

УДК 621.315

## ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ГИБКИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Засл. деятель науки и техн. РБ, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.,  
 докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВА Т. Г.

*Белорусский национальный технический университет*

Рост потребления электроэнергии, развитие электроэнергетических систем требуют совершенствования управления потоками электроэнергии, электрическими сетями, осуществляющими электроснабжение потребителей и связи между электрическими станциями и электроэнергетическими системами. Для осуществления этого управления разрабатывались различные средства, в том числе компенсирующие устройства [1]. Заметным направлением технического оснащения современных энергосистем в промышленно развитых странах становится применение гибких управляемых систем электропередачи – FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) [2]. Термин «FACTS» используется специалистами с 1980-х гг. применительно к передающим системам переменного тока, включающим современную силовую электронику, позволяющую превратить их в активные элементы энергосистем. Однако термины «управляемые» и «гибкие» электропередачи еще с середины 1970-х гг. были введены в СССР для конструкций линии электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности и пониженного экологического влияния:

- полуразомкнутых линий электропередачи (ЛЭП);
- управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных электропередач (УСВЛ);
- регулируемых фазовых сдвигов между системами напряжений цепей;
- регулируемых устройств продольной и поперечной компенсации;
- компактных ЛЭП со сближенными фазами, нетрадиционной конструкции опор и расположения проводов в фазе;
- настроенных на полуволну ЛЭП и др.

Согласно [3, 4] среди устройств FACTS, установленных к настоящему времени в энергосистемах мира с целью повышения пропускной способности линий электропередачи, снижения потерь и стабилизации уровней напряжения, лидирующие позиции по количеству объектов и установлен-

ной мощности оборудования занимают статические тиристорные компенсаторы и установки продольной компенсации (несколько сотен) [3, 4]. В отношении продольной компенсации имеется мнение [5]: при длине свыше 400 км она недостаточно эффективна. Однако показано [6], что за счет шунтирующих реакторов эффективность продольной компенсации может быть при расстояниях свыше 400 км повышена до желаемого уровня. Продольная компенсация индуктивного сопротивления ЛЭП в числе других средств применена на электропередаче 900 км Куйбышев – Москва и на шведской ЛЭП 400 кВ [1]; технико-экономическое сравнение принятых средств на ЛЭП Куйбышев – Москва показало, что это самая экономичная продольная компенсация [6]. Аналогичные результаты получены [7] для системы передачи 750 кВ. Авторы [7] рассматривали также электропередачу, настроенную на передаваемую мощность [8]. Технология настройки электропередачи на передаваемую мощность предполагает передачу мощности в натуральном режиме, который имеет известные преимущества [6, 8]. Эта технология возможна благодаря созданию линий повышенной натуральной мощности. Варианты таких электропередач разработали электроэнергетические научные коллективы Москвы, Санкт-Петербурга, Минска, Кишинева, Новосибирска и др. Они внесли серьезный вклад в теорию управляемых гибких электропередач, предложили оригинальные конструктивные решения, начали переход к практике проектирования и эксплуатации опытных компактных ЛЭП. Можно согласиться с Г. Н. Александровым в том, что отечественная электроэнергетика опередила западную, а также с его оценкой роли и значения натурального режима систем электропередачи и режимов реактивной мощности и напряжений линий электропередачи [5]. В электропередачах, настроенных на передаваемую мощность, в режимах передачи мощности менее натуральной в соответствии с графиком нагрузки предлагается [5] использовать управляемые шунтирующие реакторы трансформаторного типа или управляемые шунтирующие компенсаторы трансформаторного типа. На рис. 1 представлены схемы компенсирующих устройств, рекомендуемые [7]. Здесь использованы следующие обозначения: КГ – конденсаторная группа; ТРГ – тиристорно-реакторная группа; АТ – автотрансформатор; ТН – трансформатор напряжения; АР – автоматический регулятор; РУВС – регулятор управляемый вакуумный станционный. На рис. 2 представлен управляемый реактор с подмагничиванием постоянным током (УШРП). Фаза такого реактора состоит из двух замкнутых магнитопроводов М1 и М2, рабочей сетевой обмотки АХ, обмотки управления ах, силового тиристорного блока БУ и автоматического регулятора АР.

Как было отмечено, среди средств повышения пропускной способности систем электропередачи наиболее экономичной оказалась продольная компенсация [6, 7]. Можно выделить два различных способа регулирования параметров электропередачи: во-первых, с помощью устройств компенсации или настройки (синхронных компенсаторов, батарей статических конденсаторов, реакторов – управляемых и неуправляемых, статических источников реактивной мощности и др.), во-вторых, за счет равномерно распределенной собственной емкостной проводимости линии электропередачи [9].

