

## УСТАНОВКИ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ (УПК) ЛИНИЙ 500 кВ

Sobitxo'jayev Shaxzodxo'ja Sobitxo'ja o'g'li

<https://doi.org/10.5281/zenodo.6667673>

**Аннотация.** В статье показано, что применение УПК связано с ограничениями, определяемыми отклонениями напряжения в узлах их примыкания. Значительная реактивная мощность, генерируемая емкостью УПК при протекании рабочих токов, требует применения устройств поперечной компенсации.

**Ключевые слова:** УПК, линия, емкость, установка, ЛЭП, напряжения.

## INSTALLATIONS OF LONGITUDINAL CAPACITIVE COMPENSATION (UPK) LINES 500 KV

**Annotation.** The article shows that the use of the CPC is associated with limitations determined by voltage deviations in the nodes of their junction. Significant reactive power generated by the capacitance of the CPC during the flow of operating currents requires the use of transverse compensation devices.

**Key words:** CPC, line, capacitance, installation, transmission line, voltage.

### ВВЕДЕНИЕ

Установка продольной компенсации (УПК) способна существенно (на 30—50 %) увеличить пропускную способность линии электропередачи, заметно сокращает взаимный угол между напряжениями на шинах отправной и приемной частей системы, повышая уровень устойчивости. Стоимость конденсаторной группы УПК составляет обычно небольшую часть от стоимости новой ЛЭП, при этом время сооружения УПК намного меньше, чем ЛЭП. Как показывает практика, срок окупаемости капиталовложений для УПК обычно составляет всего лишь несколько лет, в отличие от срока сооружения новых линий.

Однако упрощенное объяснение эффективности УПК только уменьшением продольного индуктивного сопротивления линии электропередачи является недостаточным.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Большая сосредоточенная емкость УПК, генерирующая реактивную мощность пропорционально квадрату тока, приводит к значительному изменению уровней напряжений в узлах, что обуславливает необходимость применения поперечно включенных шунтирующих устройств.<sup>1</sup> До настоящего времени для этой цели использовались неуправляемые шунтирующие реакторы (ШР). Многообразие режимов работы электропередачи поставило вопрос о целесообразности применения в качестве компенсирующих устройств управляемых шунтирующих реакторов (УШР).

Основная идея продольной емкостной компенсации заключается в уменьшении полного продольного индуктивного сопротивления электропередачи. Математически этому соответствует уменьшение величины индуктивного сопротивления линии  $X$  в

<sup>1</sup> Lyamov A., Makarova M., Smolovik S.V. Controllable shunt reactor deployment effect on power station stability indices // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, 2015. с. 1—4.

выражении  $P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta$  характеризующем передаваемую по отдельной линии мощность. Рассмотрим простейшую модель линии с продольной емкостной компенсацией. Эффективное сопротивление линии  $X_{эф}$  определяется выражением

$$X_{эф} = X - X_c, \text{ или}$$

$$X_{эф} = (1 - \eta_c) X,$$

где  $\eta_c$  называется степенью продольной компенсации;

$$\eta_c = X_c / X, \quad 0 \leq \eta_c < 1.$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При допущении о равенстве напряжений  $U_1 = U_2 = U$  активная и реактивная мощности компенсированной линии могут быть рассчитаны по следующим формулам:<sup>2</sup>

$$P = \frac{U^2}{(1 - \eta_c) X} \sin \delta;$$

$$Q = \frac{U^2}{(1 - \eta_c) X} - \frac{U^2}{(1 - \eta_c) X} \cos \delta.$$

Тогда квадрат тока компенсированной линии может быть выражен следующим образом:

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = \left( \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \sin^2 \delta + \right. \\ &+ \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} - 2 \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cos \delta + \\ &\left. + \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cos^2 \delta \right) / U^2 = \\ &= \left( \frac{2U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} - 2 \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cos \delta \right) / U^2 = \\ &= 2 \frac{U^2}{(1 - \eta_c)^2 X^2} (1 - \cos \delta). \end{aligned}$$

Тогда выражение, определяющее реактивную мощность, генерируемую продольно включенной емкостью, можно записать так:

$$Q_c = I^2 X_c = \frac{2U^2}{X} \frac{\eta_c}{(1 - \eta_c)^2} (1 - \cos \delta).$$

Взаимосвязь между активной мощностью  $P$ , реактивной мощностью продольного конденсатора  $Q_c$  и углом  $\delta$  показана на рис. 1, для различных значений степени продольной компенсации  $\eta_c$ .

<sup>2</sup> Беляев А.Н., Смоловик С.В. О быстродействии управляемых шунтирующих реакторов с точки зрения статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем // Электрические станции. 2014. № 1. С. 27—30.

