

Лабораторная работа №5

Статический компенсатор на базе преобразователя напряжения

Цель работы: исследование режимов работы трехфазного статического преобразователя напряжения как элемента статического компенсатора реактивной мощности.

Теоретическая часть

Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ) или *static synchronous compensator* (STATCOM) – это устройство на базе статического преобразователя, работающее в качестве статического компенсатора реактивной мощности, чей емкостный или индуктивный выходной ток может изменяться независимо от переменного напряжения сети.

СТАТКОМ может применяться для решения следующих задач:

- стабилизация и регулирование напряжения;
- компенсация реактивной мощности;
- симметрирование нагрузки, путем потребления активной мощности из одной фазы и выдачи ее в другую;
- демпфирование колебаний в энергосистеме, поскольку СТАТКОМ обладает высоким быстродействием;
- активная фильтрация напряжения, что объясняется возможностью формирования не только напряжения гармонической формы, но и полигармонической, требуемой для компенсации соответствующих паразитных гармоник в сети;
- сглаживание графиков нагрузок, при наличии накопителя энергии большой емкости на стороне выпрямленного напряжения.

Заметка. Объединение двух фаз позволяет, в отличие от СТК, осуществлять межфазовый обмен мощностью, что снижает установленную мощность реакторного (до 15–20%) и конденсаторного оборудования (до 10%) от мощности установки.

Устройство СТАТКОМ в общем случае содержит (см. рисунок 1):

- 1) статический преобразователь, способный работать в различных режимах потребления и генерации активной и реактивной мощности и обычно располагающийся в закрытом помещении;
- 2) согласующий трансформатор для подключения к шинам высокого напряжения;
- 3) звено постоянного тока (выпрямленного напряжения), обеспечивающее стабильность тока (напряжения) для реализации модуляции синусоидальных токов (напряжений);
- 4) пассивные фильтры, для обеспечения синусоидальности фазных токов.

Существуют различные схемы реализации СТАТКОМ. Один из возможных вариантов СТАТКОМ с преобразователем напряжения представлен на рисунке 1.

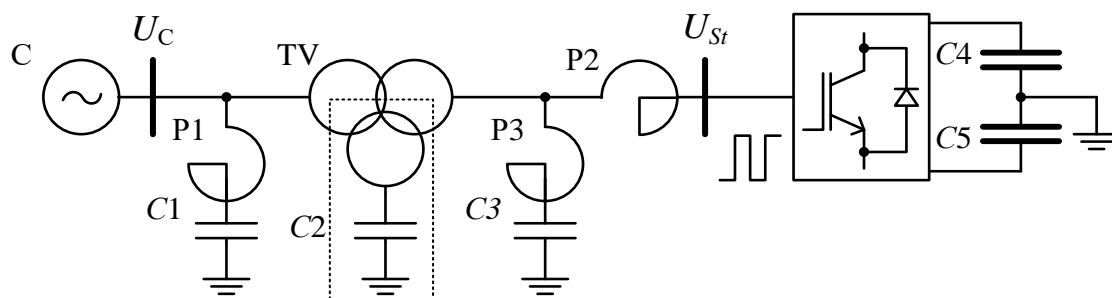


Рисунок 1. Упрощенная принципиальная схема СТАТКОМ

Для определения функциональных возможностей СТАТКОМ необходимо проанализировать принципа его работы. Для анализа составим схему замещения и запишем уравнение для расчета мощности, по которому определим возможные режимы работы СТАТКОМ.

При рассмотрении принципиальной схемы стоит отметить следующее:

- статический преобразователь, при условии стабильности напряжения на конденсаторных батареях $C4$ и $C5$, формирует напряжение близкое к гармоническому в довольно широком спектре частот (практически до частоты коммутации вентилей) и может быть замещено источником ЭДС U_{St} при условии пренебрежения потерями;
- фильтр позволяет снизить коэффициент искажения синусоидальности тока трансформатора. Обычно фильтр располагается между реактором и трансформатором, при этом токи высших гармоник не протекают через обмотки трансформатора. Однако при усложнении электромагнитной части он может быть вынесен либо на сторону высокого напряжения трансформатора (высшие гармоники протекают по всем обмоткам трансформатора), либо включен в дополнительную обмотку трансформатора (токи высших гармоник не протекают по обмотке высокого напряжения трансформатора). На частоте тока сети фильтры имеют емкостный характер, причем их параметры таковы, что они не оказывают существенного влияния на его характеристики с точки зрения описания процессов протекающих в СТАТКОМ, и их роль будет более подробно рассмотрена позднее;
- реактор и трансформатор без учета потерь и при условии приведения к одной ступени напряжения могут быть представлены общим индуктивным сопротивлением X_L – сопротивлением связи между шинами подстанции и статическим преобразователем.

Таким образом, схема замещения СТАТКОМ (рисунок 2) аналогична схеме замещения синхронной электрической машины.

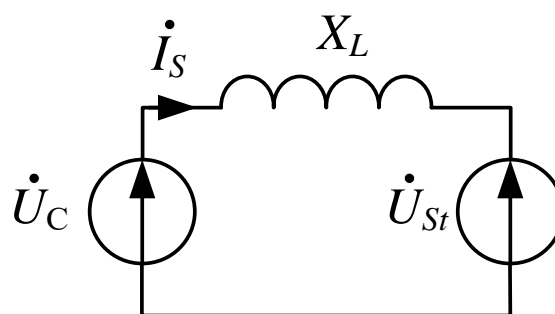


Рисунок 2. Схема замещения СТАТКОМ

Полная мощность устройства определяется по выражению

$$S = \frac{U_C U_{St}}{X_L} \sin(\alpha) - j \left(\frac{U_C U_{St}}{X_L} \cos(\alpha) - \frac{U_C^2}{X_L} \right) = P - jQ \quad (1)$$

где U_C , U_{St} – линейные напряжения сети и преобразователя, соответственно;

α – фазовый угол между напряжениями статического преобразователя и напряжением на шинах подстанции;

P , Q – активная и реактивная составляющие мощности.

Поскольку напряжение статического преобразователя может быть управляемо как по модулю, так и по фазе, и при этом независимо по трем фазам, то потребляемая активная и реактивная мощности могут быть изменены независимо друг от друга. Таким образом, СТАТКОМ может работать в четырех квадрантах, но лишь кратковременно, поскольку потребление или генерация активной энергии ведет к ее накоплению или отбору из конденсаторных батарей на стороне выпрямленного напряжения. Энергия, запасенная в конденсаторе, пропорциональна квадрату напряжения на его обкладках: значит напряжение при потреблении преобразователем активной мощности увеличивается, а при генерации – уменьшается.

Между тем, требуемое напряжение на конденсаторных батареях определяется жестко либо режимом работы преобразователя, либо должно оставаться постоянным в зависимости от конкретной реализации системы автоматического управления СТАТКОМ. Поэтому произвольное изменение напряжение недопустимо. Кроме того, увеличение напряжения сверх предельно допустимого может приводить к пробое изоляции конденсаторных батарей или вентилях преобразователя.

Векторные диаграммы напряжений и токов, поясняющие принцип действия СТАТКОМ, приведены на рисунке 3.

