УДК 621.311.1

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВДОЛЬ ПОЛУВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ЕЁ ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ, В СОСТАВЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ «ЕНЭС ВОСТОКА РОССИИ»

Хоютанов А.М., Кобылин В.П., Давыдов Г.И., Нестеров А.С., Васильев П.Ф.

ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова СО РАН», Якутск, e-mail: shuriklater@mail.ru

В докладе рассматриваются перспективные варианты сверхдальнего транспорта электроэнергии для объединения изолированных районов Республики Саха (Якутии) с последующей связью с ОЭС Сибири, ОЭС Востока и ее интеграции в ЕНЭС Востока России. Рассматривая варианты интеграционного объединения электрических связей при создании ЕНЭС Востока России, предлагается наиболее перспективный вариант электрической связи с точкой объединения в городе Олёкминске, при котором образуются три самостоятельные магистральные линии, позволяющие реализовать полуволновые технологии: Усть-Илимская ГЭС – Колымская ГЭС, Усть-Илимская ГЭС – Бурейская ГЭС и Вилюйская ГЭС – Бурейская ГЭС. Проведен анализ распределенности параметров вдоль полуволновой линии с помощью уравнений длинных длинный, приведена методика определения параметров схем замещения и пропускной способности, а также основные показатели полуволновой линии на примере связи Усть-Илимская ГЭС – Колымская ГЭС.

Ключевые слова: полуволновая линия, энергообъединение, пропускная способность

DISTRIBUTION OF PARAMETERS ALONG A HALF-WAVE TRANSMISSION LINE AND ITS CAPACITY IN A PART OF UNITED ENERGY SYSTEM OF EAST RUSSIA

Khoiutanov A.M., Kobylin V.P., Davydov G.I., Nesterov A.S., Vasilyev P.F.

Institute of physical and technical problems of the North named after V.P. Larionov SB RAS, Yakutsk, e-mail: shuriklater@mail.ru

The report looks promising options for long-distance transport of electricity association isolated areas of the Republic of Sakha (Yakutia), followed by coupling with IPS Siberia, IPS East and its integration in the UNEG East Russia. Considering options for integration association of electrical connections while creating UNEG East of Russia, offers the most promising option electrical connection point association in Olekminsk at which formed three separate trunk lines, allowing to realize half-wave technology: Ust-Ilim hydroelectric – Kolyma HPP and Ust-Ilim hydroelectric – Bureya HPP and HPP Viluiskaya – Bureya HPP. The analysis of the distribution of parameters along the lines of a half-wave equations using long long, the technique of determining the parameters of equivalent circuits and capacity, as well as key indicators of the half-wave lines on the example links Ust-Ilim hydroelectric – Kolyma HPP.

Keywords: half-wave transmission line, united energy system, capacity

Динамичное освоение природных ресурсов, а также внедрение крупных инновационных проектов на территории Республики Саха (Якутия) влечет за собой повышенную потребность в электроэнергии, но вследствие технологической изолированности и недостаточной связи с Единой энергосистемой России возникает проблема дефицита мощностей, что приводит к снижению надежности электроснабжения и к нерациональному использованию топливных ресурсов. Наряду с этим ускорение процесса вовлечения природных ресурсов в хозяйственный оборот в большей степени сдерживается не только территориальной изолированностью, но и отсутствием устойчивых связей с соседними регионами.

Важным вектором развития электроэнергетики Дальнего Востока является ее интеграция в Единую энергосистему России и широкомасштабный выход на электроэнергетические рынки Азиатско-Тихоокеанского региона [5].

Задача, которая поставлена в Схеме комплексного развития производительных сил Якутии до 2020 года в сфере энергетики [4], – объединение трех изолированных энергорайонов Республики Саха (Якутия) с последующей связью с ОЭС Сибири, ОЭС Востока и каскадом Колымских ГЭС.

Для сверхдальнего транспорта электроэнергии перспективными являются передачи постоянного тока (ППТ), но из-за отсутствия надежных коммутирующих аппаратов, отбора мощности и значительной капиталоемкости преобразовательных подстанций (ПС) вопрос о применении таких передач остается проблемным. Альтернативой могут стать сверхдальние компенсированные, полуволновые и настроенные на полуволну электропередачи [6].

