

УПРАВЛЯЕМЫЕ ДАЛЬНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Рассмотрены проблемы дальних электропередач. Показано, что основная проблема связана с компенсацией избыточной реактивной мощности линий и способами ее реализации. Настройка электропередачи на передаваемую мощность с помощью УШР обеспечивает минимальные затраты на компенсирующие устройства. Применение технологии FACTS приводит к дополнительным затратам на компенсацию, но использование в ней элементов силовой электроники повышает управляемость энергосистем. Оптимальный по потерям активной мощности режим линии электропередачи достигается одновременным изменением на ней напряжения и потребления в конечных узлах реактивной мощности. Разработанный в ВятГУ управляемый шунтирующий реактор-автотрансформатор реализует эти функции оптимального управления. При этом требуемые для регулирования шунтирующий реактор и автотрансформатор совмещаются в одном агрегате.

Ключевые слова: линия электропередачи, компенсирующие устройства, управляемые реакторы, силовая электроника.

Особенностью дальних линий электропередачи переменного тока является значительное изменение соотношения мощностей электрического и магнитного полей при изменении режима передачи электроэнергии. При передаче натуральной мощности

$$P_H = \frac{U_{ном}^2}{Z_C} = \frac{3U_{ф.н}^2}{Z_C},$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение линии электропередачи; $U_{ф.н}$ – номинальное фазовое напряжение; Z_C – волновое сопротивление линии; мощности электрического и магнитного полей линии одинаковы, что определяет отсутствие реактивного тока линии и соответственно ее реактивной мощности.

При передаче по линии мощности P меньше натуральной мощности, мощность электрического поля больше магнитного поля, и линия представляет собой протяженный конденсатор с емкостным током, определяемым небалансом мощностей электрического и магнитного полей.

Напротив, при передаче мощности P больше натуральной мощность магнитного поля преобладает над мощностью электрического поля, и линия представляет собой протяженный реактор, поглощающий реактивную мощность. Причем, в отличие от первого случая ($P < P_H$) реактивная мощность не ограничена: чем больше отношение P / P_H , тем больше поглощаемая линией реактивная мощность.

При неизменном напряжении на линии с волновой длиной λ ее реактивная мощность (генерируемая или поглощаемая) определяется соотношением:

$$Q = P_H \lambda \left[1 - \left(\frac{P}{P_H} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

Положительному значению Q соответствует режим генерации реактивной мощности ($P < P_H$), а отрицательному ($P > P_H$) – режим поглощения реактивной мощности.

При больших волновых длинах линии ($\lambda \approx 1$ рад) мощность ее электрического поля сравнима по значению с натуральной мощностью P_H . Это обстоятельство определяет необходимость применения регулируемых компенсаторов реактивной мощности. В настоящее время в качестве потребителей реактивной мощности используются шунтирующие реакторы (ШР), мощность которых не регулируется. Поэтому для их компенсации при наборе нагрузки используются источники реактивной мощности (ИРМ) различного типа: синхронные компенсаторы, статические тиристорные компенсаторы и т.п. Таким образом обеспечивается двойная компенсация зарядной мощности линий с помощью ШР, а затем компенсация ШР с помощью ИРМ практически той же мощности.

При передаче по линии натуральной мощности никаких дополнительных средств компенсации не требуется. Проблема дальних электропередач одна: со-

гласование условий передачи электроэнергии различной мощности, отличной от натуральной, поскольку передача натуральной мощности все время невозможно. Идеальным средством такого согласования являются управляемые шунтирующие реакторы (УШР), компенсирующие избыточную мощность электрического поля в донатуральном режиме, в том числе и в режиме холостого хода, поэтому номинальная мощность УШР должна быть равна зарядной мощности линии. В результате УШР обеспечивает устойчивую передачу электроэнергии от нуля до натуральной мощности в квазинатуральном режиме, когда напряжение вдоль всей линии сохраняется неизменным и отсутствует сквозной поток реактивной мощности вдоль линии. Исключается необходимость использования ИРМ, которые необходимы при установке на линии неуправляемых ШР.

Необходимо отметить, что наличие фильтров высших гармонических в схеме УШР обеспечивает емкостный ток в его сетевой обмотке (при разомкнутой обмотке управления), что необходимо для обеспечения запаса по устойчивости при передаче натуральной мощности по линии [1]. Передавать по линии мощность, превышающую ее натуральную мощность, нецелесообразно.