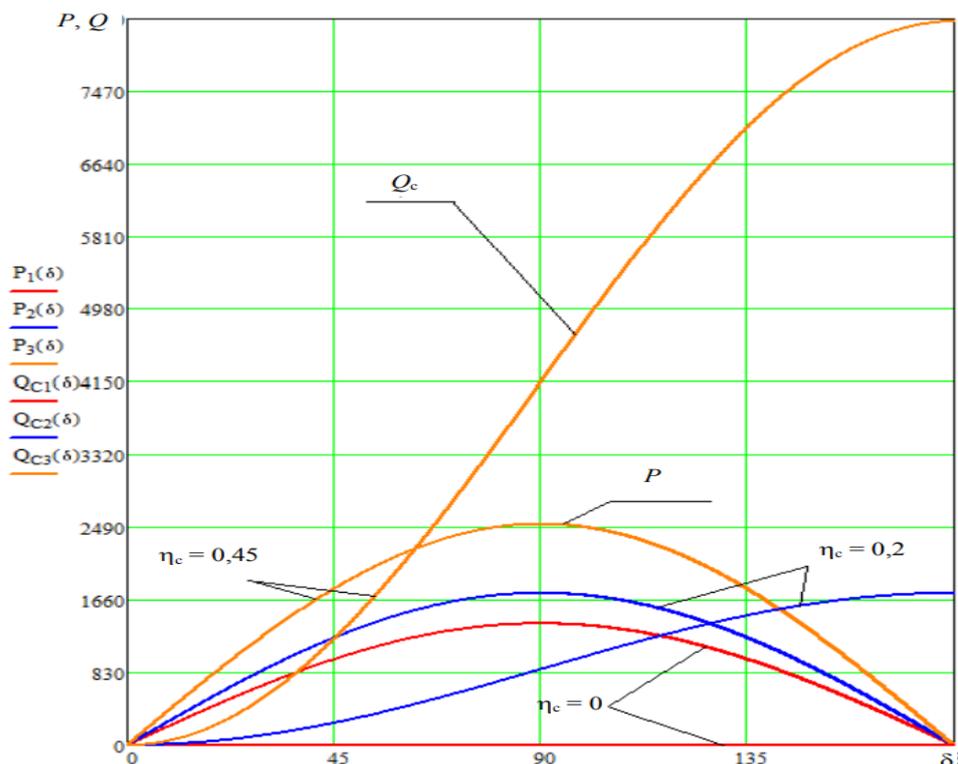


Рис. 1. Характеристики мощности компенсированной линии и реактивная мощность продольного конденсатора в функции угла  $\delta$

Как и ожидалось, с увеличением степени продольной компенсации  $\eta_c$  передаваемая по линии мощность быстро увеличивается и, аналогично, также резко увеличивается генерируемая продольным конденсатором реактивная мощность, таким же образом, как и реактивная мощность линии,  $\delta$  которая изменяется с углом.

Полученные простые соотношения, характеризующие продольно-емкостную компенсацию, демонстрируют недостаточность приведенных физических объяснений эффективности УПК тем, что сопротивление продольного компенсирующего конденсатора погашает часть фактического реактивного сопротивления линии и, таким образом, эффективное сопротивление передачи в выражении уменьшается, как в случае физического уменьшения длины линии.

Следует учесть, что существенным фактором является значительная реактивная мощность, генерируемая конденсаторной батареей и заметно влияющая на величины напряжений на ее выводах.

На рис. 2 представлена векторная диаграмма токов и напряжений во всех точках электропередачи 500 кВ длиной 687 км при передаче мощности  $1,3P_n$  при подключении неуправляемых реакторов в узлах 2 и 4 с проводимостью  $-0,2$  о.е.

Напряжения в узлах и проводимости реакторов следующие:  $U_1 = 1,008$  о.е.;  $U_2 = 1,082$  о.е.;  $U_3 = 0,933$  о.е.;  $U_4 = 0,811$  о.е.;  $U_5 = 1,0$  о.е.;  $V_{r1} = -0,2$  о.е.;  $V_{r2} = -0,2$  о.е.<sup>3</sup>

Возможность изменения потребляемой реактивной мощности — важное свойство управляемых реакторов, так как нерегулируемая поперечная индуктивная компенсация

<sup>3</sup> Manjusha K., Balamurugan S., Kirthika N. Real power flow control in transmission system using TCSC // 2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE). Bangalore, 2016. с. 1—5.

всегда уменьшает эквивалентную натуральную мощность линии. К тому же, регулируемые реакторы решают очень важные задачи дальних электропередач — поддержание статической и повышение уровня динамической устойчивости режимов, близких к режиму передачи натуральной мощности.