Рассматривая варианты интеграционного объединения электрических связей при создании ЕНЭС Востока России, следует считать наиболее перспективным вариант электрической связи с точкой объединения в городе

Олёкминске, при этом образуются три самостоятельные магистральные линии, позволяющие реализовать полуволновые технологии: Усть-Илимская ГЭС – Колымская ГЭС, Усть-Илимская ГЭС – Бурейская ГЭС и Вилюйская ГЭС – Бурейская ГЭС (рис. 1).

Рис. 1. Трасса магистральной линии полуволнового типа между объединениями Восточной Сибири, Республики Саха (Якутия), Дальнего Востока и Магаданской области

Кроме того, имеется возможность выполнить в полуволновом режиме передачи питающие промышленные нагрузки северных территорий Республики Саха (Якутия): Нерюнгринская ГРЭС – Юрюнг-Хая и промышленный центр в районе Билибинской АЭС, а примыкающая Колымская ГЭС только усилит надёжность питания (рис. 2) [3].

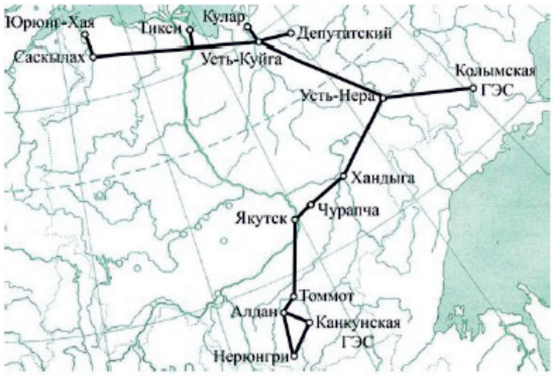

Рис. 2. Вариант электроснабжения потребителей промышленных центров северных территорий в полуволновом режиме Канкунская ГЭС – Юрюнг-Хая

Ниже приводятся расчеты основных параметров вдоль полуволновой электропередачи и пропускной способности на основе работы С.М. Зильбермана [1].

При анализе режимов сверхдальних линий учет распределённости параметров является обязательным и осуществляется согласно уравнениям длинной линии [1]:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_2 ch\gamma x + \dot{I}_2 \dot{Z}_w sh\gamma x ,$$

$$\dot{I}_x = \dot{I}_2 ch\gamma x + \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_w} sh\gamma x ,$$

где $\gamma = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения линии, α – коэффициент затухания, β – коэффициент фазы, $\dot{Z}_w$ – волновое сопротивление линии, $\dot{U}_2$, $\dot{I}_2$ – напряжение и ток на приемном конце линии, x – координата, отсчитываемая от приемного конца линии.

Вторичные параметры линии связаны с ее первичными параметрами известным соотношением:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(r_0 + jx_0)\, jb_0} ,$$

$$\dot{Z}_w = \dot{Z}_w e^{-j\theta} = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{jb_0}} ,$$

где r_0, x_0, b_0 – погонные активное, индуктивное сопротивление линии и её емкостная проводимость.

Модуль волнового сопротивления выражается через параметры линии в следующей форме:

$$Z_w = 60 k_v ln \frac{D_{cp}}{r_э},$$

где k_v – коэффициент скорости, равный отношению скорости распространения электромагнитных волн вдоль линии к скорости света, $D_{ср}$ – среднегеометрическое расстояние между фазами, $r_э$ – эквивалентный радиус расщепления.

Коэффициент скорости определяется через геометрические параметры линии и слабо зависит от геометрических параметров линии и находится в диапазоне k_v = 0,98-0,99. С достаточной для большинства исследований точностью может приниматься равным k_v = 0,985 [1].

Тогда в общем виде коэффициент фазы примет вид и останется практически постоянной величиной с незначительными колебаниями от полученного значения:

$$\beta = \frac{1{,}047}{k_v} \cdot 10^{-3} = 1{,}063 \cdot 10^{-3} \text{ рад/км}$$

Коэффициент затухания из связей между первичными и вторичными параметрами –

$$\propto = \frac{r_0}{2Z_w} .$$

Натуральная мощность линии определяется следующим образом:

$$P_w = \frac{U_{ном}^2}{Z_w}$$

В итоге, согласно уравнениям длинной линий режимные параметры по концам линии связаны соотношением:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 ch(\alpha l + j\beta l) + \dot{I}_2 \dot{Z}_w sh(\alpha l + j\beta l),$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 ch(\alpha l + j\beta l) + \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_w} sh(\alpha l + j\beta l),$$

Для определения режима по концам линии можно использовать П-образную схему замещения. Однако, традиционная схема замещения хорошо отражает физические процессы при длинах линии не более четверть волны. Для сверхдальних линий эта схема замещает ряд неудобств, так для полуволновой линии продольное активное сопротивление оказывается отрицательным, а поперечные проводимости имеют чрезмерно большую величину [2].

