

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ FACTS-ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье показана эффективность применения СКРМ в сетях ЭЭС для стабилизации напряжения, повышения пропускной способности линий и снижение потерь электроэнергии.

Ключевые слова: facts-технология, электроэнергетика, напряжения, потерь электроэнергии.

THE EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF FACTS-TECHNOLOGY IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

The article shows the effectiveness of the SVC networks EEC in order to stabilize the voltage, increase the capacity of lines and reduction of power losses.

Keywords: facts-technology, energy, voltage, power losses.

Регулирование уровней напряжения и реактивной мощности как в системообразующих (220-500 кВ), так и в распределительных сетях (35-110кВ) представляет собой одну из важнейших задач, которые ежедневно решаются персоналом диспетчерских центров энергосистем, а также эксплуатационным персоналом электростанций и высоковольтных подстанций.

Режим напряжения энергообъединения во многом определяет надежность работы как самого энергообъединения, так и надежность электроснабжения отдельных потребителей.

Для электрической сети в целом требуется равенство генерации и потребления активной и реактивной мощности. Основным нормативным показателем поддержания баланса активной мощности в каждый момент времени является частота переменного тока, которая служит общесистемным критерием. А основным нормативным показателем поддержания баланса реактивной мощности в каждый момент времени является уровень напряжения. Поддержание оптимальных уровней напряжения на шинах подстанций обеспечивает минимизацию потерь активной мощности в электрических сетях и тем самым повышает эффективность функционирования энергообъединения [1].

При протяжении воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) создающим электрическое и магнитное поле, условия работы физических процессов в электромагнитном поле линии, которые определяют требования к устройствам компенсации их избыточной реактивной мощности, рассмотрены в [2].

Мощность электрического поля трехфазной линии длиной l определяют

$$Q_{эл.} = 3\omega C U_{\phi}^2 l \quad (1.1)$$

где U_{ϕ} – напряжение фазы линии относительно земли;

C – погонная емкость линии; $\omega = 2\pi f$.

Мощность магнитного поля трехфазной линии длиной l определяют

$$Q_{м.} = 3\omega L I^2 l \quad (1.2)$$

где I – ток протекающий по фазе линии; L – погонная индуктивность линии.

Мощность электрического поля линии мало изменяется из-за ограниченных пределов изменения напряжения. Мощность магнитного поля изменяется в широких пределах в соответствии с изменением тока. Это обстоятельство определяет режимные мероприятия по управлению работой электропередачи. Разность мощностей электрического и магнитного полей определяет реактивную мощность линии

$$Q = Q_{эл.} - Q_{м} \quad (1.3)$$

Что приводит при повышенной потреблении реактивной мощности из-за неоправданной (технически и экономически) дополнительной загруженности линий электропередачи, трансформаторных подстанций и распределительных пунктов потоками реактивной мощности, поставляемой потребителям показано через формулы, приведенные на рис. 1. По указанным (на рис. 1) видно, что производить и выдавать реактивную мощность нужно именно там, где она больше всего нужна. Традиционными источниками и потребителями реактивной мощности, за счет которых осуществляется компенсация избытков реактивной мощности в районах с высокими уровнями напряжения или, наоборот, генерация дополнительной реактивной мощности в районах с низкими напряжениями, являются неуправляемые шунтирующие реакторы и батареи статических конденсаторов [3].