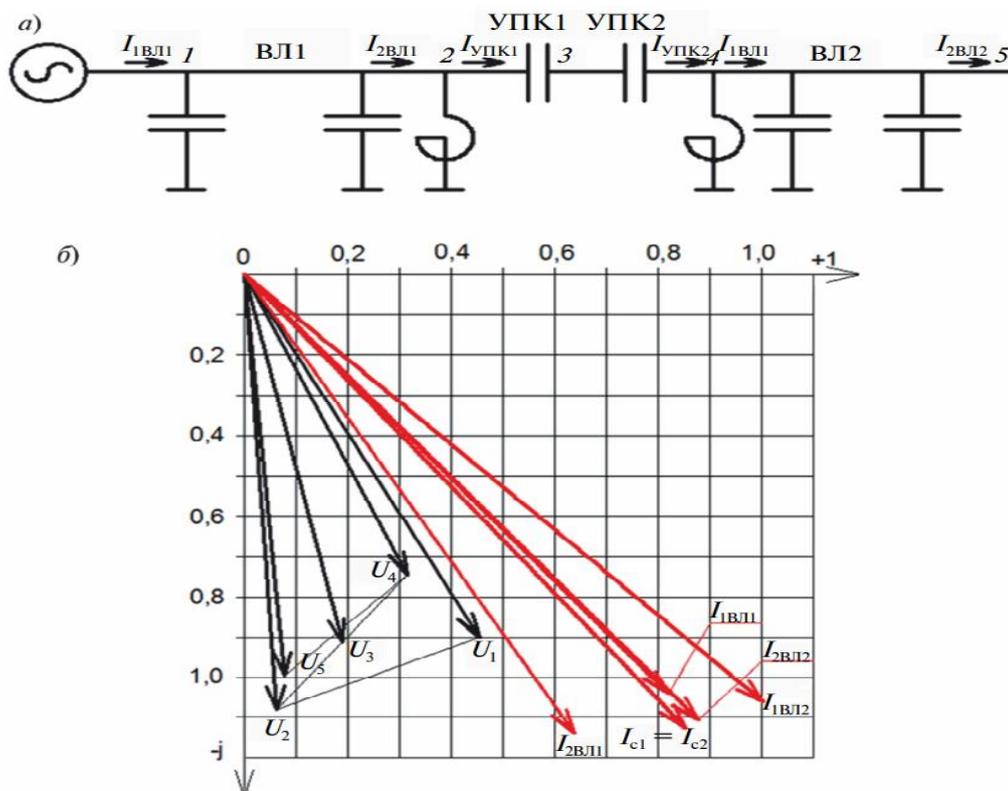


Рис. 2. Схема электропередачи с ШР (а) и векторная диаграмма (б) токов и напряжений при передаче мощности  $1,3P_n$

Результаты расчетов линии 500 кВ длиной 687 км с установкой УШР по концам УПК схожи с расчетами, представленными ранее для неуправляемых ШР. Однако при установке УШР генерация реактивной мощности УПК оказывается ниже. Еще одно из преимуществ использования УШР — плавное регулирование мощности, в то время как обычные ШР необходимо коммутировать при изменении передаваемой мощности, что приводит к скачкам напряжения.

Применение устройств продольной компенсации имеет ограничения, определяемые отклонениями напряжения в узлах их примыкания. Значительная реактивная мощность, генерируемая емкостью УПК при протекании рабочих токов, требует применения устройств поперечной компенсации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Находящиеся в эксплуатации УПК используют для этой цели только неуправляемые шунтирующие реакторы. В случае необходимости компенсации индуктивного сопротивления протяженных ВЛ целесообразен переход к использованию нескольких УПК с уменьшенным емкостным сопротивлением каждой из них. Регулирование реактивной мощности при изменении загрузки линии и управление уставками УШР по напряжению может способствовать существенному увеличению их

пропускной способности.<sup>4</sup> При существующей структуре ценообразования на линейное и подстанционное оборудование повышение пропускной способности линии за счет сооружения УПК более выгодно, чем за счет применения глубокого расщепления проводов ВЛ.

#### Литературы:

1. Lyamov A., Makarova M., Smolovik S.V. Controllable shunt reactor deployment effect on power station stability indices // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, 2015. с. 1—4.
2. Беляев А.Н., Смоловик С.В. О быстродействии управляемых шунтирующих реакторов с точки зрения статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем // Электрические станции. 2014. № 1. С. 27—30.
3. Manjusha K., Balamurugan S., Kirthika N. Real power flow control in transmission system using TCSC // 2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE). Bangalore, 2016. с. 1—5.
4. Александров Г.Н. Передача электрической энергии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 411 с.

---

<sup>4</sup> Александров Г.Н. Передача электрической энергии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 411 с.