

## Пропускная способность дальних электропередач с установкой продольной компенсации

САМОРОДОВ Г.И., КРАСИЛЬНИКОВА Т.Г., КОШЕВОЙ К.Э.

*Рассматривается методика обоснования пропускной способности дальней электропередачи, оснащённой установкой продольной емкостной компенсации. В качестве ограничений на пропускную способность дальней электропередачи приняты обеспечение нормированного запаса по статической устойчивости и допустимого напряжения вдоль линии в характерных режимах холостого хода и передачи максимальной мощности, соответствующей пропускной способности дальней электропередачи. В качестве сравниваемых вариантов рассматриваются электропередача с двухцепной линией и электропередача с одноцепной линией, оснащенная продольной емкостной компенсацией, которые характеризуются одинаковой пропускной способностью. Обоснование пропускной способности иллюстрируется на примере дальней электропередачи 500 кВ длиной 1000 км. Рассматриваются варианты с установкой одного устройства продольной емкостной компенсации в середине линии и при установке двух устройств продольной емкостной компенсации в средней части линии.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** дальняя электропередача, шунтирующий реактор, пропускная способность, статическая устойчивость, режим холостого хода, режим максимальной мощности

Дальние электропередачи (ДЭП), оснащенные установкой продольной компенсации (УПК), находят применение в нашей стране и за рубежом [1–8]. Одним из основных показателей ДЭП является их пропускная способность, другими словами допустимая активная мощность, которую можно передать с учётом всех ограничений [9].

Пропускная способность ДЭП может ограничиваться двумя условиями:

обеспечением статической устойчивой станции, работающей на ДЭП; допустимым уровнем напряжения вдоль линии в нормальных режимах.

Разработка методики, позволяющей обоснованно определить пропускную способность ДЭП с УПК, представляет несомненный интерес.

**Влияние УПК на пропускную способность ДЭП.** Пропускная способность (допустимая передаваемая мощность) ДЭП по условию статической устойчивости по [10]:

$$P_{\text{доп}}^{\text{уст}} = \frac{P_{\text{пр}}^{\text{уст}}}{1 + K_{\text{зап}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{пр}}^{\text{уст}}$  – предельная мощность, определяемая максимумом угловой характеристики;  $K_{\text{зап}} \geq 0,2$  – нормируемый коэффициент запаса по статической устойчивости.

Пропускная способность по допустимому уровню напряжений вдоль линии в нормальных режимах  $P_{\text{доп}}^{\text{нап}}$  определяется из условия, когда макси-

мальные напряжения на линии во всём диапазоне передаваемых мощностей не должны превышать максимального рабочего напряжения:

$$U_{\text{max}} (0 \leq P \leq P_{\text{доп}}^{\text{нап}}) \leq U_{\text{н.р.}} \quad (2)$$

Для линий длиной менее 500 км ограничение по режиму напряжений не является определяющим, однако с увеличением длины это ограничение может стать основным. В результате пропускная способность ДЭП определится минимальным значением, получаемым из двух ограничений:

$$P_{\text{доп}} = \min(P_{\text{доп}}^{\text{уст}}, P_{\text{доп}}^{\text{нап}}). \quad (3)$$

На рис. 1 приведена обобщённая схема ДЭП. При учёте активных потерь в линии предельная и допустимая мощности определяются на основе следующих соотношений:

$$P_{\text{пр}}^{\text{уст}} = E^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + E U Y_{12} \sin(\delta_{\text{max}} - \alpha_{12}); \quad (4)$$

$$P_{\text{доп}}^{\text{уст}} = E^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + E U Y_{12} \sin(\delta'_0 - \alpha_{12}),$$

где  $\dot{Y}_{11} = \dot{D}_{s2} / \dot{B}_{s2}$  – собственная проводимость схемы;  $Y_{11} = |\dot{Y}_{11}|$ ;  $\alpha_{11} = \frac{\pi}{2} - \arg(1 / \dot{Y}_{11})$ ;  $\dot{B}_{s2} = \dot{B} + iXD$ ,  $\dot{D}_{s2} = \dot{D}$  – коэффициенты четырехполюсника  $s2$ ;  $\dot{Y}_{12} = 1 / \dot{B}_{s2}$  – взаимная проводимость схемы;  $Y_{12} = |\dot{Y}_{12}|$ ;  $\alpha_{12} = \frac{\pi}{2} - \arg(1 / \dot{Y}_{12})$ ;  $\delta_{\text{max}}$  – угол, при котором имеет место предельная мощность;  $\delta'_0$  – угол, при котором имеет место допустимая мощность.