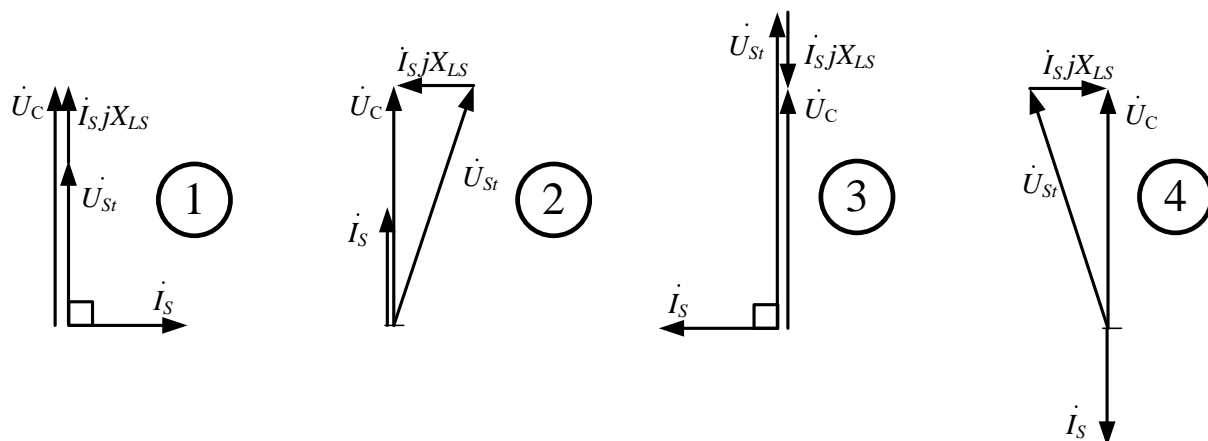


Рисунок 3. Векторные диаграммы напряжений и токов СТАТКОМ

- 1 – потребление реактивной мощности;
- 2 – потребление активной мощности;
- 3 – генерация реактивной мощности;
- 4 – генерация активной мощности.

Параллельно, проясним принцип действия на осциллограммах напряжений и тока СТАТКОМ, приведенных на рисунках 4–7. Для удобства восприятия осциллограммы приведены в относительных единицах измерения. За базовое значение напряжения принята амплитуда номинального фазного напряжения на шинах, к которым присоединен СТАТКОМ. Базисный ток равен амплитуде номинального фазного тока. Сопротивление принято равным 0,5 о.е. Будем считать напряжение U_C неизменным и равным 1.

① Пусть напряжение статического преобразователя совпадает по фазе с напряжением сети и равно 0,5. Тогда падение напряжения на сопротивлении связи равно напряжению на статическом преобразователе в каждый момент времени. Ток по закону Ома будет равен 1 о.е. и отставать от падения напряжения, а значит и от напряжения сети на 90° , что и соответствует режиму потребления реактивной мощности (рисунок 4).

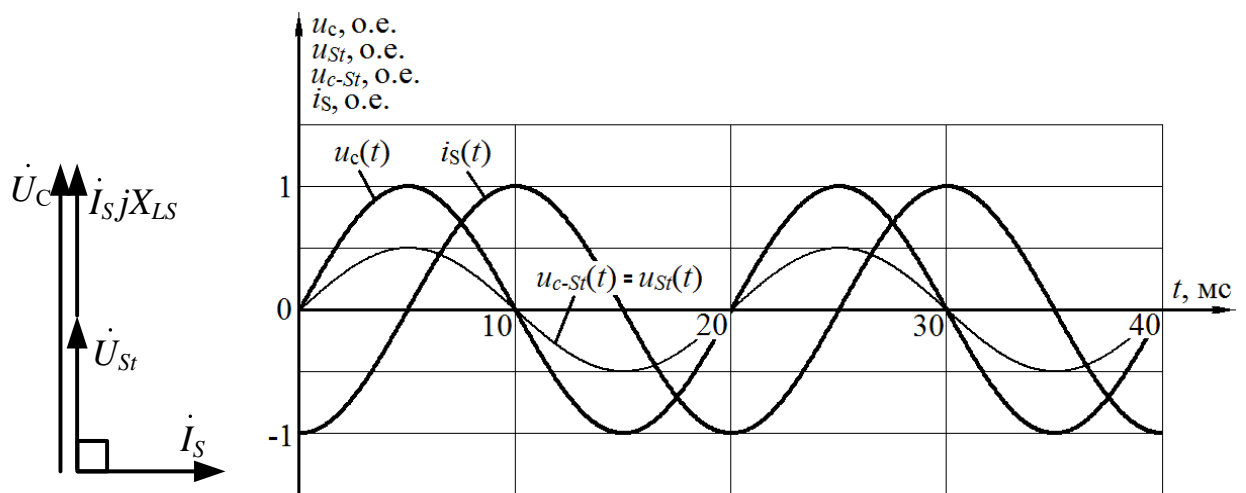


Рисунок 4. Осциллограммы напряжений и тока для схемы замещения СТАТКОМ, работающего в режиме потребления реактивной мощности

На рисунках 4–7 напряжением $u_{c-St}(t)$ обозначено падение напряжение на сопротивлении связи.

