

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

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

*Белорусский национальный технический университет*

В учебной и периодической литературе уделяется внимание [1–7] четвертьволновой ЛЭП. Обычно отмечаются отрицательные качества этой электропередачи [1–4 и др.]. Однако В. А. Веников в [1, с. 129] пишет: «Следовательно, часто повторяющееся утверждение относительно неустойчивости (невозможности устойчивой работы) электропередачи переменного тока при длине 1500 км – неправильно, и передача, вообще говоря, может работать по условиям устойчивости в режиме четверти волны». По режиму напряжений четвертьволновой ЛЭП [1] не рекомендует ее для передачи электроэнергии.

Отрицательное заключение по условиям устойчивости и режима напряжений данной ЛЭП приводилось также в [2–5]. Тщательный анализ [7, 8] режима четверти волны позволил положительно оценить его. В статье предлагается дополнительное рассмотрение работы четвертьволновой ЛЭП в электрической системе. Как и в отмеченных выше источниках, рассмотрим основные свойства системы электропередачи – пропускную способность по условиям статической устойчивости и режим напряжения линий передачи. Для обеспечения динамической устойчивости имеются достаточно эффективные средства ее повышения [9].

При рассмотрении свойств электропередачи, связанных с ее пропускной способностью, принималась схема системы передачи в целом с генераторами и трансформаторами. Общие соотношения, характеризующие пропускную способность электропередачи и справедливые при любых значениях  $x_{\Gamma}$  – эквивалентного сопротивления генераторов и трансформаторов, будем анализировать пропускную способность, в частности, на предел статической устойчивости, соответствующий постоянству потокосцепления ротора. Кроме того, также рассмотрим случай  $x_{\Gamma} = 0$ , что соответствует предельной мощности линии, и вариант постоянства возбуждения генераторов. Последний представляет интерес с точки зрения роли и значения автоматического регулирования возбуждения. Следуя [1–5 и др.], не будем учитывать активных сопротивлений ЛЭП; показано [6, 10], что для определения пропускной способности, перенапряжений, токов коротких замыканий можно рассматривать вместо реальной линии идеальную без потерь. Для такой линии и системы передачи (рис. 1) справедливы уравнения:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \alpha l + j I_2 z_B \sin \alpha l; \quad (1)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cos \alpha l + j \frac{\underline{U}_2}{z_B} \sin \alpha l; \quad (2)$$

$$\underline{E} = \underline{U}_2 + j I_1 x_{\Gamma}, \quad (3)$$

где  $z_B$  – волновое сопротивление ЛЭП;  $x = \omega_0 \sqrt{L_0 C_0}$ ;  $L_0, C_0$  – индуктивность и емкость на 1 км линии.

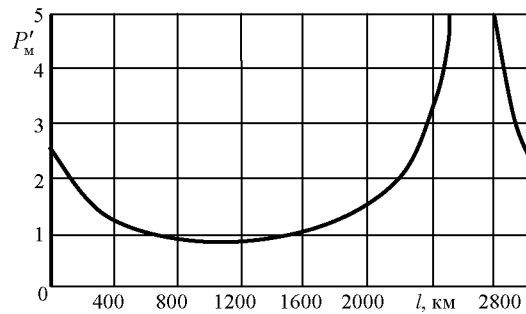


Рис. 1. Схема системы передачи. Зависимость удельной передаваемой мощности от дальности при учете генераторов синхронным сопротивлением

Используя (1) и (2), выразим ЭДС

$$E = U_2 \left( \cos \alpha l - \frac{x_r}{z_B} \sin \alpha l \right) + jI_2 (x_r \cos \alpha l + z_B \sin \alpha l). \quad (4)$$

Из (4) вытекают значения эквивалентного сопротивления и передаваемой мощности для схемы, изображенной на рис. 1:

$$x_3 = x_r \cos \alpha l + z_B \sin \alpha l; \quad (5)$$

$$P = \frac{EU_2}{x_r \cos \alpha l + z_B \sin \alpha l} \sin \Theta, \quad (6)$$

где  $\Theta$  – угол между ЭДС  $E$  и напряжением  $U_2$ .