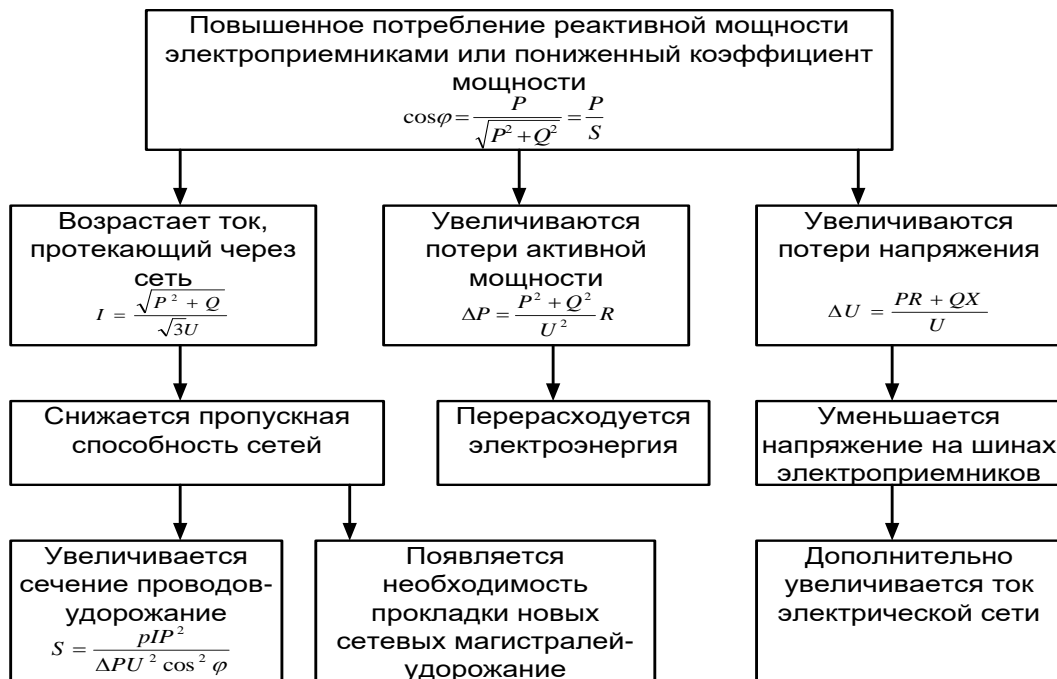


Рис. 1. Последствия повышенного потребления реактивной мощности.

Проведем тщательные сравнительные исследования об эффективности и управления шунтирующих реакторов (ШР) различного конструктивного исполнения для схемы рис. 1.[4] при следующих параметрах: длина участка ЛЭП $l=250$ км, волновая длина линии $\lambda=15^\circ$, класс напряжения ВЛ-220кВ, выбран реактор на компенсацию 50% зарядной мощности всех участков, напряжения по концам электропередачи равны номинальному значению $U_6=U_{ном}$, $Z_6=Z_{в}$ – волновое сопротивление линии.

Определим угол на участке δ и напряжение в точке подключения реактора U_p при передаче мощности равной натуральной $k=1$. Для получения эквивалентных параметров передачи с учетом ШР, представим схему в виде трех последовательно соединенных четырехполюсников (рис. 2). Тогда параметры эквивалентного четырехполюсника определим

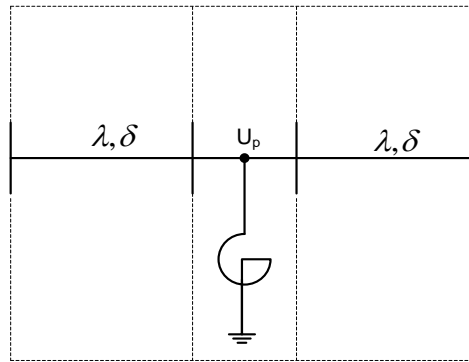


Рис.2. Продольная компенсация ШПР.

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_3 & \dot{B}_3 \\ \dot{C}_3 & \dot{D}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda & jz_g \sin \lambda \\ j \frac{\sin \lambda}{z_g} & \cos \lambda \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb_p & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \cos \lambda & jz_g \sin \lambda \\ j \frac{\sin \lambda}{z_g} & \cos \lambda \end{bmatrix}$$

где b_p – проводимость реактора

После преобразований получим продольный параметр линии (с учетом ШПР):

$$\dot{B}_3 = jz_g \sin 2\lambda + jb_p \sin^2 \lambda \quad \text{в относительных единицах} \quad B_3 = \sin 2\lambda + b_p^* \sin^2 \lambda$$