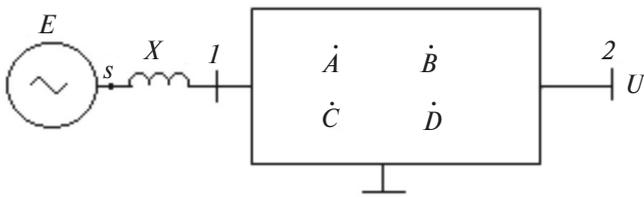


Рис. 1. Обобщенная схема дальней электропередачи

Учитывая, что  $\delta_{\max} - \alpha_{12} = \pi/2$ ,  $\delta'_0 - \alpha_{12} = \delta_0$ , где  $\delta_0$  – угол, при котором имеет место допустимая мощность в случае идеальной линии, т.е. без учета активных потерь, соотношение (1) перепишем в следующем виде:

$$1 + K_{\text{зап}} = \frac{P_{\text{пр}}^{\text{уст}}}{P_{\text{доп}}^{\text{уст}}} = \frac{1}{\sin \delta_0} \frac{(EY_{11} \sin \alpha_{11} / UY_{12}) + 1}{(EY_{11} \sin \alpha_{11} / UY_{12} \sin \delta_0) + 1}$$

Учитывая, что  $(EY_{11} \sin \alpha_{11} / UY_{12}) = 1$  и  $(EY_{11} \sin \alpha_{11} / UY_{12} \sin \delta_0) = 1$ , предыдущее соотношение с достаточной точностью запишется как

$$1 + K_{\text{зап}} = \frac{1}{\sin \delta_0}$$

Это означает, что запас по статической устойчивости можно оценить без учёта активных потерь, и соответственно допустимая мощность

$$P_{2\text{доп}}^{\text{уст}} = \frac{EU}{(1 + K_{\text{зап}})(B + XD)}, \quad (5)$$

где  $B, D$  – соответствующие коэффициенты идеальной линии (индекс «2» означает, что допустимая мощность рассчитывается относительно приёмного конца ДЭП).

Сопротивление отправной станции в общем случае можно оценить как

$$X = X_{\text{отн}} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{1\text{доп}}}, \quad (6)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение ДЭП;  $S_{1\text{доп}}$  – полная допустимая мощность относительно отправного конца линии;  $X_{\text{отн}} = X'_d + X_{\text{тр}} \approx 0,5$  – относительное сопротивление отправной станции, включающее сопротивление генераторов ( $X'_d$ ) и трансформаторов.

Учитывая, что  $S_{1\text{доп}} = P_{1\text{доп}} / \eta \cos \varphi$ , где  $\eta = 0,92 \div 0,98$  – коэффициент полезного действия ДЭП,  $\cos \varphi \approx 0,85$ , сопротивление отправной станции представим в виде

$$X = \frac{N}{P_{2\text{доп}}^{\text{уст}}}, \quad (7)$$

где  $N = X_{\text{отн}} U_{\text{ном}}^2 \eta \cos \varphi \approx 10^4$  (при  $U_{\text{ном}} = 500$  кВ).

С учётом (7) соотношение (5) разрешится относительно допустимой мощности  $P_{2\text{доп}}^{\text{уст}}$  следующим образом:

$$P_{2\text{доп}}^{\text{уст}} = \frac{EU}{(1 + K_{\text{зап}})B} - N \frac{D}{B}. \quad (8)$$

Далее проведём анализ значений допустимой мощности для схем рис. 2, принимая минимальный коэффициент запаса по статической устойчивости  $K_{\text{зап}} = 0,2$ .