② Пусть напряжение статического преобразователя отстает по фазе от напряжения сети, скажем, на $\alpha = 20^\circ$ и равно $1/\cos(\alpha)$. Тогда падение напряжения на сопротивлении связи синусоидальное и опережает напряжение сети на 90° . Ток по закону Ома будет отставать от падения напряжения на 90° , а значит совпадет по фазе с напряжением сети, что и соответствует режиму потребления активной мощности (рисунок 5).

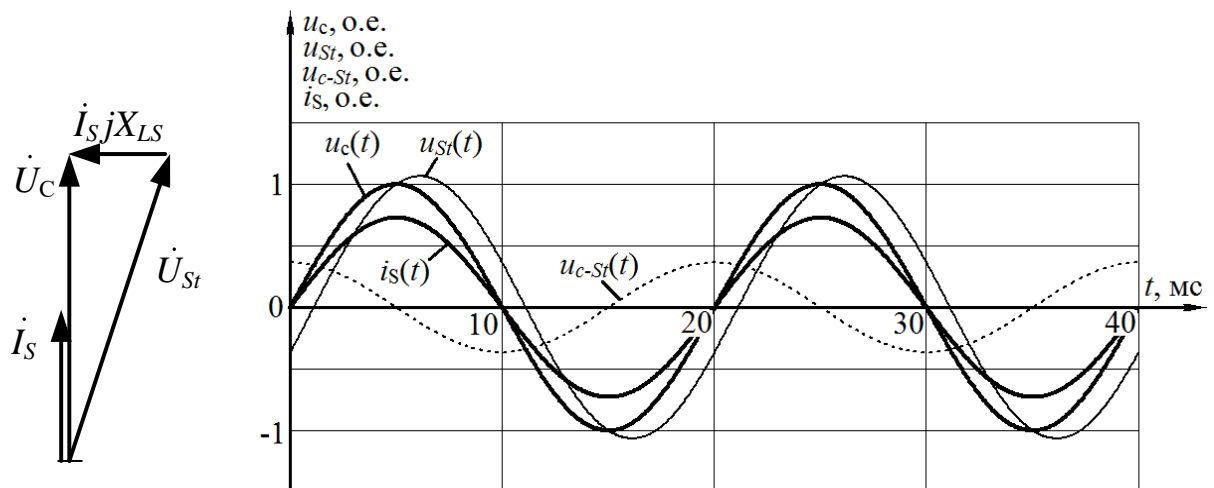


Рисунок 5. Осциллограммы напряжений и тока для схемы замещения СТАТКОМ, работающего в режиме потребления активной мощности

③ Пусть напряжение статического преобразователя опережает по фазе от напряжения сети, скажем, на $\alpha = 20^\circ$ и равно $1/\cos(\alpha)$. Тогда падение напряжения на сопротивлении связи синусоидальное и отстает от напряжения сети на 90° . Ток по закону Ома будет отставать опережать

падение напряжения на 90° , а значит будет в противофазе с напряжением сети, что и соответствует режиму генерации активной мощности (рисунок 6).