где b_p^* – проводимость реактора в относительных единицах.

$$b_p^* = 2 \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} = 2 \operatorname{tg} 7,5^\circ = 0,26 \quad B_3 = \sin 2 \cdot 15^\circ + 0,26 \sin^2 15 = 0,52$$

Определим угол δ сдвига напряжений начала и конца линии электропередачи на участке, откуда $\delta = \frac{0,52}{\sin 2} = 15,3$

Определим напряжение в месте установки реактора U_p^*

$$k = 1 = \frac{U_p^*}{\sin \lambda} \sin \delta = \frac{U_p^*}{\sin 15^\circ} \sin 15,3^\circ \quad \text{откуда} \quad U_p^* = \frac{\sin 15^\circ}{\sin 15,3^\circ} = 0,981$$

Находим реактивную мощность, потребляемую реактором из угловых характеристик

$$\text{мощности: } Q_p^* = 2 \frac{U_p^*}{\sin \lambda} (\cos \delta - U_p^* \cos \lambda) = 2 \frac{0,981}{\sin 15^\circ} (\cos 15,7^\circ - 0,981 \cdot \cos 15^\circ) = 0,12 (Q_p = 120 \text{ MVAp})$$

Потери активной мощности на длине λ при число проводов в фазе n принятым 3, погонное активное сопротивление $r_0 = 0,1$ Ом/км, $Z_b = 250$ Ом.

$$\Delta P_{\text{ШПР}}^* = \frac{k^2 + \left(\frac{Q_p^*}{2}\right)^2}{U_p^{*2}} r_n^* = \frac{1^2 + (0,06)^2}{0,981^2} \cdot 0,033 = 0,035$$

$$\text{где } r_n^* = \frac{r_0 \cdot l}{\frac{n}{1} Z_b} = \frac{0,1 \cdot 250}{3 \cdot 250} = 0,033 \quad \text{при установке УШП получим:}$$

$$\Delta P_{\text{УШП}}^* = \frac{1^2 + 0^2}{1^2} \cdot 0,033 = 0,033$$

Различие в потерях в именованных единицах:

$$\Delta P_{\text{ШПР}} - \Delta P_{\text{УШП}} = 2U_p^* \cdot (P_{\text{ШПР}}^* - P_{\text{УШП}}^*) = 2 \cdot 0,981 \cdot (0,035 - 0,033) = 3,9 \text{ MВт}$$

Учитывая потери активной мощности в ШР [4] из расчета 0,5 МВт на 3 фазы: потерями в УШР в режиме передачи натуральной мощности пренебрегаем. И так, различия в потерях составляет: $\Delta P_{ШР} - \Delta P_{УШР} = 3,9 + 0,5 = 4,4 \text{ МВт}$

При числе часов использования максимальной нагрузки $\tau_i = 6000$ часов получаем потери энергии: $\Delta W = 4,4 \cdot 6000 = 2,64 \cdot 10^4 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$

Эффективности применения управляемых шунтирующих реакторов показывают, что их целесообразно применять на высоковольтных подстанциях, так как является важным вспомогательным узлом, соединяющим сети передачи и распределения электроэнергии, а именно уменьшение мощности магнитного поля в пользу увеличения мощности электрического поля, вследствие чего удастся достичь уменьшения потерь при передаче натуральной мощности.

Важнейшей частью управляемых реакторов являются системы автоматического управления (САУ) [5] к которым предъявляются требования достаточного быстродействия и точности регулирования. Классификация устройств FACTS (управляемые (гибкие) системы электропередачи переменного тока) представлена на рис. 3., их общие технические характеристики и функциональные возможности даны в таблице 1 [6].