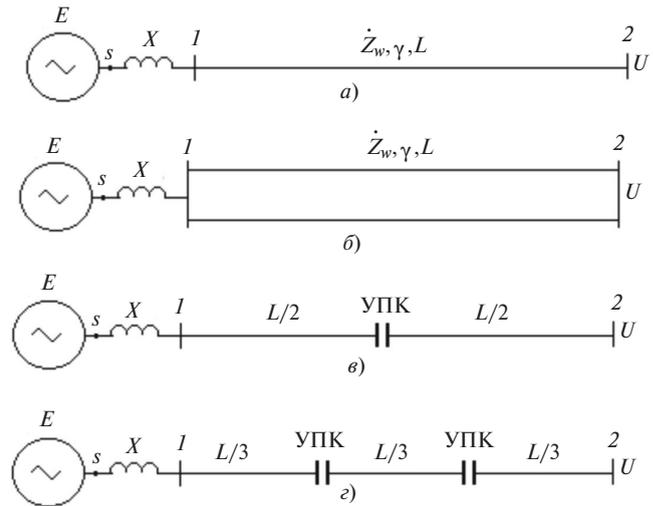


Рис. 2. Рассматриваемые схемы ДЭП; а – одноцепная линия; б – двухцепная; в – одноцепная линия с одной УПК в середине линии; з – одноцепная линия с двумя УПК в средней части линии

На рис. 3 приведены зависимости допустимой мощности от длины по условию статической устойчивости для схем на рис. 2. Здесь и в дальнейшем расчеты проводятся для ДЭП класса 500 кВ.

Далее рассмотрим обеспечение за счет УПК допустимой мощности по условию статической устойчивости для одноцепных схем на рис. 2, в и з такой же, как и для двухцепной схемы на рис. 2, б, принимая для определённости длину линии  $L = 1000$  км. Пропускная способность схемы рис. 2, б при длине линии 1000 км составляет согласно рис. 3  $P_{2\text{доп}}^{\text{уст}} = 1470$  МВт.

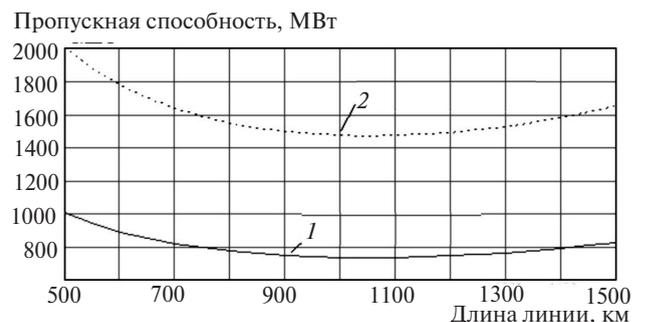


Рис. 3. Зависимость допустимой мощности от длины линии по условию статической устойчивости для схем на рис. 2, а и б: 1 – одноцепная линия; 2 – двухцепная

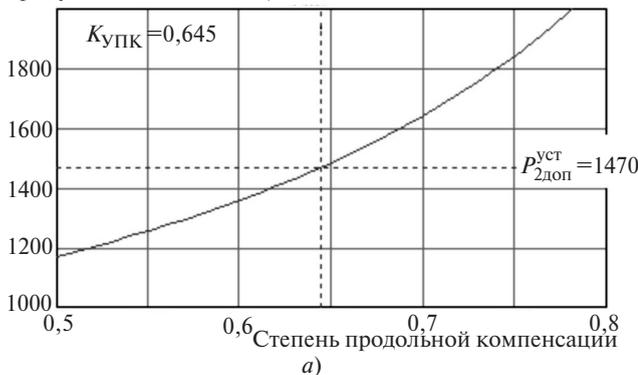
Степень продольной емкостной компенсации, которая обеспечивается отдельной УПК, обычно определяется как

$$K_{\text{упк}} = \frac{X_{\text{упк}}}{X_L}, \quad (9)$$

где  $X_{\text{упк}}$  – емкостное сопротивление УПК;  $X_L = Z_w \beta L$  – суммарное индуктивное сопротивление линии ( $Z_w, \beta$  – волновое сопротивление и коэффициент фазы линии).

На основе соотношения (8) на рис. 4 приведена зависимость допустимой мощности от степени емкостной компенсации, обеспечиваемой отдельной УПК, а также определена степень компенсации, при которой обеспечивается такая же пропускная способность, как и для схемы на рис. 2,б:  $P_{2\text{доп}}^{\text{уст}} = 1470$  МВт.