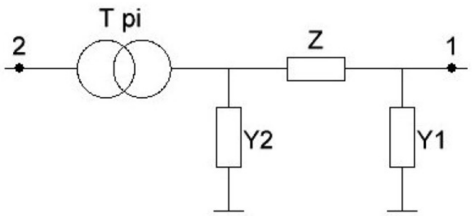

Рис. 3. Схема замещения и параметры полуволновой линии

В идеальной полуволновой линии напряжения и токи по ее концам равны по модулю и находятся в противофазе. Из этого следует, что идеальная полуволновая линия может быть представлена идеальным трансформатором с коэффициентом трансформации равным минус единице, который в дальнейшем будет называться полуволновым трансформатором. Схема замещения полуволновой линии представляет собой два каскадно-соединенных элемента: полуволнового трансформатора и модифицированной полуволновой линии, которая в свою очередь состоит из полуволнового трансформатора и самой полуволновой линии (рис. 3) [1].

Матрица коэффициентов модифицированной полуволновой линии в этом случае определяется как:

$$M_\pi = \begin{vmatrix} -ch\alpha l & -\dot{Z}_w sh\alpha l \\ -\dfrac{sh\alpha l}{\dot{Z}_w} & -ch\alpha l \end{vmatrix} T_\pi = -\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$M_\pi^* = M_\pi T_\pi = \begin{vmatrix} ch\alpha l & \dot{Z}_w sh\alpha l \\ \dfrac{sh\alpha l}{\dot{Z}_w} & ch\alpha l \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_\pi^* & B_\pi^* \\ C_\pi^* & D_\pi^* \end{vmatrix}$$

И согласно общим соотношениям, определяющим связь между коэффициентами четырехполюсника и П-образной схемой замещения, получим:

$$Z = B_\pi^* = Z_w \alpha l = \frac{r_0 l}{2}$$

$$Y_1 = Y_2 = \frac{D_\pi^* - 1}{B_\pi^*} = \frac{A_\pi^* - 1}{B_\pi^*} = \frac{\alpha l}{2Z_w} = \frac{r_0 l}{4Z_w^{\ 2}}$$

Особенностью полуволновых линий является зависимость напряжения и токов вдоль линии от передаваемой мощности, характерными основными пунктами на линии являются параметры в начале, конце и середине передачи. Пропускная способность такой линии характеризуется максимальной мощностью, которая ограничивается повышением напряжения в средней части линии при передаче мощности больше натуральной (рис. 4) [1].

Поэтому для оценки пропускной способности линии надо исходить от допустимых длительных напряжений в средней части линии и от длительно допустимых напряжений на подстанции. Пропускная способность полуволновой линии или ее максимальная мощность должна определяться из условия [1]:

$$U_{\max cp} \le U_1 \left(\frac{P_{пр}}{P_{w1}} + \frac{\alpha l}{2} \right),$$

где $U_{\max cp}$ – максимально длительно допустимое напряжение в средней части линии, U_1 – напряжение на отправном конце линии, $P_{пр}$ – пропускная способность электропередачи, P_{w1} – натуральная мощность линии, αl – коэффициент затухания.

Учитывая, что напряжение на отправном конце линии ограничивается максимально допустимым напряжением подстанционного оборудования U_{max}, имеем [2]:

$$P_{пр} \le P_{w1\,max} \left(\frac{U_{\max cp}}{U_{max}} + \frac{\alpha l}{2} \right),$$

где $P_{w1\,max}$ – натуральная мощность линии при наибольшем рабочем напряжении.

С учетом анализа всех вышеизложенных параметров на примере линии связи Усть-Илимская ГЭС – Колымская ГЭС в таблице приведены значения максимальной мощности полуволновой линии традиционной конструкции с горизонтальным расположением фаз над землей. При этом наибольшее рабочее напряжение принимается в качестве максимального допустимого напряжения в средней части линии и в концевых пунктах, где линия примыкает к подстанциям.