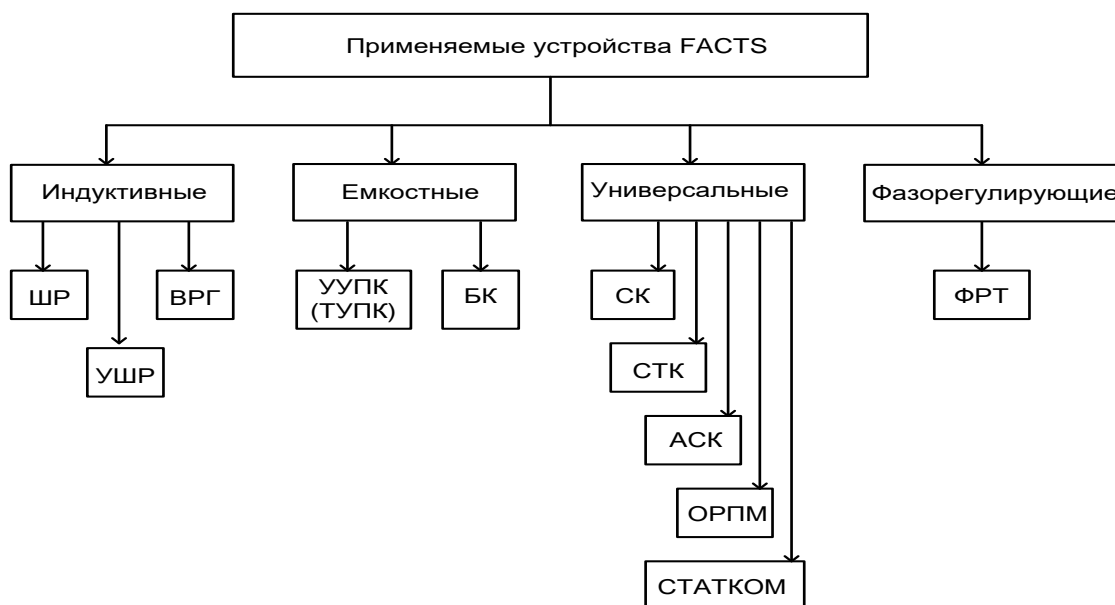


Рис.3. Классификация устройств FACTS

Условные обозначения и сокращения

ШР – Шунтирующий реактор; УШР – Управляемый шунтирующий реактор; ВРГ – Реакторные группы, коммутируемые выключатели; СК – Синхронные компенсаторы; СКТ – Статические тиристорные компенсаторы; СТАТКОМ – Статический компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения; ФПУ – Фазоповоротное устройство; АСК – Асинхронизированные компенсаторы; БСК – Батарея статических конденсаторов; УУПК, ТУПК – Управляемые устройства продольной компенсации, и тиристорно-управляемые устройства продольной компенсации; ОРПМ – Объединённые регуляторы потока мощности.

Технические характеристики и функциональные возможности FACTS

Задача	Проблема	Корректирующее действие	Устройство FACTS
Поддержание заданных ограничений по напряжению	Низкое напряжение при большой нагрузке	Выдача реактивной мощности	СТК, СТАТКОМ
		Уменьшение реактивного сопротивления ЛЭП	УПК
	Высокое напряжение при малой нагрузке	Потребление реактивной мощности	СТК, УШР
Ограничение токовых нагрузок	Перегрузка ЛЭП	Увеличение пропускной способности	УПК, ССПК, ИРМ, ОРПМ, ФПУ
Управление потоком мощности	Параллельные потоки	Корректировка реактивных сопротивлений линий	УПК, ССПК, ОРПМ
Ограничение тока КЗ	Большой ток КЗ	Ограничение тока КЗ	УШР, ОРПМ
Повышение устойчивости	Ограниченная пропускная способность	Уменьшение реактивного сопротивления ЛЭП. Поддержание напряжения	УПК, ССПК, ОРПМ, СТАТКОМ, УШР, СТАТКОМ

При этом важно отметить, что ни одно из устройств FACTS индивидуально не обладает максимальной степенью эффективности в отношении перечисленных задач управления ЭЭС на шинах высоковольтных подстанций. Максимальная эффективность может быть достигнута только путем их комплексного использования [7] рис.4.

