана значительно больше, чем у нагрузки.

Выводы

1. Неотъемлемой частью компенсатора реактивной мощности со стабилизацией напряжения является батарея косинусных конденсаторов с электронно-электрическим аппаратом для ее подключения на входе ТП.

2. Вольтодобавочное устройство обладает свойством одновременного регулирования напряжения на входе ТП вверх и вниз относительно напряжения

сети, и генерировать или потреблять реактивную мощность относительно нерегулируемой реактивной мощности конденсаторов.

3. Применение совмещенного принципа построения компенсатора с возможностями обеспечения регулируемой генерации и потребления реактивной мощности позволяет дополнять или нейтрализовать действие нерегулируемых конденсаторов. Этим достигается снижение установленной мощности регулируемой и нерегулируемой части устройства в два раза.

4. Предлагаемый пусковой аппарат позволяет с высоким быстродействием производить пуск конденсаторов электронным аппаратом с плавным нарастанием напряжения и тока заряда. По завершению процесса пуска электронный аппарат, выполнивший свою функцию, шунтируется электрическим аппаратом, не нарушая надежность системы электроснабжения.

Библиографический список

1. Солодухо Я. Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для ее компенсации. М.: Информ-электро. 1981. 88 с.
2. Власьевский С. В., Климах С. В. Принципы построения электронных устройств для повышения качества и экономии электроэнергии в системах электроснабжения // Вестник института тяги и подвижного состава. 2016. № 12. С. 9–12.
3. Иньков Ю. М., Климах В. С., Климах С. В., Жемчужина Е. А. Исследование электротехнического комплекса в среде MatLab с применением специализированных модулей // Электротехника. 2017. № 9. С. 13–18.
4. Герман Л. А., Серебряков А. С., Дулепов Д. Е. Двухступенчатая установка поперечной емкостной компенсации в тяговой сети переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2011. № 1. С. 16–21.

5. Розанов Ю. К. Электрические и электронные аппараты / под ред. Ю. К. Розанова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Информ-электро, 2001. 420 с.

6. Розанов Ю. К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники: статья // Электричество. 2005. № 7. С. 52–61.

7. Власьевский С. В., Климах С. В. Программный комплекс в среде MatLab для исследования систем тягового и промышленного электроснабжения с применением устройств силовой электроники на трансформаторных подстанциях: свидетельство на прогр. для ЭВМ № 2016616629; опубл. 20.07.16. Бюл. № 7.

8. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystem и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с. ISBN 5-94074-395-1, 978-5-388-00020-0.

9. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0. СПб.: Корона Принт, 2001. 320 с. ISBN 5-79310-158-6.

ВЛАСЬЕВСКИЙ Станислав Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электротехника, электроника, электро-механика».

КЛИМАШ Степан Владимирович, аспирант кафедры «Электротехника, электроника, электро-механика».

Адрес для переписки: Klimash907@mail.ru

Для цитирования

Власьевский С. В., Климах С. В. Способ и устройство подключения конденсаторов на трансформаторных подстанциях // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 23–27. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-23-27.

Статья поступила в редакцию 17.11.2017 г.

© С. В. Власьевский, С. В. Климах