Пропускная способность, МВт



Пропускная способность, МВт

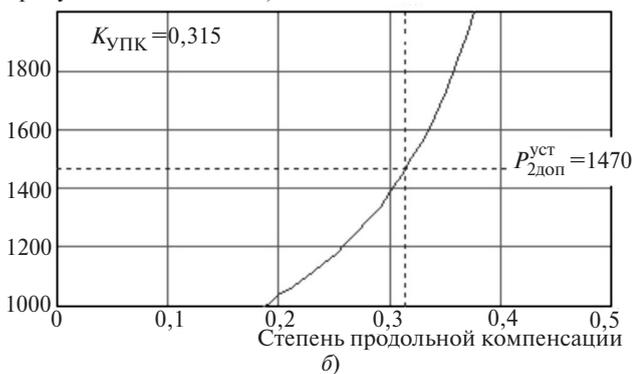


Рис. 4. Определение степени емкостной компенсации, при которой обеспечивается такая же пропускная способность, как и для схемы на рис. 2,б: а – схема с одной УПК (рис. 2,б); б – схема с двумя УПК (рис. 2,в)

**Анализ нормальных режимов при одной УПК в середине линии.** Рассмотрим, какие ограничения накладывает режим напряжений в нормальных режимах на пропускную способность ДЭП. Характерными нормальными режимами являются режим холостого хода и режим передачи максимальной мощности, значение которой соответствует пропускной способности ДЭП.

Примем, что в режиме передачи максимальной мощности на приемном конце поддерживается номинальное напряжение, а на отправном конце линии – максимальное рабочее напряжение, что соответствует допустимому перепаду напряжений на линии, при котором имеют место минимальные активные потери на линии. В режиме холостого хода на обоих концах линии принимается номинальное напряжение. При заданных напряжениях по концам линии и активной мощности на приёмном конце определяется угловой сдвиг на линии:

$$\delta = -\arccos\left(\frac{|B|}{U_2 U_1} \left(P_2 + \operatorname{Re} \frac{\bar{A}}{B} U_2^2\right)\right) + \arg B. \quad (10)$$

Далее, приняв  $\dot{U}_2 = U_2 e^{i0}$ ,  $\dot{U}_1 = U_2 e^{i\delta}$ , найдём полную мощность на приёмном конце линии:

$$S_2 = U_2 \frac{\bar{U}_1 - \bar{A} U_2}{B}.$$

При известных режимных параметрах на приёмном конце линии рассчитывается режим напряжений вдоль линии согласно уравнению длинной линии:

$$\dot{U}(x) = \dot{A}(x) U_2 + \dot{B}(x) \frac{\bar{S}_2}{U_2}, \quad (11)$$

где  $\dot{A}(x), \dot{B}(x)$  – соответствующие коэффициенты участков линии, определяемые в направлении от начала линии.

На рис. 5 приведено распределение напряжений вдоль линии в режиме холостого хода. Допустимый уровень напряжений обеспечивается лишь при использовании шунтирующих реакторов.

На рис. 6 приведено распределение напряжений вдоль линии в режиме передачи максимальной мощности.

Как следует из рис. 6, установка шунтирующих реакторов по концам УПК независимо от их числа не решает проблему обеспечения допустимого уровня напряжений на линии. Единственное решение заключается в снижении максимальной передаваемой мощности, т.е. в уменьшении пропускной способности ДЭП. Допустимый уровень напряжений обеспечивается, как это показано на рис. 7, при максимальной передаваемой мощности, равной 950 МВт, т.е. пропускная способность снижается на 35%. При этом на каждом конце УПК должно быть установлено не менее двух реакторов.