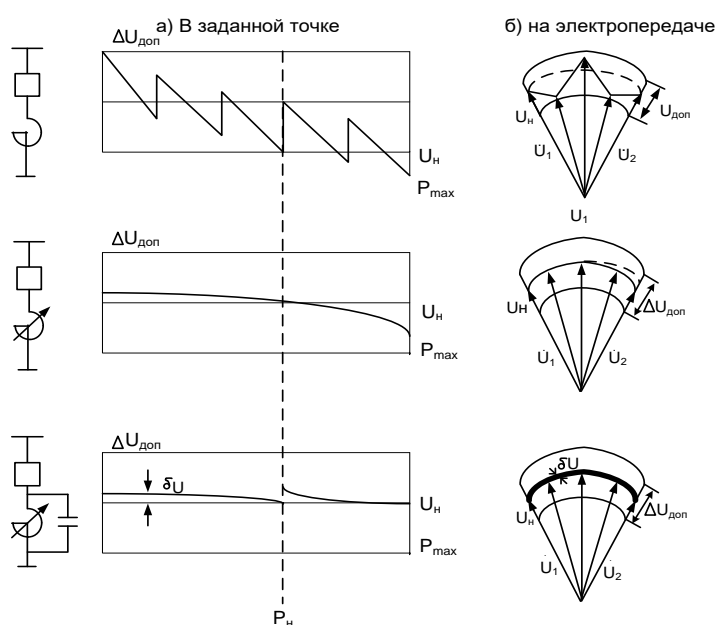


Рис. 4. Эффективность FACTS для нормализации напряжения сети.

Благодаря этому удастся в темпе процесса управлять значением пропускной способности линии электропередачи, перераспределять между параллельными линиями электропередачи потоки активной мощности, оптимизируя их в установившихся режимах и перенаправлять их по сохранившимся после аварий линиям электропередачи, не опасаясь нарушениям устойчивости, тем самым, обеспечивая повышение надежности электроснабжения потребителей.

Использования средств регулирования оценим еще регулирующим воздействием на характеристики линии электропередачи, на ее пропускную способность. Предел передаваемой по линии мощности, являющейся показателем величины пропускной способности линий электропередачи, который определяется выражением

$$P_{\max} = \frac{|\dot{U}_1| \cdot |\dot{U}_2|}{Z_c \cdot \sin \alpha_0 l} \cdot \sin \delta. \quad (1.4)$$

При этом они оказывают влияние:

- на напряжение в начале (\dot{U}_1) и в конце (\dot{U}_2) линии электропередачи (УШР, ИРМ, СТК, СТАТКОМ и др.);
- на величину угла (δ) сдвига напряжений начала и конца линии электропередачи (тиристорно-управляемые последовательно включенные компенсаторы).

Обращаем внимание, что указанные средства FACTS не могут воздействовать на значение волнового сопротивления линии (Z_c), величина которого зависит от удельного сопротивления и удельной емкостной поперечной проводимости, типа линии и конструкции. Из указанного параметра определяют волновую длину линии ($\alpha_0 l$).

Из формулы (1.4) видно, что эффект от регулирующих воздействий находится в обратной пропорциональной зависимости от величины (Z_c), т.е. чем меньше величина (Z_c), тем больший эффект P_{\max} линии электропередачи при одном и том же регулирующем воздействии. Зависимость регулирующего эффекта при изменении волнового сопротивления (Z_c) в относительных величинах в пределах от 0,5 до 1,0 значений составим таблицу 2.

Таблица 2

Наименование	Значение волнового сопротивления линии (Z_c), отн. ед.					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Регулирующий эффект, отн. ед.	2,0	1,66	1,42	1,25	1,11	1,0

Из приведенных в таблице 2 видно, что если у линии новой конструкции волновое сопротивление меньше на 30%, чем у аналогичной, то применение средств регулирования в 1,42 раза будет эффективнее (рис.5). Для достижения эффекта для линий электропередач с разными значениями волнового сопротивления, с меньшим (Z_c) потребуется меньшая мощность, а соответственно и меньшая стоимость средств регулирования.