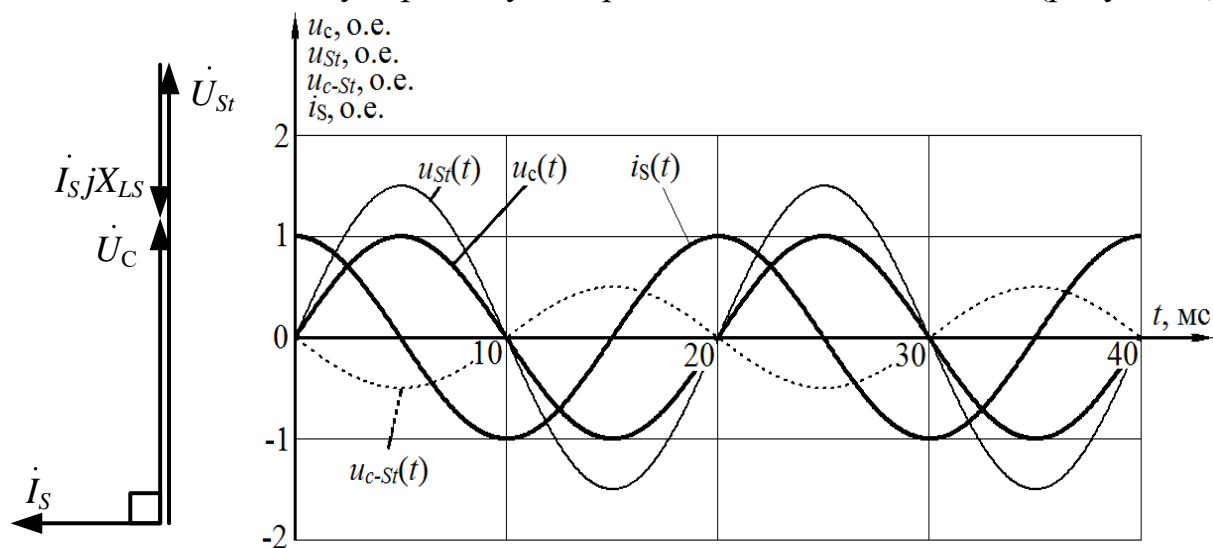


Рисунок 6. Осциллограммы напряжений и тока для схемы замещения СТАТКОМ, работающего в режиме генерации реактивной мощности

④ Пусть напряжение статического преобразователя совпадает по фазе с напряжением сети и равно 1,5. Тогда падение напряжения на сопротивлении связи равно напряжению на статическом преобразователе, взятому с обратным знаком, в каждый момент времени. Ток по закону Ома будет равен 1 о.е. и отставать от падения напряжения, а значит опережать напряжение сети на 90° , что соответствует режиму генерации реактивной мощности (рисунок 7).

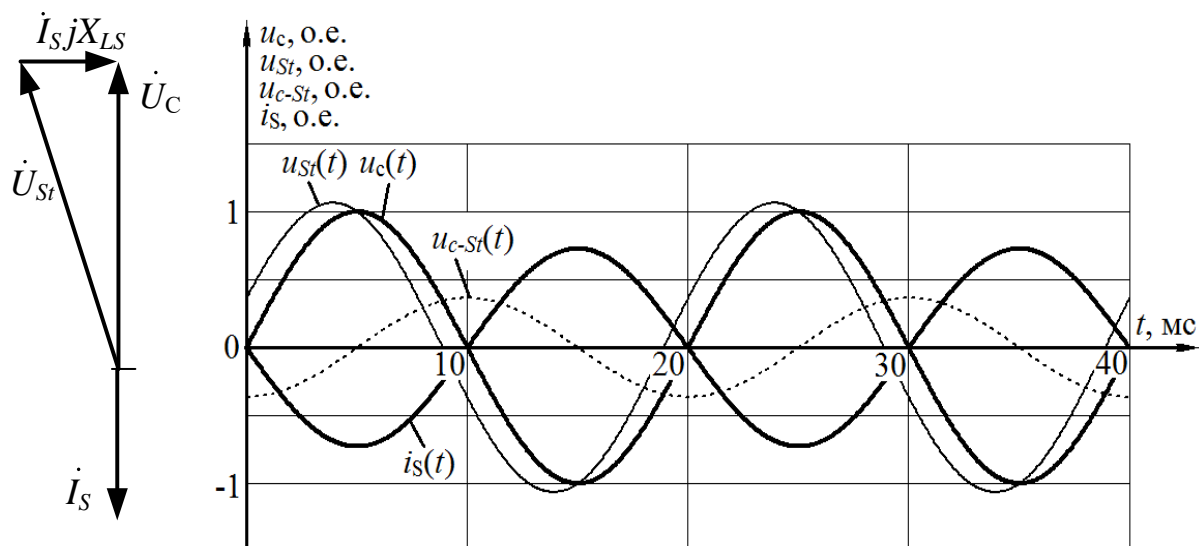


Рисунок 7. Осциллограммы напряжений и тока для схемы замещения СТАТКОМ, работающего в режиме генерации активной мощности

Рассмотренные режимы работы СТАТКОМ позволяет обеспечить статический преобразователь, однако следует отметить важный факт. Длительное потребление или генерация активной мощности СТАТКОМ возможны только в случаях, если он является составляющей комбинированного устройства компенсации или вставки постоянного тока, либо в случае, когда на стороне выпрямленного напряжения установлен накопитель энергии, например аккумуляторная батарея.