Передаваемую мощность можно представить в относительных единицах на базе натуральной мощности (удельную мощность) в виде

$$P = \frac{E_* \cdot 1}{\frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + \sin \alpha l} \sin \Theta, \quad (7)$$

где  $E_*$  выражено в относительных единицах;  $U_{\text{баз}} = U_2 = U_1$ .

При заданных значениях  $E$  и  $U_2$  предел передаваемой мощности определится значениями знаменателя (6) и (7) – эквивалентного сопротивления системы передачи:

$$x_3 = x_r \cos \alpha l + z_B \sin \alpha l; \quad (8)$$

$$x_{3*} = \frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + \sin \alpha l. \quad (9)$$

Величина эквивалентного сопротивления системы передачи определяет предел удельной передаваемой мощности, который пропорционален величине

$$P_M = \frac{1}{\frac{x_\Gamma}{z_B} \cos \alpha l + \sin \alpha l}. \quad (10)$$

Суммарное реактивное сопротивление генераторов и трансформаторов на базе натуральной мощности

$$x_{\Gamma*} = \frac{x_\Gamma}{z_B} = \frac{x_{\Gamma H}}{P}, \quad (11)$$

где  $x_{\Gamma H}$  – сопротивление генераторов на базе их номинальных параметров.

Для того чтобы электропередача имела приемлемые экономические показатели, мощность, передаваемая по одной цепи, должна быть достаточно велика. Если ориентироваться на передачу по одной цепи натуральной мощности, то  $x_{\Gamma H} = 1$ . Тогда получим:

$$x_{\Gamma*} = \frac{x_\Gamma}{z_B} = \frac{1}{P}$$

и

$$P'_M = \frac{1}{\cos \alpha l + z_B \sin \alpha l}. \quad (12)$$

На рис. 1 построена зависимость (12), правая ветвь кривой для компактности чертежа перенесена из нижней части координатной плоскости (ее действительное положение является зеркальным отображением относительно горизонтальной оси). Из рис. 1 видно, что  $P'_M$ , а следовательно, и предел передаваемой мощности с увеличением длины линии до 750 км ( $\alpha l = 45^\circ$ ) уменьшаются, далее происходит возрастание  $P'_M$ .

При учете генераторов для статической устойчивости переходным сопротивлением рассматриваемая зависимость величины  $P'_M$  от длины линии представилась кривой (рис. 2)

$$P'_M = \frac{1}{0,42 \cos \alpha l + z_B \sin \alpha l}. \quad (13)$$

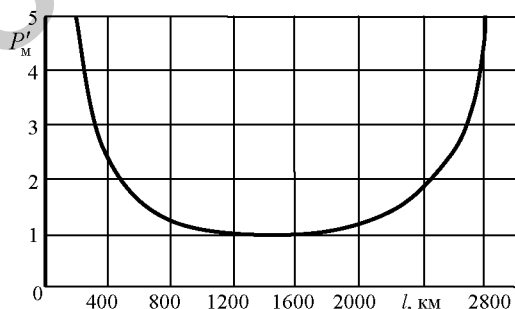


Рис. 2. Зависимость передаваемой мощности от дальности при учете генераторов переходным сопротивлением

При этом суммарное сопротивление генераторов и трансформаторов в относительных единицах было принято 0,42. Как и в предыдущем случае,

правая ветвь кривой перенесена из нижней части координатной плоскости. Наименьшее значение  $P'_M$ , как видно из (13) и рис. 2, получается при  $l = 1120$  км.

На рис. 3 построена зависимость

$$P'_M = \frac{1}{\sin \alpha l}, \quad (14)$$

соответствующая  $x_\Gamma = 0$  – АРВ сильного действия.

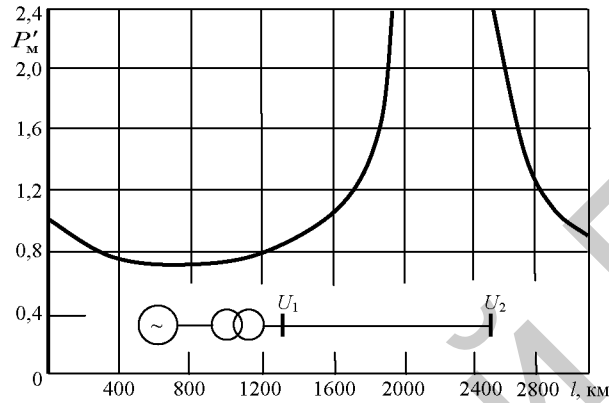


Рис. 3. Зависимость передаваемой мощности от дальности при сильном регулировании напряжения в начале ЛЭП