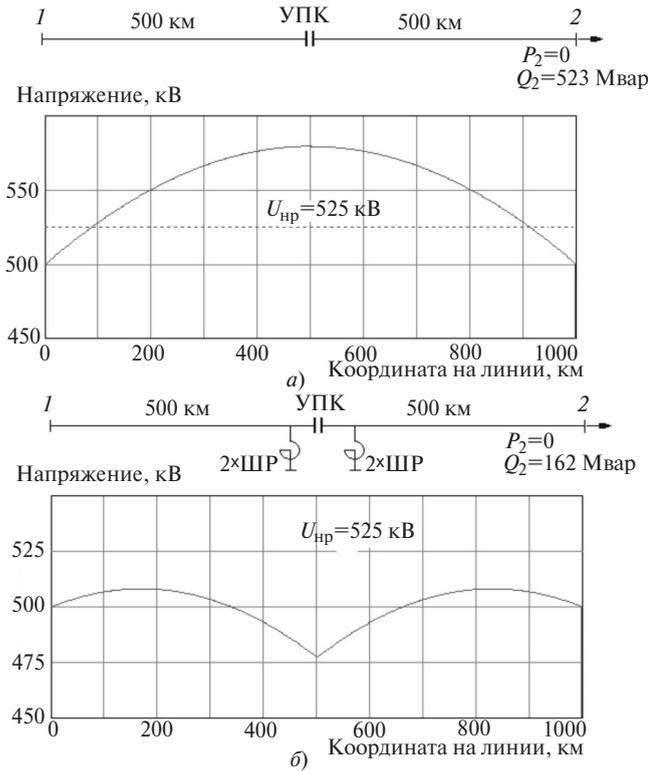


Рис. 5. Распределение напряжений вдоль линии в режиме холостого хода: а – без шунтирующих реакторов по концам УПК; б – по два шунтирующих реактора по концам УПК

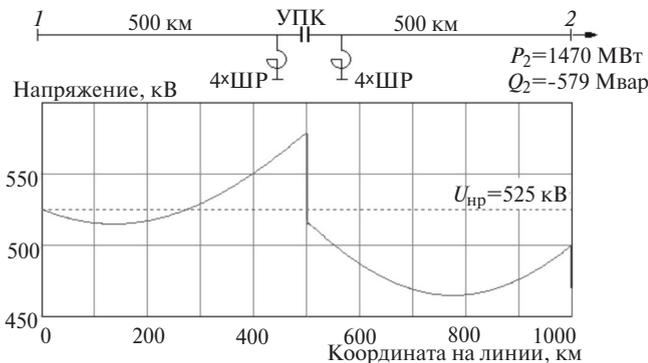


Рис. 6. Распределение напряжения вдоль линии в режиме передачи максимальной мощности при установке четырех шунтирующих реакторов на каждом конце УПК

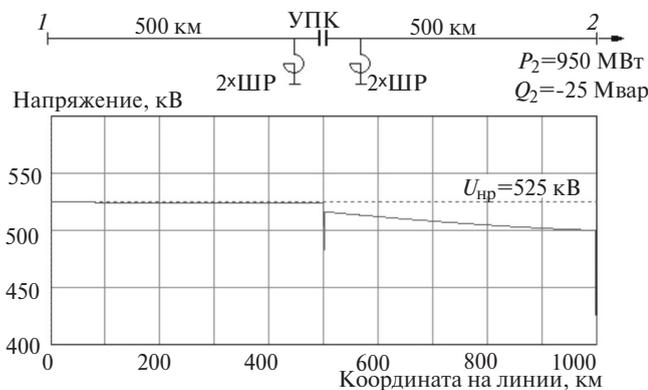


Рис. 7. Распределение напряжения вдоль линии при снижении максимальной передаваемой мощности до 950 МВт (установлено по два шунтирующих реактора на каждом конце УПК)

**Анализ нормальных режимов при двух УПК в средней части линии.** Анализ режима напряжений на линии осуществляется подобно вышерассмотренному случаю с использованием соотношения (11).

На рис. 8 приведено распределение напряжений вдоль линии в режиме холостого хода. Допустимый уровень напряжений обеспечивается лишь при использовании шунтирующих реакторов.