Двум возможным направлениям (видам компенсации индуктивного сопротивления линии) посредством сосредоточенных устройств и равномерно расположенной емкостной проводимости будут соответствовать свои технико-экономические показатели. Важно каждому выбранному параметру дать экономическую оценку.

Система передачи с установками продольной компенсации (УПК) традиционного типа будет по капитальным затратам уступать воздушной линии повышенной натуральной мощности (ПНМ) с увеличенным числом проводов в фазе при выполнении неравенства [6]

$$\frac{p^2 \sin \lambda}{P_{\text{нат}} \cos^2 \varphi} - (1-n) a_c 10^3 > \beta K_1 l, \quad (1)$$

где  $p$  – удельная передаваемая мощность;  $P_{\text{нат}}$  – натуральная мощность;  $\lambda$  – волновая длина передачи;  $n = \frac{z'_b}{z_b}$  – отношение волновых сопротивлений

линии с увеличенным числом проводов в фазе и традиционным числом проводов в фазе;  $K_1$  – стоимость 1 км традиционной линии передачи;  $a_c$  – стоимость 1 кВ·А УПК;  $\beta$  – коэффициент, показывающий, на сколько 1 км линии ПНМ дороже, чем 1 км традиционной линии;  $l$  – длина линии.

Провести сравнение по экономическим показателям двух рассматриваемых [10] технологий – FACTS и настройку линий на передаваемую мощность (ПНМ) – пока затруднительно ввиду отсутствия технико-экономических данных и спорности коэффициента  $\beta$ .

Продольная компенсация выбирается в сочетании с поперечной. При этом учитываются не

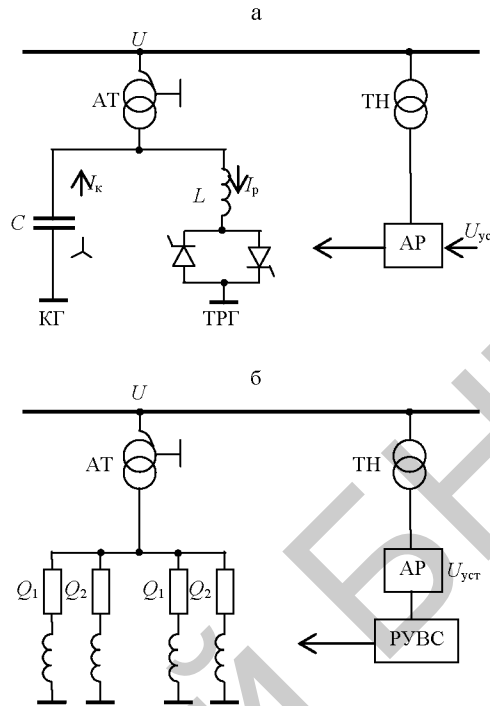


Рис. 1. Схемы тиристорных компенсаторов

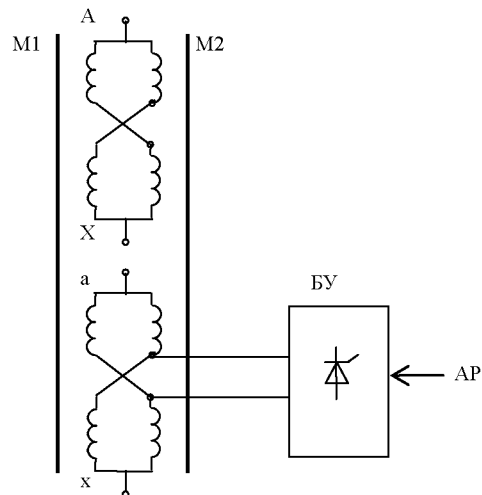


Рис. 2. Управляемый шунтирующий реактор с подмагничиванием (УШРП)

только устойчивость, но и распределение напряжения вдоль линии в различных режимах – напряжение на линии не больше допустимого превышения наибольшего рабочего напряжения. Оба вида указанных компенсирующих устройств в своем действии взаимосвязаны и выбирать их следует одновременно. Для пояснения методики [6] выбора последовательной и параллельной компенсаций по условиям устойчивости и ограничения напряжений линии на рис. 3 представлены зависимости удельной передаваемой мощности от параметров компенсирующих устройств:  $x_k$  – сопротивления продольной компенсации;  $b$  – проводимости поперечной компенсации для электропередачи длиной 2000 км.