Область от 3000 до 3750 км с точки зрения устойчивости совершенно подобна области до 750 км. В этом можно убедиться из рис. 1, а также из формулы передаваемой мощности

$$P = \frac{EU_2}{\frac{x_\Gamma}{z_B} \cos(\alpha l_1 + \pi) + \sin(\alpha l_1 + \pi)} \sin(\Theta_1 + \pi) = \frac{EU_2}{\frac{x_\Gamma}{z_B} \cos \alpha l_1 + \sin \alpha l_1} \sin \Theta_1. \quad (15)$$

Откуда следует возможность компенсации линии к полуволне.

Анализ зависимостей рис. 1 и 2 показывает, что, достигнув минимума, передаваемая мощность с увеличением дальности возрастает и для четвертьволновой линии становится равной натуральной мощности ЛЭП.

Для четвертьволновой электропередачи уравнения (1)–(6) будут иметь вид:

$$\underline{U}_1 = jI_1 x_B; \quad (16)$$

$$I_\Gamma = j \frac{U_2}{z_B}; \quad (17)$$

$$\underline{E} = -U_2 \frac{x_\Gamma}{z_B} + jI_2 z_B = jI_2 z_B = -U_2 \frac{x_\Gamma}{z_B} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2; \quad (18)$$

или

$$E = U_2(-1 + j) = \sqrt{2}U_2 \angle 90^\circ + 45^\circ, \quad (19)$$

принято  $\frac{x_r}{x_b} = 1$ , что соответствует синхронному сопротивлению генераторов;

$$x_3 = z_b; \quad (20)$$

$$P = \frac{EU_2}{z_b} \sin \Theta. \quad (21)$$

Используя согласно (11) вместо формулы мощности (14), получим

$$P = \frac{\sqrt{2}U_2^2}{z_b} \sin 135^\circ = \frac{U_2^2}{z_b} = P_n, \quad (22)$$

где  $P_n$  – натуральная мощность.

Из полученных соотношений следует, что четвертьволновая электропередача работает в режиме натуральной мощности; передаваемая мощность и пропускная способность системы передачи не зависят от параметров конечных устройств. Из (16) и (17) видно, что напряжение в начале линии не зависит от напряжения в конце и прямо пропорционально току конца  $I_2$ , а напряжение  $U_2$  в свою очередь не зависит от напряжения  $U_1$ : напряжение  $U_1$  опережает на  $90^\circ$  ток  $I_2$ . Ток в начале линии  $I_1$  не зависит от тока конца  $I_2$ , прямо пропорционален напряжению конца  $U_2$  и опережает его на  $90^\circ$ .

Вследствие независимости тока  $I_2$  от тока  $I_1$  изменять величину передаваемой мощности можно только путем регулирования напряжения  $U_1$  в начале линии.

Предлагалось [2] такое регулирование путем последовательного соединения вторичных обмоток повышающих трансформаторов и регулирования напряжения первичных обмоток.

В современных условиях предложено [8] воспользоваться новыми устройствами, обеспечивающими возможность активного управления режимами работы электропередачи. Эти устройства основаны на применении преобразовательной техники, используются для создания гибких электропередач, в частности это СТАТКОМ, схемы и принципы работы которого подробно описаны в [11–13 и др.]. Схема включения в четвертьволновую линию показана на рис. 4, где он по своей физической сущности представляет источник ЭДС переменного тока, позволяющий регулировать напряжение  $U_1$  в начале ЛЭП. Регулирование напряжения  $U_1$  дает возможность регулировать нагрузку четвертьволновой ЛЭП. При этом, как видно из (14), параметры конечных устройств не оказывают влияния на пропускную способность системы передачи.

СТАТКОМ, включенный в начале ЛЭП как последовательный регулятор мощности (ПРМ), может принять ее натуральную мощность, в частности увеличивать. Влияния на соотношение напряжений и токов не оказывает, а также не влияет и на удельную пропускную способность системы передачи (мощность в долях натуральной).