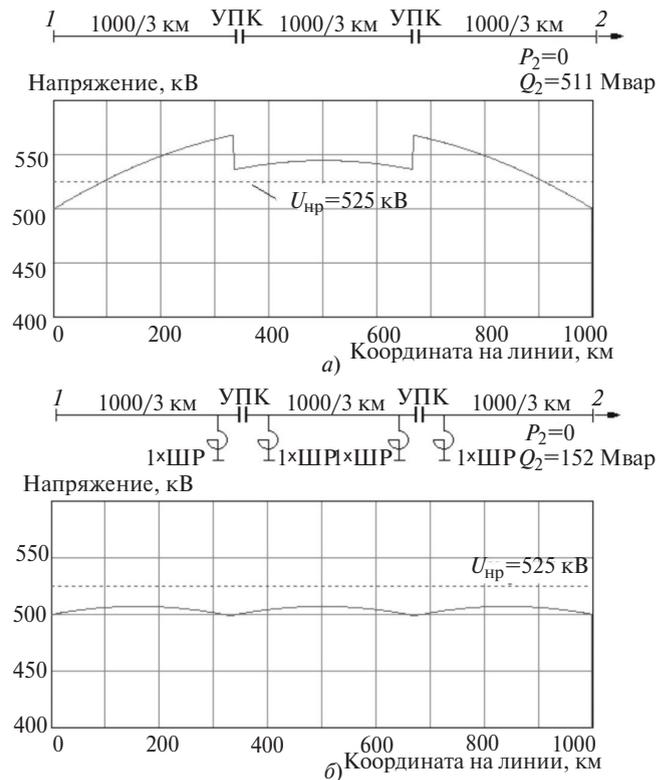


Рис. 8. Распределение напряжения вдоль линии в режиме холостого хода: а – без шунтирующих реакторов; б – по одному шунтирующему реактору по концам каждого УПК

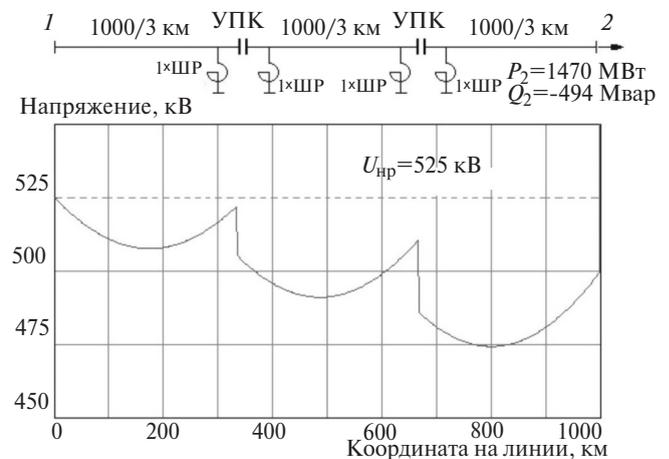


Рис. 9. Распределение напряжения вдоль линии в режиме передачи максимальной мощности (как и в режиме холостого хода установлено по одному шунтирующему реактору по концам каждого УПК)

На рис. 9 приведено распределение напряжений вдоль линии в режиме передачи максимальной мощности. Как следует из рис. 9, данная схема обеспечивает передачу максимальной мощности 1470 МВт с соблюдением условий как по статической устойчивости, так и по уровню напряжений вдоль линии в нормальных режимах.

**Выводы.** 1. Двухцепная ДЭП с точки зрения пропускной способности эффективно заменяется одноцепной ДЭП с установкой продольной емкостной компенсации. В линиях сравнительно большой длины (порядка 600 км и более) при использовании одной УПК пропускная способность ограничивается режимом напряжений на линии и заметно меньше пропускной способности, определяемой исходя из условия статической устойчивости.

2. Для того чтобы обеспечить пропускную способность на одном уровне по условию статической устойчивости и допустимому режиму напряжений вдоль линии, требуется использование двух УПК, равномерно распределенных в средней части линии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник «Дальние электропередачи 500 кВ». М.: Энергия, 1964.
2. Fuerte-Esquivel C.R., Acha E., Ambriz-Petez H. Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Networks. – IEEE Transaction on Power on Power Systems, 2000, vol. 15, No. 1.
3. Fuerte-Esquivel Gama C., Angquist L., Ingestrom G., Noroozian M. Commissioning and Operative Experience of TCSC Power Oscillation in the Brazilian North-South Interconnection. – CIGRE, 2000, Rep. 14–104.
4. Series capacitors for power system. Intern. Standart. IEC. Draft 7, 60143-1, 60143-2, 60143-3, June 2002.
5. Зарудский Г.К. О результатах исследований по применению продольной емкостной компенсации в электропередачах СВН. – Электричество, 2007, № 9, с. 48–51.
6. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы / Под общей ред. А.Ф. Дьякова. М.: НТФ «Энергопрогресс», Корпорация «ЕЭЭК», 2012.
7. Рыжов Ю.П., Некукар А.Р. О возможности сооружения на линиях СВН устройств продольной емкостной компенсации без шунтирующих реакторов на выводах конденсаторных батарей. – Электричество, 2012, № 1, с. 9–18.
8. Зарудский Г.К., Радилов Т.В. Расчет установившихся режимов электропередачи сверхвысокого напряжения, оснащенной устройствами гибких электропередач. – Электричество, 2014, № 1, с. 2–11.
9. Mohamed Mostofa Saied. Optimal Long Line Series Compensation. – IEEE Transaction on Power Delivery, 1986, vol. 1, No. 2.
10. Ершевич В.В., Зейлигер А.Н., Илларионов Г.И. и др. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. М.: Энергоатомиздат, 1985.

