

УДК 621.311

 **ГИБКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
 FLEXIBLE ALTERNATING CURRENT TRANSMISSION SYSTEM**

Д.А. Бурдин, Н.М. Николаев

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск  
D. Burdin, N. NikolaevSupervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** с увеличением потребителей электроэнергии возникла необходимость в более эффективных системах управления электроснабжением, которое привело к развитию технологии производства и передачи электроэнергии. Одной из таких технологий является FACTS (Гибкая система передачи переменного тока). Системы передачи должны быть гибкими, чтобы реагировать к более разнообразным схемам генерации и нагрузки.

**Abstract:** with the increase in electricity consumers, the need arose for more efficient power supply management systems, which led to the development of technology for the production and transmission of electricity. One such technology is FACTS (Flexible AC Transmission System). Transmission systems must be flexible to respond to more diverse generation and load patterns.

**Ключевые слова:** надежность, электроснабжение, управление, передача переменного тока.

**Keywords:** reliability, power supply, control, AC transmission.

**Введение**

В настоящее время, в большинстве случаев, передача и распределение электроэнергии осуществляется по линиям переменного тока. С продолжающимся по сей день ростом нагрузки в сетях, появляется проблема увеличения пропускной способности уже действующих линий электропередач, а также управления режимами этих линий.

В связи с этим были изобретены устройства, которые могут изменять сопротивление линий и управлять потоками мощностей. Эти устройства используются в сетях для того, чтобы увеличить пропускную способность линии, повысить стабильность напряжения, получить возможность регулирования напряжения, и повысить устойчивость к различным возмущениям в энергосистеме. Наличие таких устройств в линиях позволило их называть «гибкими линиями».

**Основная часть**

Реактивная мощность служит для баланса индуктивной реактивной и емкостной реактивной мощности. Несоблюдение баланса снижает величину передачи активной мощности. В результате этого были разработаны методы для установления баланса между индуктивной и емкостной реактивной мощностью. Такие методы получили названия методов компенсации. Эти методы

классифицируют по типу соединения компенсирующих устройств в сеть энергосистемы: серийная компенсация и компенсация шунта.

В основе гибкой системы передачи переменного тока лежат устройства силовой электроники, до их внедрения проблемы управления линии решались с помощью установки реакторов, синхронных генераторов или конденсаторов в связке с механическими переключателями. Однако был выявлен ряд недостатков, а именно: износ механической части переключателей и достаточно долгий отклик, что безусловно не говорит о надежности данного вида управления ЛЭП. Исходя из этого, стало очевидным целесообразность использования статических преобразователей напряжения на основе современной силовой электроники.

К серийной компенсации устройств FACTS относят:

- конденсатор серии с тиристорным управлением (TCSC);
- серийный реактор с тиристорным управлением (TCSR);
- конденсатор серии с тиристорным переключением (TSSC);
- статический синхронный последовательный компенсатор (SSSC).

При последовательной компенсации устройства FACTS подключаются последовательно к сети энергосистемы. Как правило, какой-либо компенсатор подключается последовательно с линией передачи. Проанализируем целесообразность последовательной компенсации реактивной мощности. Рассмотрим простейшую энергосистему (рисунок 1).

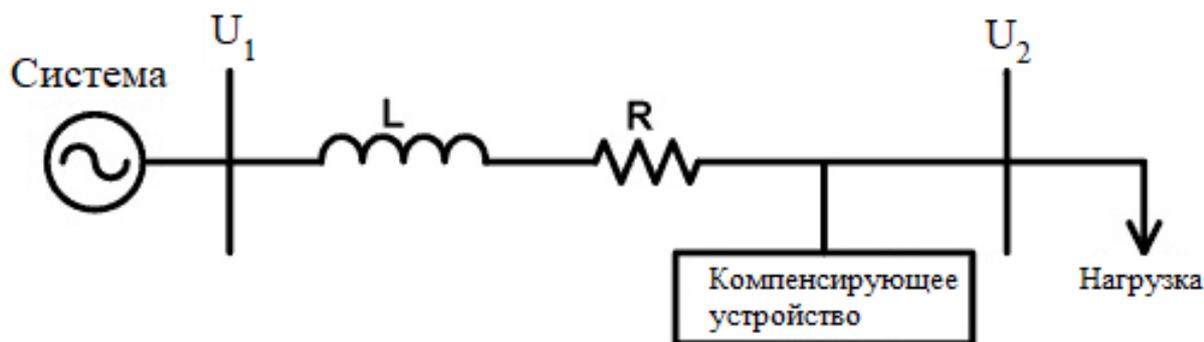


Рисунок 1 – Схема замещения сети для анализа последовательной компенсации

Пропускная способность линии электропередачи без использования компенсирующего устройства [1].

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L} \cdot \sin \delta, \quad (1)$$

где  $U_1$  – напряжение в начале линии, кВ;

$U_2$  – напряжение в конце линии, кВ;

$X_L$  – индуктивное сопротивление линии электропередачи, Ом;

$\delta$  – фазный угол между  $U_1$  и  $U_2$ .

