

УДК 621.3

DOI 10.21661/r-469506

**Г.И. Давыдов, А.М. Хоютанов, П.Ф. Васильев,
В.П. Кобылин, Г.И. Самородов**

TRANSPORT ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА СВЕРХДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ

Аннотация: транспорт электроэнергии переменного тока на сверхдальние расстояния возможен одним из двух принципиально отличающихся способов: компенсированные электропередачи, полуволновые и настроенные на полу волну. Компенсация волновой длины линии является весьма эффективным средством повышения дальности и пропускной способности электропередачи. С ее помощью линии большой длины всегда можно придать свойства короткой линии (кроме потерь активной мощности). Однако мощности компенсирующих устройств с увеличением длины передачи и требуемой пропускной способности существенно возрастают. Для передачи электроэнергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния предпочтение следует отдать полуволновым электропередачам, поскольку они, по условию устойчивости, не требуют дополнительных затрат на компенсацию реактивной. В работе определена граничная длина настройки на полу волну длинной линии электропередачи. Целесообразность настройки на полу волну возникает при длине линии 1500 км и более. Линию, длина которой меньше 1500 км, целесообразно привести к линии «нулевой длины».

Ключевые слова: длинные линии электропередач, пропускная способность, компенсирующие устройства, настройка на полу волну.

**G.I. Davyдов, A.M. Khoiutanov, P.F. Vasilyev,
V.P. Kobylin, G.I. Samorodov**

TRANSMISSION OF THE AC ELECTRIC POWER TO A LONG DISTANCE

Abstract: there are two different ways to transmit the AC electric power for a long distance: a compensated, the half-wave and tuned to half-wave transmissions. The

compensation of the wave length is an effective way to increase the distance and the capacity of the transmission line. Through the wave length compensation it might to give to a long distance line the properties of the short line (except the active power losses). But with the distance and capacity increasing also increases a capacity of the compensation devices. Therefore, usage of the half wave and tuned to a half wave transmission lines to transmit an AC electric power for a long distances is more effective because there is no need to additional expenses to reactive power compensation by the stability conditions. The boundary length of the tuning to a half-wave is defined in article. The advisability of the tuning to a half-wave is arises when the length of the line more than 1500 km. Otherwise it recommended to tune the line to a «zero length».

Keywords: *long distances transmission lines, capacity, compensating devices, setting on a half-wave.*

Введение. Во всем мире для передачи электроэнергии используется трехфазные системы переменного тока. Традиционные ЛЭП конструктивно простые, но их пропускная способность низкая. Новые разработки позволяют увеличить передачу активной мощности трехфазной воздушной линии, в сравнении с традиционной, более чем в два раза [1, 2, 3, 4, 5]. Максимально использовать преимущества трехфазных электропередач переменного тока для передачи больших мощностей на сверхдальние расстояния рекомендуется настройка линии на полуволну [6, 7, 8].

Компенсация электрической длины. Линии с волновой длиной $\lambda \geq \pi/2$ соответствует П-образная схема замещения (рис. 1, 2).

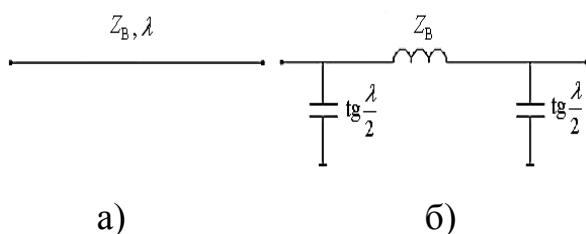


Рис. 1. Традиционная воздушная линия: а – исходная ВЛ; б – схема замещения ВЛ при $\lambda \geq \pi/2$

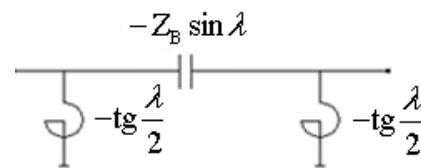


Рис. 2. Дуальная П-образная схема замещения линии

Линия отрицательной волновой длины соответствует дуальной схеме замещения (рис. 3).