Натуральная мощность линий может быть произвольно увеличена путем увеличения числа проводов в фазе с обязательным условием оптимального их расположения в пространстве (по окружности увеличенного диаметра). При небольшой недокомпенсации избыточной реактивной мощности с помощью УШР можно обеспечить и компенсацию падения напряжения на активном сопротивлении линии от передаваемого по ней тока и, таким образом, обеспечить жесткую стабилизацию напряжения вдоль всей линии. Выполненные исследования показали, что значительное уменьшение междуфазовых расстояний и оптимизация конструкций опор обеспечивают практически такую же стоимость высоковольтных линий повышенной натуральной мощности (ВЛ ПНМ), как и линий традиционного исполнения [1]. Поэтому увеличение стоимости электропередачи с ВЛ ПНМ определяется в основном увеличением мощности и соответственно

стоимости шунтирующих реакторов, поскольку уменьшение индуктивного сопротивления линий сопровождается таким же увеличением их емкости.

Для линий традиционного исполнения необходимая мощность УШР меньше, но для передачи мощности сверх натуральной необходима установка ИРМ для компенсации увеличенной мощности магнитного поля.

Выбор проводов и их изолирующей подвески на линиях проводится исходя из допустимых значений наибольшего рабочего напряжения. При превышении наибольшего рабочего напряжения на линии уровень радиопомех резко возрастает, увеличивается и вероятность перекрытий гирлянд изоляторов с последующим коротким замыканием на линии. Наименьшее повышение напряжения на линии происходит при установке реакторов по обоим концам участков между соседними УШР:

$$U_{max} = \frac{U_1}{\cos \lambda / 2},$$

где U_1 – напряжение в начале участка; λ – его волновая длина.

При этом мощность УШР на обоих концах участка должна быть одинакова и равна

$$Q_{УШР} = P_H \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}.$$

Для линий класса 500 кВ и выше предельная длина участка между двумя соседними УШР равна 600 км при условии, что в начале и конце линии напряжение равно номинальному. Следовательно, длинная линия с УШР разбивается на участки, длина которых не превышает 600 км, и по концам которых напряжение жестко фиксировано.

Пропускная способность электропередачи с УШР не ограничена натуральной мощностью линий традиционного исполнения, поскольку натуральная мощность линий может быть увеличена конструктивными мерами в достаточно широких пределах.

Технология гибких электропередач (FACTS) сводится к увеличению передаваемой по существующим линиям мощности за счет использования регу-

лируемых продольной и поперечной компенсации параметров линий: установок продольной емкостной компенсации (УПК), статических тиристорных компенсаторов (СТК) и компенсаторов на запираемых тиристорах (СТАТКОМ). При этом предполагается обеспечить передачу по линии мощности больше натуральной, доводя токовую нагрузку до предела термической стойкости проводов [2].

Соответственно, предлагается насыщать энергосистемы указанными компенсирующими устройствами вместо сооружения новых линий электропередачи.

Передача по линии мощности сверх натуральной возможна только при использовании источников реактивной мощности. Их мощность в зависимости от отношения P / P_H и волновой длины участка λ определяется формулой (1). Например, при $P = 1,5 P_H$ $Q = -1,25 P_H \cdot \lambda$, а при $\lambda = 1$ рад $Q = -1,25 P_H$. Для обеспечения баланса реактивной мощности линия, работающая в таком режиме, должна быть снабжена источниками реактивной мощности такого же значения. Решать таким образом проблему повышения пропускной способности линии нецелесообразно.

При передаче по линии мощности $P > P_H$ напряжение на ней понижается по отношению к напряжению по концам участка, где установлены компенсирующие устройства. Это приводит к дополнительным потерям мощности. Следует учитывать также, что в России линии электропередачи сооружались с проводами небольшого сечения 300-330 мм², при которых увеличение передаваемой по ним мощности до допустимой по статической устойчивости приводит к значительному увеличению потерь мощности. Таким образом, экономия на сооружении новых линий и увеличение передаваемой мощности за счет применения технологии FACTS приводит к необходимости сооружения дополнительных источников электроэнергии, что значительно дороже новых линий [2].