[09.01.2020]

*А в т о р ы:* Самородов Герман Иванович – доктор техн. наук, научный руководитель отдела новых технологий филиала ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» – СибНИИЭ, диссертацию защитил в 1990 г.

Красильникова Татьяна Германовна – доктор техн. наук, профессор Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), диссертацию защитила в 2013 г.

Кошевой Константин Эдуардович – аспирант НГТУ.

*Electrichestvo, 2020, No. 3, pp. 12–17*

*DOI:10.24160/0013-5380-2020-3-12-17*

## Substantiating the Capacity of Long-Distance Power Transmissions Equipped with Series Capacitive Compensation

**SAMORODOV Germam I.** (SibNIIЕ – Branch of OJSC «Scientific and Technical Center FGC UES», Novosibirsk, Russia) – Department Supervisor, Dr. Sci. (Eng.)

**KRASIL'NIKOVA Tat'yana G.** (Novosibirsk State Technical University – NSTU, Novosibirsk, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**KOSHEVOY Konstantin E.** (NSTU, Novosibirsk, Russia) – Graduate Student

*A procedure for substantiating the capacity of a long-distance power transmission equipped with a series capacitive compensation device is considered. Maintaining the standardized static stability margin and acceptable voltage along the line in the typical operation modes of a long-distance power transmission at no load and with transmitting the maximum power corresponding to its transmission capability are considered as constraints imposed on the long-distance power line capacity. A power transmission made on the basis of a double-circuit line and a power transmission based on a single-circuit line equipped with series capacitive compensation, both characterized by the same capacity, are considered as the options being compared. The capacity substantiation method is illustrated taking a 500 kV long-distance transmission with a length of 1000 km as an example. Options implying the installation of one series capacitive compensation device in*

*the middle of the line and two series capacitive compensation devices in the line middle part are considered.*

**Key words:** *long-distance power transmission, shunt reactor, capacity, static stability, no-load and maximum power transmission operation modes*

#### REFERENCES

1. **Sbornik** «*Dal'niye elektropredachi 500 kV*» (The collection «Long-distance power transmission of 500 kV»). Moscow, Energiya, 1964.
2. **Fuerte-Esquivel C.R., Acha E., Ambriz-Petez H.** Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Networks. – IEEE Transaction on Power on Power Systems, 2000, vol. 15, No. 1.
3. **Fuerte-Esquivel Gama C., Angquist L., Ingestrom G., Noroozian M.** Commissioning and Operative Experience of TCSC Power Oscillation in the Brazilian North-South Interconnection. – CIGRE, 2000, pp. 14–104.
4. **Series capacitors for power system.** Intern. Standart. IEC. Draft 7, 60143-1, 60143-2, 60143-3, June 2002.
5. **Zarudskiy G.K.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2007, No. 9, pp. 48–51.
6. **Elektricheskiye seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya YEES Rossii. Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy / Pod obshchey red. A.F. D'yakova** (Electric networks of super- and ultra-high voltage of the Unified Energy System of Russia. Theoretical and practical foundations / The general ed. A.F. Dyakov). Moscow, NTF Energoprogress, Korporatsiya «YEEEEK», 2012.
7. **Ryzhov Yu.P., Nekukar A.R.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 1, pp. 9–18.
8. **Zarudskiy G.K., Radilov T.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 1, pp. 2–11.
9. **Mohamed Mostofa Saied.** Optimal Long Line Series Compensation. – IEEE Transaction on Power Delivery, 1986, vol. 1. No. 2.
10. **Yershevich V.V., Zeyliger A.N., Illarionov G.I. et al.** *Spravochnik po proyektirovaniyu elektroenergeticheskikh sistem/Pod red. S.S. Rokotyana i I.M. Shapiro* (Handbook for the design of electric power systems/Ed. by S.S. Rokotyana and I.M. Shapiro). Moscow, Energoatomizdat, 1985.

[09.01.2020]