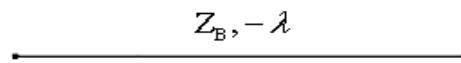


Рис. 3. Линия отрицательной волновой длины

Это означает, что при каскадном соединении традиционной ВЛ и линии отрицательной волновой длины, эквивалентная схема будет нулевой длины, матрица 4-полюсника которой является единичной (рис. 4 и рис. 5).

$$\xrightarrow{\quad Z_B, \lambda \quad \quad Z_B, -\lambda \quad} \rightarrow \lambda = 0$$

$$\begin{vmatrix} \cos \lambda & j Z_B \sin \lambda \\ j \frac{\sin \lambda}{Z_B} & \cos \lambda \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} \cos(-\lambda) & j Z_B \sin(-\lambda) \\ j \frac{\sin(-\lambda)}{Z_B} & \cos(-\lambda) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Рис. 4. Каскадное соединение традиционной ВЛ и линии отрицательной волновой длины

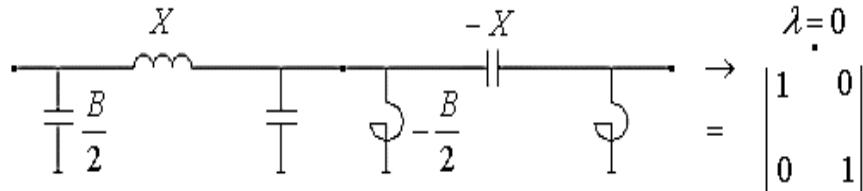


Рис. 5. Каскадное соединение схемы замещения традиционной ВЛ и её дуальной схемы

Устройство, параметры которого эквивалентны параметрам линии отрицательной волновой длины (рис. 6), называется устройством компенсации волновой длины (УКЭД).

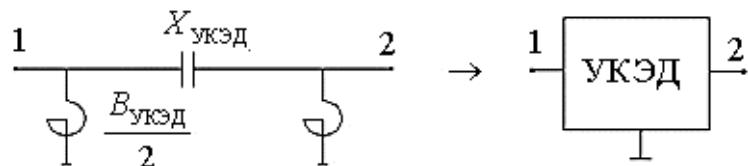


Рис. 6. Устройство компенсации волновой длины

Параметры УКЭД определяются необходимой величиной компенсации волновой длины:

$$X_{\text{укэд}} = Z_B \sin \lambda_k, \frac{B_{\text{укэд}}}{2} = \frac{\tan \frac{\lambda_k}{2}}{Z_B} \quad (2)$$

где $X_{\text{укэд}}$ – необходимая величина компенсации волновой длины линии; Z_B – волновое сопротивление компенсируемой линии.

Рассмотрим два способа компенсации волновой длины.

1. Работа станции на ШБМ через дальнюю линию длиной 1000 км (рис. 7).

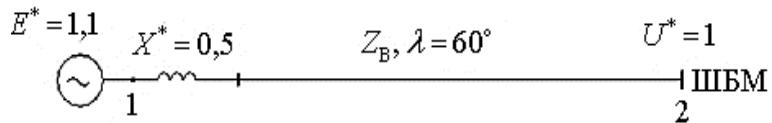


Рис. 7. Расчётная схема

Анализ проводится в относительных единицах, с учётом идентичности всех классов СВН. Компенсацией волновой длины дальней линии возможно увеличение предела передаваемой мощности до активной:

$$P_{\text{ЭП}}^* = \frac{E^* U^*}{(\sin \lambda_{\text{эк}} + X^* \cos \lambda_{\text{эк}})(1+K)} = 1 \quad (3)$$

Где $\lambda_{\text{эк}} = \lambda - \lambda_k$ – эквивалентная волновая длина линии с учётом её компенсации, λ_k – величина компенсации волновой длины.

Параметры устройства компенсации в относительных единицах показаны на рис. 8.

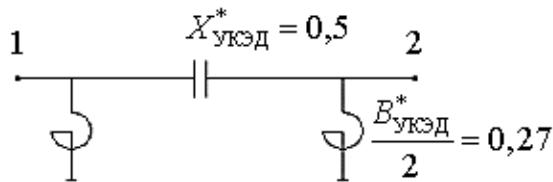


Рис. 8. Параметры УКЭД

Для компенсации не имеет значения, в каком месте линии будет включено УКЭД.