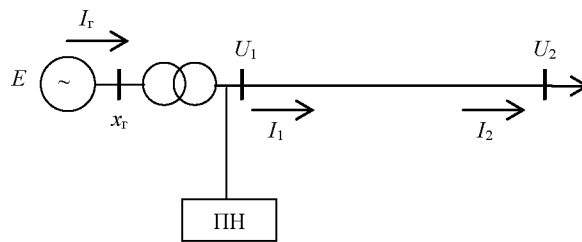


Рис. 4. Система передачи с включенным в начале ЛЭП устройством СТАТКОМ последовательного типа

Можно показать [7, 8], что в случаях учета сопротивлений конечных устройств системы передачи имеются протяженности линии, при которых для системы передачи в целом получаются режимы четверти волны со всеми его свойствами. Изменения напряжения  $U_1$  для регулирования нагрузки целесообразнее осуществлять посредством СТАТКОМа последовательного типа ПРМ. Система передачи становится управляемой, работающей на линию передачи. Режим напряжения, как следует из приведенных соотношений и векторных диаграмм [7, 8], опасений не вызывает. При холостом ходе системы электропередачи ( $I_2 = 0$ ;  $U_1 = 0$ ) напряжение в конце линии сохранит свое значение  $U_2$ , ток в начале линии согласно (17)  $I_1 = \frac{U_1}{z_{\text{в}}}$ . ЭДС генераторов удаленной электростанции  $E = -U_2$ . Векторная диаграмма изображена на рис. 5.

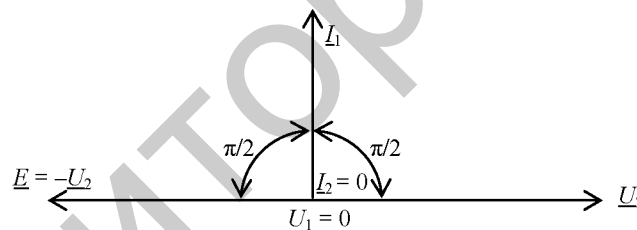


Рис. 5. Векторная диаграмма холостого хода системы передачи

## ВЫВОДЫ

1. Четвертьволновая электропередача может быть использована для работы в электрической сети энергосистемы, а также для транспорта электроэнергии.
2. При учете конечных устройств системы передачи имеются протяженности линий, при которых в системе передачи получается режим четверти волны со всеми его свойствами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В е н и к о в, В. А. Электромеханические переходные процессы в электрических системах / В. А. Веников. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 488 с.
2. Ж д а н о в, П. С. Устойчивость электрических систем / П. С. Жданов. – Л.: ГЭИ, 1948. – 199 с.

3. Д а л ь н и е электропередачи переменного тока / И. С. Брук [и др.]. – М.: АН СССР, 1958. – 259 с.
4. З а л е с с к и й, А. М. Передача электрической энергии / А. М. Залесский. – Л.; М.: ГЭИ, 1948. – 355 с.
5. П о с п е л о в, Г. Е. Электрические системы и сети: проектирование / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. – Минск: Вышэйш. шк., 1988. – 308 с.
6. П р и м е р ы анализа и расчета электропередач, имеющих автоматическое регулирование и управление / под ред. В. А. Веникова. – М.: Выш. шк., 1967. – 296 с.
7. П о с п е л о в, Г. Е. Новый взгляд на возможности электропередачи переменного тока в режиме четверти волны / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 5–6. – С. 3–8.
8. П о с п е л о в, Г. Е. Гибкая четвертьволновая управляемая электропередача / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 5. – С. 23–30.
9. П о с п е л о в, Г. Е. Логическая структура средств повышения динамической устойчивости систем электропередачи / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 4. – С. 12–20.
10. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967. – 312 с.
11. П о с п е л о в а, Т. Г. Потенциальные области использования FACTS и АСМ в Белорусской энергосистеме / Т. Г. Поспелова // Энергия и менеджмент. – 2006. – № 4 (31). С. 37–43.
12. И в а к и н, В. Н. Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике / В. Н. Ивакин, В. Д. Ковалев // Электричество. – 2001. – № 9. – С. 30–37.
13. Т е х н о л о г и я гибких линий электропередачи и электропередач, настроенных на передаваемую мощность // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 63–67.