С учетом вышесказанного диаграмма мощности, определяющая области допустимой работы СТАТКОМ – степень возможного участия СТАТКОМ в управлении режимами, приведена на рисунке 8.

Область допустимой длительной работы СТАТКОМ ограничена номинальным значением тока и напряжения на стороне выпрямленного напряжения статического преобразователя. В кратковременных режимах допускается превышение тока выше номинального вплоть до полутора-двукратного, что положительно сказывается на влиянии СТАТКОМ на режим энергосистемы в аварийных и послеаварийных режимах их работы.

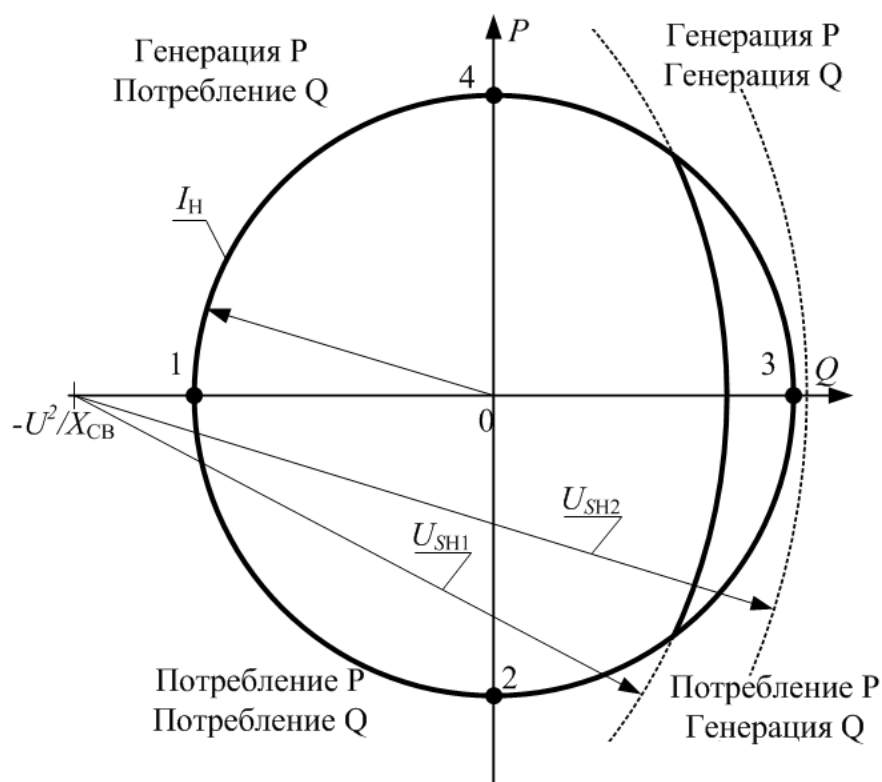


Рисунок 8. Области допустимой работы СТАТКОМ и вставок постоянного тока на его базе

Точки 1–4 соответствуют случаям, представленным на рисунке 3.