С позиции аварийных режимов – режимов короткого замыкания (КЗ), УКЭД следует размещать в средней части ВЛ. Если УКЭД расположено в начале ВЛ (рис. 9), то КЗ за УКЭД попадает в резонансную зону, где значения токов КЗ будет значительно выше, чем при КЗ на шинах электростанции.

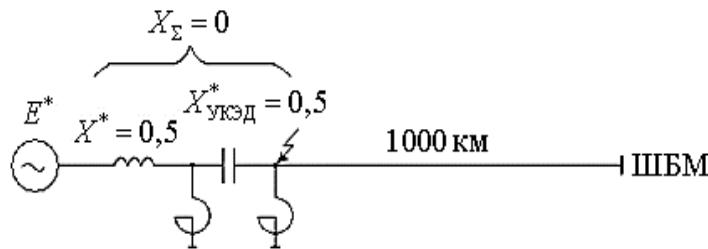


Рис. 9. Включение УКЭД в начале линии

В случае, когда УКЭД располагается в средней части линии, ток КЗ за УКЭД будет таким же, как и при КЗ на шинах электростанции, поскольку в электрическом смысле это эквивалентные точки (рис. 10).

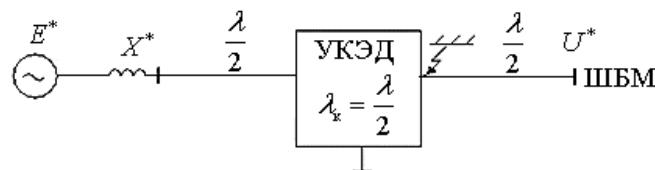


Рис. 10. Включение УКЭД в средней части линии

2. Работа электростанции на ШБМ через сверхдальную линию (рис. 11) длиной 2000 км.

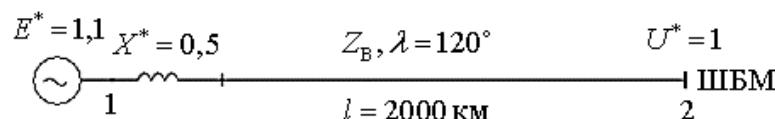


Рис. 11. – Расчётная схема сверхдальней ЭП

Для обеспечения пропускной способности сверхдальней линии на уровне передачи активной мощности, мощность ЭП должна быть:

$$P_{\text{ЭП}}^* = \frac{E^* U}{(\sin \lambda + X^* \cos \lambda)(1+K_3)} = 1,5 \quad (4)$$

Линия работает на нисходящей (неустойчивой) ветви угловой характеристики мощности (рис. 12).

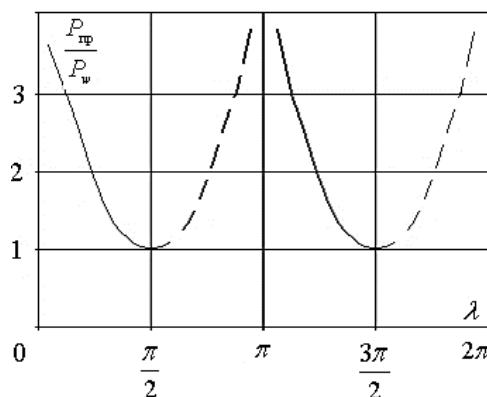


Рис. 12. Зависимость предельной передаваемой мощности от длины линии

Признаком перехода в область неустойчивой ветви угловой характеристики является условие:

$$jmZ_{11} = jm \frac{B_{12}}{D_{12}} < 0 \quad (5)$$

Из (2) следует: если входное сопротивление линии относительно шин станции ёмкостное, то устойчивая работа станции невозможна:

$$jmZ_{11} = \frac{\sin \lambda + X^* \cos \lambda}{\cos \lambda} = - \frac{0,616}{0,5} < 0 \quad (6)$$

Для обеспечения устойчивой работы линии необходима компенсация волновой длины, чтобы оказаться в рабочей области $\delta < 90^\circ$, или настройка волновой длины, чтобы оказаться в рабочей области $180^\circ < \delta < 270^\circ$.