Экономичный режим работы дальних электропередач достигается изменением в достаточно широких пределах рабочего напряжения линии по обоим ее концам в функции передаваемой мощности. Для передающего и приемного узлов оптимальное по потерям мощности напряжения равны

Технические науки

$$U_{1\gamma} = \sqrt{\frac{P_1}{g_\gamma}}, \quad U_{2\gamma} = \sqrt{\frac{P_2}{g_\gamma}}, \quad (2)$$

где P_1 и P_2 – активные мощности отправного и приемного узлов.

Коэффициент пропорциональности между активной мощностью линии и напряжением

$$g_\gamma = \sqrt{\operatorname{Re}\left(\frac{\underline{D}\hat{C}}{\underline{B}\hat{A}}\right) / \operatorname{Re}\left(\frac{\underline{B}\hat{A}}{\underline{D}\hat{C}}\right) - b_m^2} \quad (3)$$

определяется обобщенными параметрами линии \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} и \underline{D} и значением оптимальной проводимости шунтирующих реакторов (ШР) b_m , включаемых в ее конечных узлах

$$b_m = I_m \left(\frac{\hat{B}\underline{C}}{\hat{B}\underline{D}} \right) / 2 \operatorname{Re} \left(\frac{\hat{B}\underline{D}}{\hat{B}\underline{C}} \right). \quad (4)$$

Из уравнений (2) видно, что экономичный по потерям уровень напряжения концов линии пропорционален корню квадратному из активной мощности конечных узлов. Проводимость ШР b_m не зависит от мощности линии и определяется только ее обобщенными параметрами.

Согласно (2) оптимальные мощности по концам линии

$$P_{1\gamma} = U_{1\gamma}^2 \cdot g_\gamma, \quad P_{2\gamma} = U_{2\gamma}^2 \cdot g_\gamma,$$

а отношение их определяет максимальное значение к.п.д. линии

$$\frac{P_{2\gamma}}{P_{1\gamma}} = \frac{U_{2\gamma}^2}{U_{1\gamma}^2} = \beta_{max}. \quad (5)$$

В режиме β_{max} оптимальный перепад напряжений на линии равен

$$K_\gamma = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{\beta_{max}}}.$$

Этот перепад всегда больше единицы и возрастает с увеличением длины линии. Следовательно, при глубоком регулировании напряжения на линии по выражениям (2) можно любую нагрузку передать с максимальным к.п.д. β_{max} .

Если проводимости ШР по концам линии выбраны по (4), то потребление из нее реактивной мощности будет определенным и равно

$$Q_{1\gamma} = U_{1\gamma} \cdot b_m = \frac{P_1}{g_\gamma} \cdot b_m, \quad Q_{2\gamma} = U_{2\gamma} \cdot b_m = \frac{P_2}{g_\gamma} \cdot b_m. \quad (6)$$

Следует отметить, что β_{max} при меняющейся нагрузке узлов P_1 и P_2 может быть получен только за счет согласованного регулирования напряжений по (2), но не путем произвольного изменения параметров компенсирующих устройств (реакторов).

Автором статьи в последние годы был разработан управляемый шунтирующий реактор-автотрансформатор [4], выполняющий функции глубокого регулирования напряжения на линии и потребления из нее оптимального значения реактивной мощности в соответствии с выражениями (2), (6).

В связи с появлением в конце XX века мощных полностью управляемых полупроводниковых приборов (силовых электронных ключей) появилась возможность создания многофункциональных устройств с базовой схемой переменного / постоянного тока, способных выполнять следующие функции:

- выпрямление;
- инвертирование;
- генерирование или потребление реактивной мощности;
- активную фильтрацию высших гармоник тока или напряжения;
- регулирование коэффициента мощности.

Возможность реализации этих функций обеспечивается полной управляемостью электронных ключей (транзисторов, тиристоров) на повышенной частоте. Эти качества определяют работу преобразователя с традиционной схемой выпрямления (инвертирования) в четырех квадрантах комплексной плоскости переменных на стороне переменного тока преобразователя. При этом можно осуществить импульсную модуляцию преобразуемых параметров по заданным законам.

Управление электронными ключами осуществляется системой ШИМ, при которой ширина импульсов моделируется в пределах периода основной частоты для того, чтобы создать определенную форму кривой выходного напряжения. Это осуществляется в целях обеспечения синусоидальности напряжения или тока.