Порядок выполнения работы

- 1) используя результаты, полученные в лабораторной работе №2, соберите в MatLab/Simulink модель трехфазного статического преобразователя, с общими для всех фаз преобразователя источниками постоянного напряжения (рисунок 9);
- 2) модифицируйте систему формирования ШИМ таким образом, чтобы на выходе преобразователя формировались напряжения, сдвинутые на 120° и образующие симметричный трехфазный источник напряжения;
- 3) выходы на трехфазной стороне подключить к первым сторонам трехфазной группы реакторов, задайте активное и реактивное сопротивления реактора в 3 раза меньше, чем в работе «**Исследование тиристорно-управляемого реактора**»;
- 4) подключить ко вторым сторонам реакторов трехфазной группы линейный трехфазный симметричный источник напряжения той же последовательности, что и источник на базе статического преобразователя.
- 5) задать действующее линейное напряжение линейного трехфазного источника, как в работе «**Исследование тиристорно-управляемого реактора**». Напряжения источника на стороне постоянного тока преобразователя, равное амплитудному значению фазного напряжения трехфазного источника;
- 6) изменяя начальную фазу генератора ШИМ в диапазоне $[0^\circ, 360^\circ]$ зафиксировать значения его активной и реактивной мощности;
- 7) затем изменить значение напряжения на источнике постоянного напряжения на 20% в большую и меньшую стороны от исходного значения, каждый раз повторяя измерения по пункту 6;
- 8) в соответствии с выражением (1) постройте в одних осях координат расчетные и экспериментальные круговые диаграммы мощности $Q(P)$;
- 9) для различных режимов потребления и генерации активной и реактивной мощности зафиксируйте осциллограммы, на которых в одних осях постройте осциллограммы первых гармоник тока и фазных напряжений линейного источника и статического преобразователя, а также падения напряжения на реакторе для одной фазы;
- 10) **дополнительное задание:** при кратности напряжения на источнике постоянного напряжения 1,2 определите расчетным путем значения коэффициента модуляции и начальные фазы опорных сигналов, при которых будут выполняться условия генерации/потребления только активной составляющей ($P=1$ о.е.), генерации/потребления только реактивной составляющей мощности ($Q=1$ о.е.). За 1 о.е. мощности принять реактивную мощность, генерируемую СТАТКОМ при единичном коэффициенте

модуляции и совпадении фаз напряжений на трехфазной стороне статического преобразователя и трехфазного источника напряжения.

11) оформить отчет.

Комментарии к выполнению работы

На основе мостовой схемы нужно собрать трехфазную мостовую схему соответствующую принципиальной схеме на рисунке 3.

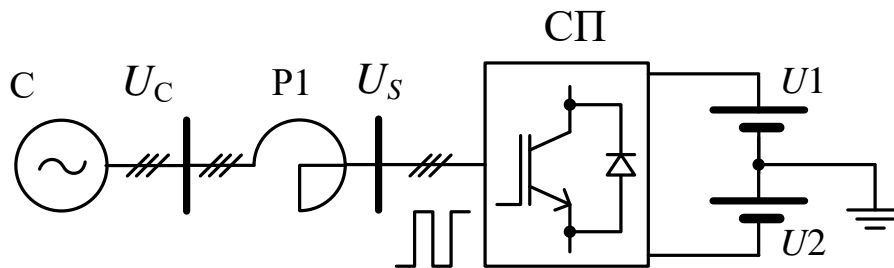


Рисунок 9. Принципиальная схема компенсатора на базе статического преобразователя (СП)

Управляя параметрами начальной фазы трехфазного источника напряжения и амплитуды зафиксировать значения активной и реактивной мощности

Кратность напряжения U_s	Фаза U_c	P	Q
1	0		
	45		
	90		
	135		
	180		
	225		
	270		
	315		
1,2	0		
	45		
	...		
0,8	0		
	45		
	...		

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы СТАТКОМ с использованием векторных диаграмм и осциллограмм напряжений и токов.
2. Чем ограничена область допустимой работы СТАТКОМ?
3. Чем вызваны отличия расчетных и экспериментальных значений мощности?
4. Покажите контуры протекания тока в преобразователе, в зависимости от направлений токов в реакторах и состояний транзисторов.
5. Каково назначение диода, включаемого антипараллельно с транзистором?
6. Какова роль конденсатора в инверторе напряжения, в каком месте он ставится?
7. Назовите еще устройства на базе статического преобразователя напряжения.

Литература

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высшая школа, 1982. – 496 с.
2. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания, – М.: Энергоатомиздат, 1988, – 294 с.
3. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
4. Бурман А.П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. / А.П. Бурман, Ю.К. Розанок, Ю.Г. Шакарян – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.