Для обеспечения пропускной способности линии на уровне передачи активной мощности, при работе на устойчивой ветви угловой характеристики, эквивалентная волновая длина линии должна быть $\lambda_{\text{эк}} = 30^\circ$, а величина компенсации волновой длины равна $\lambda_k = 90^\circ$. Параметры устройства компенсации в относительных единицах изображены на рис. 13.

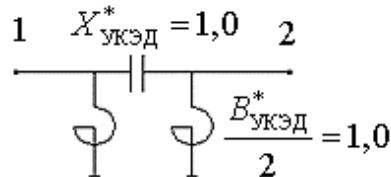


Рис. 13. Параметры УКЭД

Установка УКЭД в средней части линии недопустима (рис. 14), т.к. в этом случае при КЗ за УКЭД возможны резонансные режимы. Эквивалентная волновая длина на этом участке равна $\lambda_{\text{эк.кз}} = -30^\circ$, суммарное сопротивление относительно шин электростанции становится равным или близким к нулю.

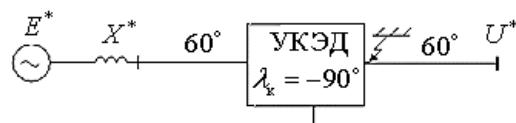


Рис. 14. Установка УКЭД в средней части ВЛ

Для исключения резонансных явлений, УКЭД должны подключаться по линии, как это показано на рис. 15. При КЗ за любым УКЭД ток КЗ будет меньше тока КЗ на шинах электростанции

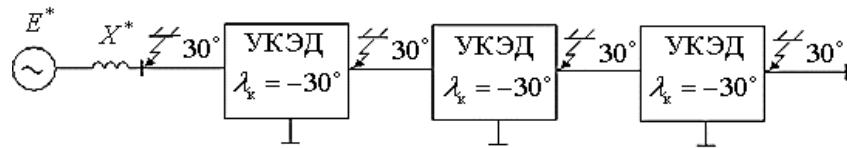


Рис. 15. Подключение УКЭД по линии

Компенсация продольного сопротивления. На практике обычно ограничиваются компенсацией продольного сопротивления. В этом случае устройство продольной компенсации (УПК) является частным случаем УКЭД, в котором отсутствуют поперечные ветви (рис. 16).

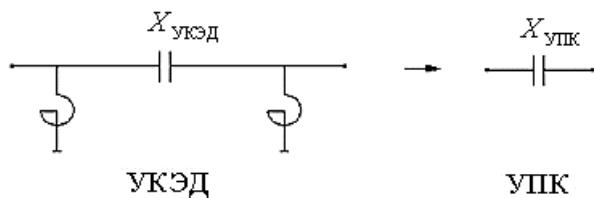


Рис. 16. УПК как частный случай УКЭД

На рис. 17 представлена расчётная схема УПК на примере работы станции через линию длиной 1000 км на ШБМ.

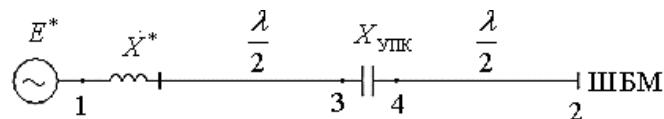


Рис. 17. Расчётная схема работы станции через линию длиной 1000 км на ШБМ

Степень продольной компенсации определяется из выражения:

$$K_{\text{UPK}} = \frac{X_{\text{UPK}}}{x_0 l} 100\% = \frac{X_{\text{UPK}}}{Z_B \lambda} 100\% = \frac{X_{\text{UPK}}^*}{\lambda} 100\% \quad (7)$$

Для определения степени продольной компенсации, при которой обеспечивается пропускная способность линии на уровне передачи активной мощности, необходимо знать сопротивление схемы, содержащей ёмкостное сопротивление в промежуточном пункте линии (рис. 18).