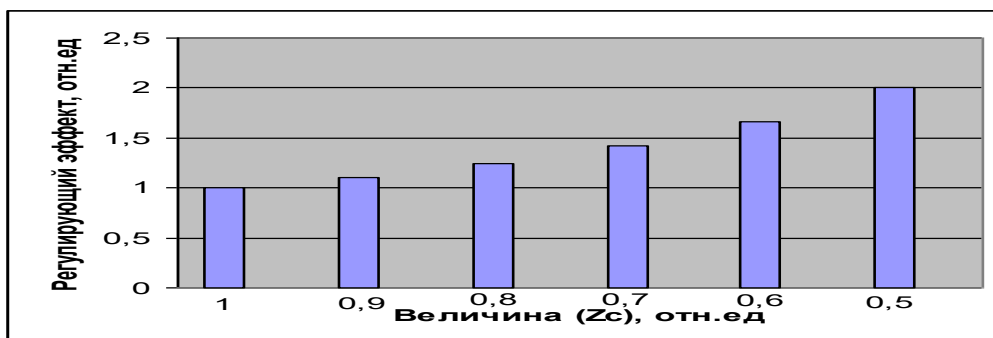


Рис. 5. Зависимость относительного регулирующего эффекта от изменения величины волнового сопротивления линии электропередачи (Z_c).

Проведенный анализ позволяет создавать эффективные управляемые линии электропередачи, применив современные средства FACTS и новые технические решения в области совершенствования линий электропередач.

Проблема использования этой современной техники, обладающей эксплуатационными качествами нового уровня, очень актуальна и принято решение о внедрения ее в производство в Национальной электрической сети Кыргызстана. Это повысит устойчивость электроэнергетической системы, качество электрической энергии, поддержание заданного уровня напряжения в узлах ЭЭС, и эксплуатационную надежность работы высоковольтной подстанции.

Выводы:

- Применение FACTS- технологии направлено на повышение надежности электроснабжения потребителей. В частности, благодаря разгрузке электрической сети от перетоков реактивной мощности, при этом повысилась пропускная способность сети при одновременном снижении потери электроэнергии.
- Средства компенсации реактивной мощности (СКРМ) FACTS-технологии обеспечивает эффективное адаптивное управления высоковольтных подстанциях при различных эксплуатационных режимах с изменяющимися корректирующими значениями.

Литература:

1. Паули, В.К. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии [Текст] /В.К.Паули, Р.А.Воротников // Информ.-аналит. журн. Энергоэксперт. -2007. - №2. – С. 16-22.
2. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током. –Л.: Энергоатомиздат, 1990. –176С.
3. Компенсация реактивной мощности – актуальная задача энергосбережения [Текст] /А.В.Максимов, В.К.Паули, М.П.Бычкова, Р.А.Воротников// Электро. - 2009. - № 3. - С.7-10.
4. Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для сети 25-500кВ [Текст] /Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Липатов Ю.А., Лурье А.И., Маклецова Е.Е.// Электротехника. - 2003. - № 1.
5. Забудский, Е.И. Стабилизация напряжения электросети на основе однокристалльной микро ЭВМ [Текст] /Е.И.Забудский // Сб. науч. тр. повышение эффективности функционирования систем электроэнергетики сельского хоз-ва. – М., 2001. - С. 50-69.
6. Шакарян, Ю.Г. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока (Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS) [Текст] /Ю.Г.Шакарян. – М.: ОАО «ВНИИЭ», 2009. - 41с.
7. Кадыров, А.С. Устройства стабилизации напряжения сети 110-500кВ на базе управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов и батарей конденсаторов [Текст] /А.С. Кадыров //Изв. ВУЗов. – Бишкек, 2010. - №7. - С.3-6.