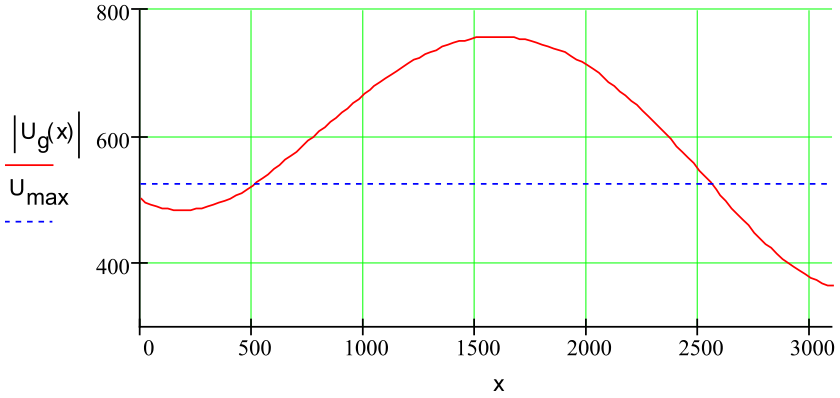

Рис. 4. Зависимость напряжения в полуволновой линии от расстояния при передаче мощности больше натуральной на примере связи Усть-Илимская ГЭС – Колымская ГЭС

Параметры и максимальная мощность полуволновой линии на примере лини связи Усть-Илимская – Колымская ГЭС

Показатели	Номинальное напряжение, кВ
	500
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	525
Длина линии, км	3100
Модуль волнового сопротивления, Ом	293
Коэффициент фазы, рад/км	$1{,}054 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент затухания, непер/км	$5{,}420 \cdot 10^{-5}$
Затухание полуволновой линии	0,163
Натуральная мощность линии при наибольшем рабочем напряжении, МВт	940
Пропускная способность линии, МВт	1019

Проведенный анализ распределенности параметров вдоль полуволновой линии с помощью уравнений длинных линий и методика определения параметров схем замещения и пропускной способности, а также основные показатели полуволновой линии могут быть применены к предложенным вариантам сверхдальнего транспорта электроэнергии для объединения изолированных районов Республики Саха (Якутии) с последующей связью с ОЭС Сибири, ОЭС Востока и ее интеграции в ЕНЭС Востока России.

Список литературы

1. Зильберман С.М. Методические и практические вопросы полуволновой технологии передачи электроэнергии: диссертация докт. техн. наук. – Красноярск, 2009. – 363 с.

2. Зильберман, С.М. Расчет нормальных режимов в электропередачах полуволнового типа // Материалы международной научно-технической конференции «Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния», том 1, Новосибирск, 2003 г. С. 106–112.

3. Кобылин В.П., Ли-Фир-Су Р.П., Кобылин А.В. Повышение пропускной способности и управляемости линий электропередачи переменного тока Республики Саха (Якутия) в составе ЕНЭС Востока России / Пленарный доклад. Материалы Всероссийской научно-практ. конференции «Сварка и безопасность»: в 2 т. Том. 1. – Якутск, 2012. – С. 72–82.

4. Схема комплексного развития производительных сил, транспорта и энергетики Республики Саха (Якутия) до 2020 года утвержденная Постановлением Правительства Республики Саха (Якутия) №411 от 6.09.2006 года.

5. Хоютанов А.М., Давыдов Г.И. Интеграция электроэнергетики Дальнего Востока в единую энергосистему России // Проблемы и перспективы управления энергетическими комплексами и сложными техническими системами в арктических регионах: труды Всероссийской конференции молодых ученых, 26–28 июня 2012 г. / [редкол.: Н.Ф. Стручков, Г.И. Давыдов]. – Якутск: Изд-во «Компания Дани-Алмас», 2012. – С. 88–92.

6. Хоютанов А.М., Кобылин В.П., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Нестеров А.С. Применение полуволновых технологий для повышения пропускной способности межсистемных и межрегиональных линий электропередач. В сборнике: Труды Евразийского симпозиума по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата Пленарные доклады. – 2014. – С. 467–471.