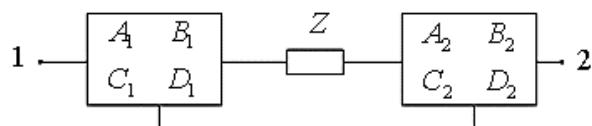


Рис.18. Ёмкостное сопротивление в промежуточном пункте ЭП

Для схемы на рис. 7 справедливо выражение:

$$\begin{aligned} B_{1Z2} &= B_{12} + ZA_1D_2 \\ M_{1Z2} &= \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

$$B_{1Z2} = A_1B_2 + A_2B_2Z + B_1D_2 = B_{12} + ZA_1D_2$$

Применимельно к анализируемой схеме:

$$B_{1\text{УПК}2}^* = B_{12}^* - jX_{\text{УПК}}^*A_{13}D_{42} \quad (9)$$

$$\text{где } B_{12}^* = j(\sin \lambda + X^* \cos \lambda) = j1,12; A_{13} = \cos \frac{\lambda}{2} - X^* \sin \frac{\lambda}{2} = 0,616;$$

$$D_{42} = \cos \frac{\lambda}{2} = 0,866. \text{ Окончательно } B_{1\text{УПК}2}^* = j(1,12 - 0,533X_{\text{УПК}}^*).$$

Для обеспечения пропускной способности линии на уровне передачи активной мощности:

$$P_{\text{ЭП}}^* = \frac{E^* U^*}{jmB_{1\text{УПК}2}^*(1+K_3)} = 1,0 \quad (10)$$

$$\text{где } jmB_{1\text{УПК}2}^* = 0,917 \text{ и } X_{\text{УПК}}^* = \frac{1,12 - 0,917}{0,533} = 0,38.$$

На пропускную способность линии накладываются следующие ограничения:

- нагрев проводов;
- статическая устойчивость;
- допустимое напряжением в любой точке ЭП.

Для схемы с УПК должно контролироваться напряжения на его зажимах. Из соотношений

$$U_3^* = U_4^* - jX_{\text{УПК}}^*I_{\text{УПК}}, I_{\text{УПК}} = \frac{\overline{S_3}}{\overline{U_3}} = \frac{P_3^* - jQ_3^*}{U_3} \quad (11)$$

получим выражение, определяющее связь между напряжениями на зажимах УПК:

$$U_4^* = U_3^* \sqrt{\left(1 + X_{\text{УПК}}^* \frac{Q_3^*}{U_3^{*2}}\right)^2 + \left(X_{\text{УПК}}^* \frac{P_3^*}{U_3^{*2}}\right)^2} \quad (12)$$

При $Q_3^* = 0, P_3^* = 1, U_3^* = 1, U_4^* = 1,07$. Для ЭП СВН наибольшее рабочее напряжение должно удовлетворять условию: $\frac{U_{\text{НР}}}{U_{\text{Н}}} < 1,05$.

Таким образом, фазное напряжение на УПК превышает максимально допустимое рабочее напряжение, что недопустимо по условию работы изоляции, т.е. пропускная способность ЭП должна быть снижена по условию режима напряжения (13), (14):

$$U_{HP}^* = \sqrt{1 + (X_{УПК}^* P_{3\text{ доп}}^*)^2} \cdot 13)$$

$$P_{ЭП}^* = P_{3\text{ доп}}^* = \frac{1}{X_{УПК}} \sqrt{U_{HP}^{*2} - 1} \quad (14)$$

При $U_{HP}^* = 1,05$ пропускная способность составит $P_{ЭП}^* = 0,84$, т.е. снизится на 16% по сравнению с пропускной способностью, определённой условием устойчивости.

В случае сверхдальней линии длиной 2000 км УПК, также, как и УКЭД, должны быть подключены вдоль линии минимум в трёх пунктах (рис. 19).

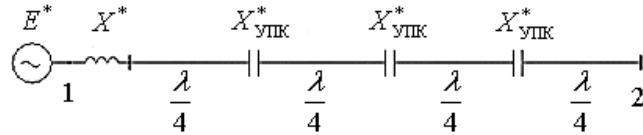


Рис. 19. Подключение УПК по сверхдальней линии

Эквивалентная матрица этой схемы определяется перемножением матриц отдельных элементов:

$$\begin{bmatrix} A_{12}^* & B_{12}^* \\ C_{12}^* & D_{12}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & jX^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \cos \frac{\lambda}{4} & \cos \frac{\lambda}{4} \\ \cos \frac{\lambda}{4} & \cos \frac{\lambda}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_{УПК}^* \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^3 \begin{bmatrix} \cos \frac{\lambda}{4} & \cos \frac{\lambda}{4} \\ \cos \frac{\lambda}{4} & \cos \frac{\lambda}{4} \end{bmatrix}$$

$$B_{12}^* = B_{12}^*(X_{УПК}^*) \quad (15)$$

Из уравнения (15) определяется сопротивление УПК, обеспечивающее заданную пропускную способность по условию устойчивости. Далее проверяется допустимая пропускная способность по режиму напряжений на зажимах УПК. Если режим напряжений является определяющим, то корректируется сопротивление УПК для сохранения пропускной способности сверхдальней ЭП.