Теперь подключим конденсатор последовательно к линии передачи. Емкостное сопротивление этого конденсатора равно  $X_C$ . Итак, общее реактивное сопротивление равно  $X_L - X_C$ . Таким образом, с компенсирующим устройством мощность передачи определяется выражением [2].

$$P' = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_L - X_C} \cdot \sin \delta, \quad (2)$$

$$\frac{P'}{P} = \frac{X_L}{X_L - X_C},$$

$$\frac{P'}{P} = \frac{1}{1 - \frac{X_C}{X_L}},$$

$$\frac{P'}{P} = \frac{1}{1 - k'},$$

$$k = \frac{X_C}{X_L}.$$

Коэффициент  $k$  известен как коэффициент компенсации или степень компенсации. Обычно значение  $k$  находится в пределах от 0,4 до 0,7. Предположим, что значение  $k$  равно 0,5:

$$\frac{P'}{P} = \frac{1}{1 - 0,5} = \frac{1}{0,5} = 2,$$

$$P' = 2 \cdot P.$$

Отсюда ясно, что при использовании устройств последовательной компенсации можно передавать примерно на 50 % больше мощности.

Шунтовые компенсаторы типа FACTS:

- статический компенсатор реактивной мощности (SVC);
- реактор с тиристорным управлением (TCR);
- конденсатор с тиристорным переключением (TSC);
- реактор с тиристорным переключением (TSR).

В высоковольтной линии величина напряжения на приемном конце зависит от условий нагрузки. Емкость играет важную роль в линии передачи высокого напряжения. Рассмотрим простейшую энергосистему (рисунок 2).

Когда линия загружена, нагрузке требуется реактивная мощность. Эта потребность в реактивной мощности удовлетворяется емкостью линии. Когда высокий спрос на реактивную мощность приведет к большому падению напряжения на приемном конце линии передачи.

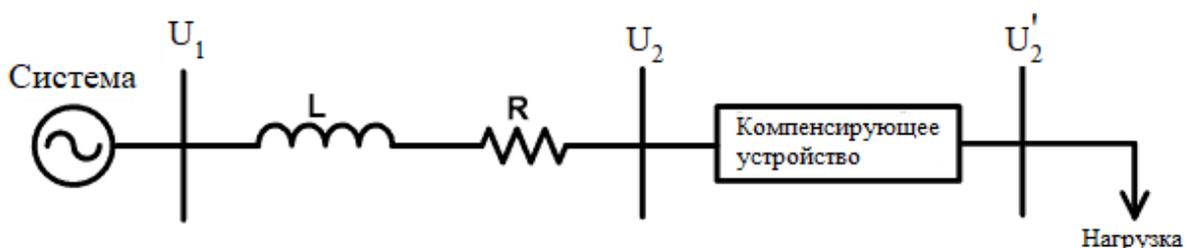


Рисунок 2 – Схема замещения сети для анализа компенсации шунта

Таким образом, батарея конденсаторов подключается параллельно линии передачи на приемном конце, чтобы обеспечить потребность в реактивной мощности:

$$Q = \frac{|U_2|^2}{x_C} = |U_2|^2 \cdot \omega \cdot C. \quad (3)$$

Это уменьшает падение напряжения на приемном конце. Если емкость линии увеличивается, напряжение на приемном конце увеличивается.

Когда линия слабо загружена, потребность в реактивной мощности меньше по сравнению с емкостью линии. В этом состоянии величина напряжения на приемном конце выше, чем величина напряжения на передающем конце. Чтобы избежать этого эффекта, шунтирующий реактор используется для последовательного соединения с линией передачи на приемном конце. Шунтирующий реактор будет поглощать дополнительную реактивную мощность из линии и поддерживать напряжение на приемном конце на номинальном уровне.

$$Q = \frac{|U_2|^2}{x_L} = \frac{|U_2|^2}{x_L \cdot \omega}. \quad (4)$$

### Заключение

По результатам проделанной работы можно сделать следующие заключения: применение устройств гибкой системы передачи переменного тока в сети существенно улучшают пропускную способность линии, повышают стабильность напряжения, надежность, устойчивость к переходным процессам. Исследования доказали целесообразность применения системы на основе силовой электроники. Необходимо учитывать стоимость данных устройств, а также регулярность их обслуживания.

### Литература

1. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока [Электронный ресурс]/ гибкие линии. - Режим доступа: [http://fsk-ees.ru/common/img/uploaded/managed\\_systems.pdf](http://fsk-ees.ru/common/img/uploaded/managed_systems.pdf) – Дата доступа: 08.11.2022.
2. Гибкие системы передачи электрической энергии [Электронный ресурс]/ гибкие линии. - Режим доступа: [https://ipolytech.elpub.ru/jour/article/view/94?locale=ru\\_RU](https://ipolytech.elpub.ru/jour/article/view/94?locale=ru_RU) – Дата доступа: 08.11.2022.
3. Решения для передачи и распределения энергии [Электронный ресурс]/ инновационные решения. - Режим доступа: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:9c0f1cd68f6cf56788e5ffa7a983049039f4fab2/peg-part02-ru.pdf> – Дата доступа: 08.11.2022.
4. Гибкость сети [Электронный ресурс]/ пропускная способность. - Режим доступа: <https://library.e.abb.com/public/8e783f28fb37f40cc125712900482d9d/p21-24.pdf> – Дата доступа: 08.11.2022.