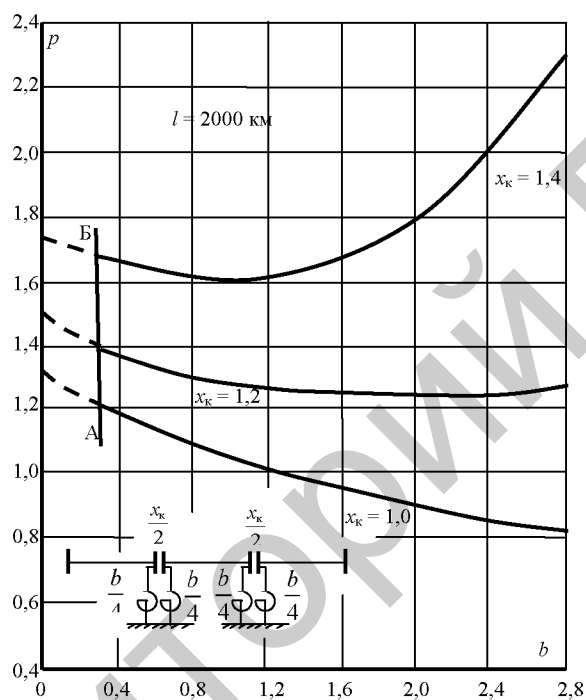


Рис. 3. Зависимость удельной передаваемой мощности от параметров компенсирующих устройств системы электропередачи

Все величины даны в относительных единицах на базе натуральной мощности и номинального напряжения линии. Линия АБ ограничивает по условиям превышения напряжения в режиме холостого хода. Превышений напряжения в рабочих режимах в данном случае нет. Устройства FACTS расширяют возможности компенсирующих устройств [2]. Прогресс, достигнутый в области мощных преобразовательных устройств нового класса на основе запираемых тиристоров и биполярных транзисторов, позволяет констатировать появление новых перспектив – использование современной силовой электроники в электроэнергетических системах для практически безынерционного в режиме online управления параметрами генерации, передачи и потребления приводит к качественно новым свойствам каждой из указанных структур в отдельности и электроэнергетической системы в целом.

## ВЫВОДЫ

1. Регулирование параметров электрических сетей – наиболее радикальное средство повышения дальности и мощности передачи, улучшения технико-экономических показателей электрических сетей. Можно указать два различных способа регулирования параметров электропередачи: во-первых, с помощью сосредоточенных устройств компенсации или настройки и, во-вторых, за счет равномерно распределенной собственной емкостной проводимости линий электропередачи [9]. Техно-экономическое преимущество вида регулирования определяется неравенством (1).

2. Среди средств повышения пропускной способности наилучшие технико-экономические показатели имеет продольная компенсация индуктивного сопротивления линий посредством статических конденсаторов.

3. Технология гибких электропередач FACTS развивается, требует внимания и нуждается в дальнейших исследованиях с учетом всех ранее проведенных разработок и эксплуатации электроэнергетических систем.

Настройка электропередачи на передаваемую мощность с помощью управляемых шунтирующих реакторов заслуживает внимания и практического использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмич, С. В. Повышение эффективности электроэнергетических систем и развитие управляемости в свете применения гибких электропередач FACTS / С. В. Кузьмич, Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 6. – С. 15–19.
2. Поспелова, Т. Г. Потенциальные области использования FACTS и АСМ в Белорусской энергосистеме / Т. Г. Поспелова // Энергия и менеджмент. – 2006. – № 4 (31). – С. 37–43.
3. Кошечев, Л. А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети / Л. А. Кошечев, В. А. Шлайфштейн // Электрические станции. – 2005. – № 12. – С. 30–38.
4. Поспелов, Г. Е. Об эффективности компенсации параметров ЛЭП и повышении их управляемости / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 2. – С. 5–9.
5. Александров, Г. Н. Об эффективности применения компенсирующих устройств на линиях электропередачи / Г. Н. Александров // Электричество. – 2005. – № 4. – С. 62–67.
6. Поспелов, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967.
7. Дементьев, Ю. А. Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях / Ю. А. Дементьев, В. Л. Кочкин, А. Г. Мельников // Электричество. – 2003. – № 9.
8. Александров, Г. Н. Передача электрической энергии переменным током / Г. Н. Александров. – М.: Знак, 1998.
9. Поспелов, Е. Г. О целесообразности степени уменьшения индуктивного сопротивления электропередачи / Е. Г. Поспелов, Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 2. – С. 20–28.
10. Технология гибких линий электропередачи и электропередач, настроенных на передаваемую мощность: дискуссия // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 63–76.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 12.03.2010