Настройка волновой длины. На рис. 20 изображено устройство настройки волновой длины (УНЭД).

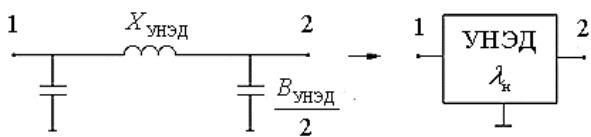


Рис. 20. Настройка волновой длины (УНЭД)

Параметры УНЭД определяются настройкой волновой длины линии:

$$X_{\text{унэд}} = Z_w \sin \lambda_h, \frac{B_{\text{унэд}}}{2} = \frac{\tan \frac{\lambda_h}{2}}{Z_w} \quad (16)$$

где λ_h – исходная волновая длина линии требующая настройки.

Для обеспечения работы сверхдальней линии длиной 2000 км на устойчивой ветви угловой характеристики необходимо довести эквивалентную волновую длину линии до полуволновой $\lambda_{\text{эк}} = 180^\circ$, как показано на рис. 21.

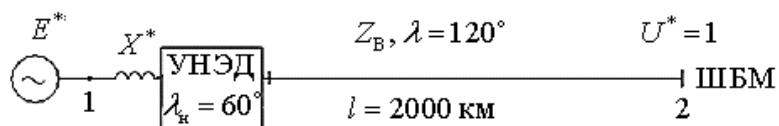


Рис. 21. Настройка сверхдальней электропередачи

Так как $\lambda_{\text{эк}} = \lambda + \lambda_h$ – волновая длина настроенной линии. $\lambda_h = \lambda_{\text{эк}} - \lambda = 60^\circ$. При $\lambda_{\text{эк}} = 180^\circ JmB_{12}^* = \sin \lambda_{\text{эк}} + X^* \cos \lambda_{\text{эк}} = -X^*$. Угловая характеристика принимает вид:

$$P^* = \frac{E^* U^*}{-X^*} \sin \delta = \frac{E^* U^*}{X^*} \sin(\delta - 180^\circ) \quad (17)$$

На рис. 22 показана угловая характеристика ЭП с ВЛ настроенной на полуволну.

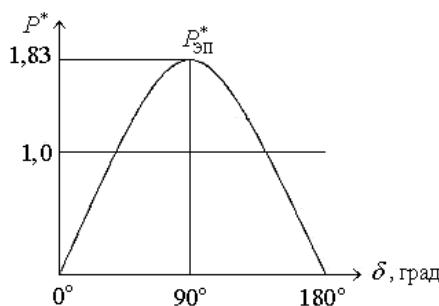


Рис. 22. Угловая характеристика ЭП с настройкой линии на полуволну

Устойчивая ветвь угловой характеристики находится в интервале $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$. Пропускная способность настроенной ЭП по условию устойчивости составит:

$$P_{\text{ЭП}}^* = \frac{E^* U^*}{X^*(1+K_3)} \approx 1,83 \text{ (18)}$$

что значительно превышает предел передачи активной мощности линией.

Для ЭП, настроенных на полуволну, главным фактором, влияющим на пропускную способность, является повышение напряжения в средней части линии, которое пропорционально передаваемой мощности. На рис. 23 показано распределение напряжения вдоль полуволновой линии при различных передаваемых мощностях.

