

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРХДАЛЬНИХ МЕЖСИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

А.М. Хоютанов, П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Россия*

По анализу способов передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния приведены наиболее перспективные варианты. Предлагается использование полуволновых или настроенных на полуволну электропередач. Доказано, что такие линии эффективны и значимы для транзита электрической энергии на сверхдальние расстояния, но по-прежнему остается нерешенным вопрос отбора мощности с линии. С использованием модели полуволновой линии электропередачи проведены исследования по отбору мощности. В результате разработаны методы и способы отбора мощности с полуволновой линии электропередачи. Особенностью полуволновых электропередач является изменение напряжения в средней части линии от максимального в режиме нагрузки до нуля в режиме холостого хода. Это не позволяет в режиме холостого хода применять в этой части линии параллельный отбор мощности. Установлено, что применение тиристорного стабилизатора параметров позволяет производить отбор в любой промежуточной точке полуволновой линии электропередачи, а компенсация только волновой длины линии является более эффективным способом регулирования напряжения в месте отбора. Результаты исследования показали возможность применения полуволновых линий электропередач в качестве магистральных при построении перспективных вариантов развития электрических сетей объединения Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Ключевые слова: полуволновая электропередача, отбор мощности, тиристорный стабилизатор параметров, компенсация параметров линии, объединение энергосистем.

Введение

В перспективном плане развития Российской Федерации Дальний Восток стоит на передовой позиции. Стратегическим приоритетом является обеспечение необходимым запасом прочности базовых отраслей экономики наряду с улучшением социального климата на территории региона. В связи с этим возникает необходимость в развитой производственной инфраструктуре. Одним из ключевых факторов такого развития является надежное и качественное энергоснабжение. Создание единой национальной электрической сети (ЕНЭС) Востока России, объединяющей Восточную Сибирь и Дальний Восток, позволило бы дать мощный толчок в развитии производственной инфраструктуры, повысить надежность электроснабжения в связи с присоединением к ЕНЭС России и создать конкуренцию на рынке электрической энергии [1]. Все эти мероприятия могут способствовать развитию экономики всего региона.

Из-за значительной территориальной отдаленности промышленных центров и специфики расположения региона возникает проблема транспорта электроэнергии на большие расстояния. Не секрет, что транспорт электроэнергии напрямую конкурирует с транспортом топлива по железной дороге, нефте- и газопроводам, но ввиду их удаленности и только развивающейся инфраструктуры в регионе строительство линий электропередач является единственным оптимальным решением для энергоснабжения.

Существует несколько способов передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния: на постоянном токе, компактные воздушные и управляемые самокомпенсирующиеся воздушные линии, многофазные электропередачи, полуволновые и настроенные на полуволну.

Вопрос о применении передач постоянного тока из-за отсутствия надежных коммутирующих аппаратов, отбора мощности и значительной капиталоемкости преобразовательных подстанций остается проблематичным [2].

Методы и способы повышения надежности и эффективности сверхдальних линий электропередачи

В основе оценки пропускной способности высоковольтной воздушной линии электропередачи лежит величина ее натуральной мощности P_H , которая определяется выражением [3]:

$$P_H = \frac{U_{Л}^2}{Z_B}, \quad (1)$$

где $U_{Л}$ – линейное напряжение,

$Z_B = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) / (g_0 + j\omega C_p)}$ – волновое сопротивление линии (R_0 , g_0 , L_0 , C_p – соответственно продольное сопротивление, поперечная проводимость, удельные эквивалентные индуктивность и рабочая емкость воздушной линии (ВЛ)).

Как видно из формулы, существуют два способа увеличения пропускной способности – изменением напряжения или волнового сопротивления.

Наиболее простым способом увеличения пропускной способности, является повышение линейного напряжения $U_{л}$. Однако повышение линейного напряжения имеет и свою отрицательную сторону:

- увеличение расстояния между фазами и между фазами и заземленными частями линии;
- увеличение потерь электроэнергии на корону;
- увеличение стоимости как самой ВЛ, так и подстанционного оборудования;
- увеличение электромагнитного экологического влияния линии [3];

Другим способом является понижение волнового сопротивления линии $Z_{в}$, что позволяет избежать вышеперечисленных недостатков.

Понижения волнового сопротивления можно добиться путем сближения фаз. На основе такого способа разработаны компактные трехфазные воздушные линии. На том же способе увеличения пропускной способности основываются управляемые самокомпенсирующиеся воздушные линии (УСВЛ). Разработанные варианты компактных воздушных линий и УСВЛ обладают на 20–50 % величиной натуральной мощности большей, чем обычные ВЛ того же класса напряжения [4]. Но многие вопросы требуют дальнейшего рассмотрения, экспериментальной проверки и проработок. Остается открытым вопрос разработки фазорегулирующих устройств и дальности электропередачи.

Для передачи больших потоков электроэнергии на дальние и сверхдальние расстояния можно использовать трехфазную систему с резервной фазой [5] и четырехфазную систему переменного тока (рис. 1).