Система управления на основе ШИМ позволяет не только обеспечить синусоидальную форму основной гармоники напряжения или тока, но и управлять значениями ее амплитуды, частоты и фазы. Становится возможным реализовать работу преобразователей переменного / постоянного тока совместно с сетью переменного тока во всех четырех квадрантах, т.е. как в режимах выпрямления, так и инвертирования с любым заданным значением коэффициента мощности $\cos\varphi$, в диапазоне от -1 до +1.

На основе схемы инвертора напряжения создан статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ). Учитывая, что реактивная мощность носит обменный характер, в качестве временного накопителя энергии были использованы электролитические конденсаторы, включаемые на стороне постоянного тока преобразователя, работающего в режиме инвертора напряжения, осуществляя обмен реактивной мощности с линией электропередачи.

В настоящее время разработано устройство для «гибких» линий электропередачи, названное объединенным регулятором потока мощности (ОРПМ) электроэнергии. Принципиально ОРПМ объединяет функции последовательного и параллельного компенсаторов реактивной мощности, а также фазоповоротного устройства. Основой этого устройства является два преобразователя переменного / постоянного тока. Один из преобразователей подключен параллельно к линии электропередачи, а другой последовательно с линией через трансформатор. Преобразователи выполнены на основе инверторов напряжения с ШИМ, они могут работать в четырех квадрантах комплексной плоскости на стороне переменного тока. В этом случае можно представить, что первый преобразователь является потребителем или генератором тока, 1-я гармоника ко-

торого может находиться в любом квадранте комплексной плоскости относительно вектора напряжения. Вторым преобразователем, вторичные обмотки которого включены последовательно с линией, генерирует или потребляет электроэнергию посредством последовательного добавления напряжения ΔU , 1-я гармоника которого также может находиться в любом квадранте комплексной плоскости относительно тока линии. ОРПМ является устройством не только для компенсации реактивной мощности, но и для создания изменяющегося по фазе дополнительного напряжения ΔU , что в конечном итоге ведет к изменению взаимного угла между напряжениями на электропередаче. В результате можно эффективно управлять потоками мощности в линии [3].

Статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ) может успешно использоваться для обеспечения качества электроэнергии. Например, параллельно нелинейной нагрузке подключается преобразователь, формирующий ток, значение которого соответствует разности искаженного и нормативного токов. В результате в узле соединения нагрузки и регулятора они вычитаются, и в сеть поступает неискаженный ток заданного значения. При этом интегральное значение искаженных токов равно нулю и потребление энергии от накопителя отсутствует. Этот же регулятор (СТАТКОМ) может устранять кратковременные провалы напряжения за счет энергии накопителя – конденсатора, входящего в его структуру.

Аналогичный принцип используется при компенсации небаланса токов в трехфазных цепях. В этом случае регулятор вырабатывает токи обратной последовательности, противоположные по знаку этим токам источника, обеспечивая симметрию токов источника. При этом интегральное значение токов обратной последовательности равно нулю, что обеспечивает симметрию режима.

Указанные способы можно назвать активными способами улучшения качества электроэнергии. В отличие от пассивных фильтров, основанных на использовании индуктивных, емкостных элементов, активные (силовые) фильтры являются пока более дорогостоящими и сложными. Однако, в настоящее время

можно успешно использовать и гибридные методы фильтрации, что понижает стоимость оборудования.

Выводы.

1. Электропередачи переменного тока с управляемыми шунтирующими реакторами, настроенные на передаваемую по ним мощность, обеспечивают наименьшие потери и стабильность напряжения в контролируемых узлах.

2. Использование на электропередачах УШРАТ позволяет осуществить оптимальное по потерям активной мощности регулирование напряжения на линии и потребление из нее реактивной мощности.

3. Технология FACTS существенно ухудшает технико-экономические показатели электропередач. Применение элементов силовой электроники в регуляторах и компенсаторах повышает управляемость энергосистем.

Список литературы

1. *Александров Г. Н.* Об эффективности применения компенсирующих устройств на линиях электропередачи // *Электричество*. 2005. № 4.
2. *Александров Г. Н.* Технология гибких линий электропередачи и электропередач, настроенных на передаваемую мощность // *Электричество*. 2006. № 6.
3. *Бурман А. П.* Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2012.
4. *Каленик В. А.* Патент РФ № 2545511. Управляемый шунтирующий реактор-автотрансформатор // *БИ*. 2015. № 10.

КАЛЕНИК Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: usr00159@vyatsu.ru