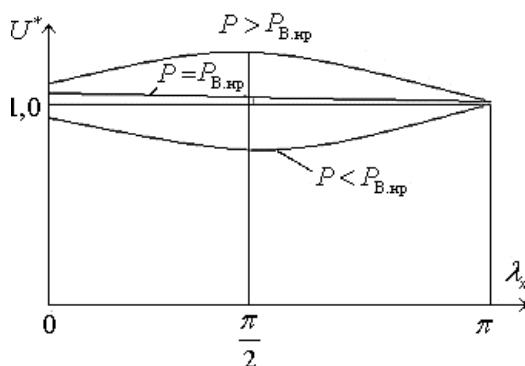


Рис. 23. Распределение напряжения вдоль полуволновой линии

Напряжение в средней части линии (рис. 24) пропорционально передаваемой мощности. Из уравнения длинной линии, оно равно:

$$U = \frac{U_1 P_1}{P_{B_1}} \text{ (19)}$$

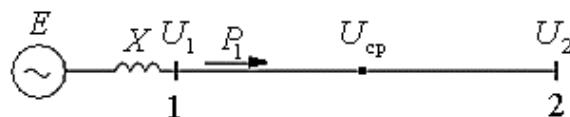


Рис. 24. Схема полуволновой ЭП

В средней части линии отсутствует силовое электрооборудование. По условиям работы линейной изоляции допустимое напряжение в средней части может превышать наибольшее рабочее напряжение примерно на 10%. При этом напряжении пропускная способность полуволновой ЭП составит:

$$P_{\text{ЭП}} = \frac{P_{B, np} U_{\text{ср.доп}}}{U_{\text{нр}}} = 1,1 P_{B, np} \text{ (20)}$$

В относительных единицах при базисной мощности, равной активной мощности при номинальном напряжении $P_{\text{ЭП}}^* = P_{B, np}^* \approx 1,2$.

Таким образом, пропускная способность настроенной ЭП по условию режима напряжения меньше, чем по условию статической устойчивости.

Вывод. Для увеличения пропускной способности необходимо скомпенсировать три четверти длины сверхдальней линии при её исходной длине 2000 км. При одинаковых удельных затратах на компенсацию и настройку одного километра линии – эффективность настройки значительно выше, чем при компенсации, поскольку для обеспечения одинаковой пропускной способности длина настраиваемой линии составляет 1000 км.

Целесообразность настройки на полуволну возникает при длине линии 1500 км и более. Линии, длина которой меньше 1500 км, целесообразно привести к линии «нулевой длины».

Список литературы

1. Самородов Г.И. Четырехфазные электропередачи и оценка эффективности их использования для выдачи мощности ГЭС «Три ущелья» в район Восточного Китая // Международная конференция: Восточная энергетическая политика России и проблемы интеграции в энергетическое пространство Азиатско-Тихоокеанского Региона. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 1998. – С. 447–461.
2. Балюк Н.З. Формирование межсистемного транзита 500 кВ на Дальнем Востоке России и проблемы энергетической безопасности в условиях развития экспорта электроэнергии в страны СВА / Н.З. Балюк, А.Ю. Огнев, В.Н. Минаков // Энергетика России в XXI веке: Развитие, функционирование, управление. – Иркутск, 2005. – С. 621–627.
3. Кобылин В.П. Применение регулятора-стабилизатора тиристорной системы для снижения потерь напряжения и мощности в условиях протяжённых ВЛ / В.П. Кобылин, В.А. Седалищев, Р.П. Ли-Фир-Су, А.В. Кобылин // Электричество. – 2007. – №6. – С. 2–6.
4. Edris A. FACTS Technology Development: An Update // IEEE power engineering review. – 2000. – №3. – Pp. 4–15.
5. Felix F. Wu China's Future in Electric Energy / F. Wu Felix, Fu. Shuti // IEEE Power and Energy. – 2005. – №4. – July/August. – Vol. 3.

-
6. Самородов Г.И. Сверхдальние электропередачи полуволнового типа. – Новосибирск: Наука, 2003. – 177 с.
7. Александров Г.Н. Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности // Электричество. – 1981. – №7. – С. 1–6.
8. Хоютанов А.М. Применение полуволновых технологий для повышения пропускной способности межсистемных и межрегиональных линий электропередач / А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов, А.С. Нестепров // В сборнике: Труды VII Евразийского симпозиума по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата Пленарные доклады. – 2014. – С. 467–471.

References

1. Samorodov G.I. Chetyrekhfaznye elektroperedachi i otsenka effektivnosti ikh ispol'zovaniya dlya vydachi moshchnosti GES «Tri ushchel'ya» v rayon Vostochnogo Kitaya [Four-phase electricity transmission and assessment of the efficiency of their use for the delivery of the power of the «Three Gorges» HPP to the area of East China], in Mezhdunarodnaya konferentsiya Vostochnaya energeticheskaya politika Rossii i problemy integratsii v energeticheskoe prostranstvo Aziatsko-Tikhookeanskogo Re-giona, Irkutsk: ESI SB RAS, 1998. – pp. 447–461.
2. Balyuk N.Z., Ognev A.Yu., Minakov V.N. Formirovanie mezhsistemnogo tranzita 500 kV na Dal'nem Vostoke Rossii i problemy energeticheskoy bezopasnosti v usloviyakh razvitiya eksporta elektroenergii v strany SVA [Formation of inter-system transit of 500 kV in the Far East of Russia and the problems of energy security in the context of the development of electric power export to the NEA countries], Energetika Rossii v XXI veke: Razvitie, funktsionirovanie, upravlenie, Irkutsk. – 2005. – Pp. 621–627.
3. Kobylin V.P., Sedalishchev V.A., Li-Fir-Su R.P., Kobylin A.V. Primenenie reguljatora-stabilizatora tiristornoy sistemy dlya snizheniya poter' napryazheniya i moshchnosti v usloviyakh protyazhennyykh VL [The use of a regulator-stabilizer of a thyristor system to reduce voltage and power losses in long-distance air lines] / in Elektrичество. – 2007. – issue 6. – pp. 2–6.

4. Edris A. FACTS Technology Development: Au Update, JEEE power engineering review. – 2000. – issue 3. – Pp. 4–15.
 5. Felix F.Wu, Shuti Fu. China's Future in Electric Energy, IEEE Power and Energy, 2005, July/August, Vol. 3. issue 4.
 6. Samorodov G.I. Sverkhdal'nie elektroperedachi poluvolnovogo tipa [Ultra-long power transmission of a half-wave type], Novosibirsk: Science, 2003. – 177 p.
 7. Aleksandrov G.N. Vozdushnye linii elektroperedachi povyshennoy propusknosty sposobnosti [Overhead power transmission lines with increased capacity], in Elektrичество, 1981. – issue 7. – Pp. 1–6.
 8. Khoiutanov A.M. Primenenie poluvolnovykh tekhnologiy dlya povysheniya propusknosty sposobnosti mezhsistemnykh i mezhregional'nykh liniy elektroperedach [Using of a half-wave technologies to increase the capacity of inter-system and inter-regional power lines] / A.M. Khoiutanov, V.P. Kobylin, P.F. Vasilyev, G.I. Davydov, A.S. Nesterov // in V sbornike: Trudy VII Evraziyskogo simpoziuma po problemam nadezhnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata Plenarnye doklady, 2014. – pp. 467–471.
-

Давыдов Геннадий Иванович – соискатель, младший научный сотрудник ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова», Россия, Якутск.

Davydov Gennady Ivanovich – applicant, research assistant at the Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Russia, Yakutsk.

Хоюманов Александр Михайлович – соискатель, ведущий инженер ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова», Россия, Якутск.

Khoiutanov Alexander Mikhailovich – applicant, leading engineer at the Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Russia, Yakutsk.

Васильев Павел Филиппович – канд. техн. наук, заведующий отделом ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова», Россия, Якутск.

Vasilyev Pavel Filippovich – candidate of engineering sciences, department head at the Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Russia, Yakutsk.

Кобылин Виталий Петрович – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова», Россия, Якутск.

Kobilin Vitaly Petrovich – doctor of engineering sciences, leading research officer at the Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Russia, Yakutsk.

Самородов Герман Иванович – д-р техн. наук, научный руководитель отдела новых технологий Сибирский научно-исследовательский институт энергетики (филиал) ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», Россия, Новосибирск.

Samorodov German Ivanovich – doctor of engineering sciences, scientific director of the department of new technologies at the Branch of JSC «Scientific and Technical Center of FGC UES» – SibNIIE, Russia, Novosibirsk.