При одинаковом фазном напряжении трехфазной и четырехфазной линии и идентичной конструкции их фаз, натуральная мощность четырехфазной линии превосходит почти в 1,5 раза натуральную мощность трехфазной линии [5].

Недостаток схемы преобразования фаз в том, что при нагруженной линии симметрия двухфазных напряжений нарушается в силу того, что схема несимметрична. Для фаз α и β внутреннее сопротивление источника электроэнергии различное [6].

По аналогии с двухцепными ВЛ были придуманы шестифазные электропередачи (ШЭП). В ШЭП с помощью фазопреобразующих устройств вместо двух 3-фазных систем с фазовым сдвигом 120° создается 6-фазная система с фазо-

вым сдвигом 60° . Компактная конструкция 6-фазной линии повышает ее натуральную мощность на одну цепь на 40–50 % по сравнению с обычной 3-фазной ВЛ. Слабой стороной ШЭП является более низкая ее надежность по сравнению с двухцепной ЭП с 3-фазными ВЛ на разных опорах. Также применение ШЭП на сверхвысоком напряжении является проблематичным из-за сложной конструкции ВЛ и пониженной надежности [7].

Альтернативой могут стать сверхдальние полуволновые и настроенные на полуволну электропередачи. Доказано, что они обладают большим запасом статической устойчивости и независимостью напряжений от нагрузки на отправном и приемном концах линии, то есть они не нуждаются в дополнительной установке компенсирующих устройств [8].

На современном этапе в результате проведенных исследований обоснована их значимость, доказана техническая осуществимость и экономическая эффективность. Такие линии могут передавать электроэнергию на расстояния от 2000–4000 км. Но особенностью полуволновых электропередач является значительное изменение напряжения вдоль линии. Так, в средней части линии напряжение меняется от минимальной величины, близкой к нулю в режиме холостого хода, до наибольшего рабочего напряжения в режиме наибольшей загрузки. Это не позволяет осуществлять традиционным способом параллельный отбор мощности из ПЭП на большей её части в режимах сниженных нагрузок. Для расширения области применения полуволновых электропередач требуется решение задачи промежуточного отбора мощности в средней части линии [9].

Для исследования режимов любой линии требуется схема замещения. Схема замещения линии полуволнового типа является частным случаем схемы замещения традиционной линии электропередачи. Как известно, связь между режимными параметрами линий электропередач устанавливается с помощью теории четырехполюсников по следующей формуле [10]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cos \lambda + j \dot{I}_2 \omega \sin \lambda, \\ \dot{I}_1 &= j \dot{U}_2 \frac{\sin \lambda}{\omega} + \dot{I}_2 \cos \lambda, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_2$ – напряжения и токи по концам линии; ω, λ – волновое сопротивление и волновая длина линии.

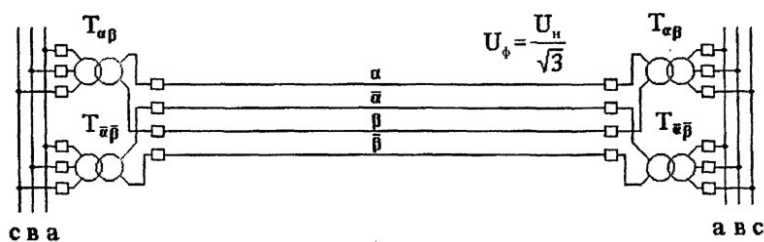


Рис. 1. Принципиальная схема четырехфазной ЭП

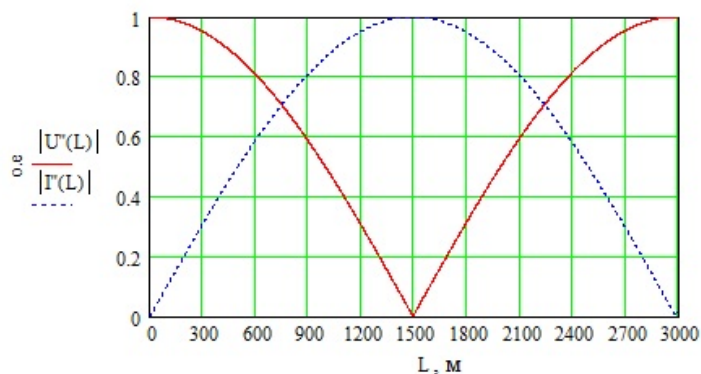


Рис. 2. Напряжения и токи вдоль полуволновой линии в режиме холостого хода

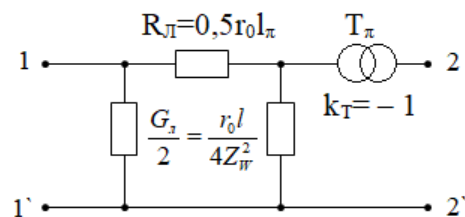


Рис. 3. Схема замещения полуволновой линии с использованием идеального трансформатора

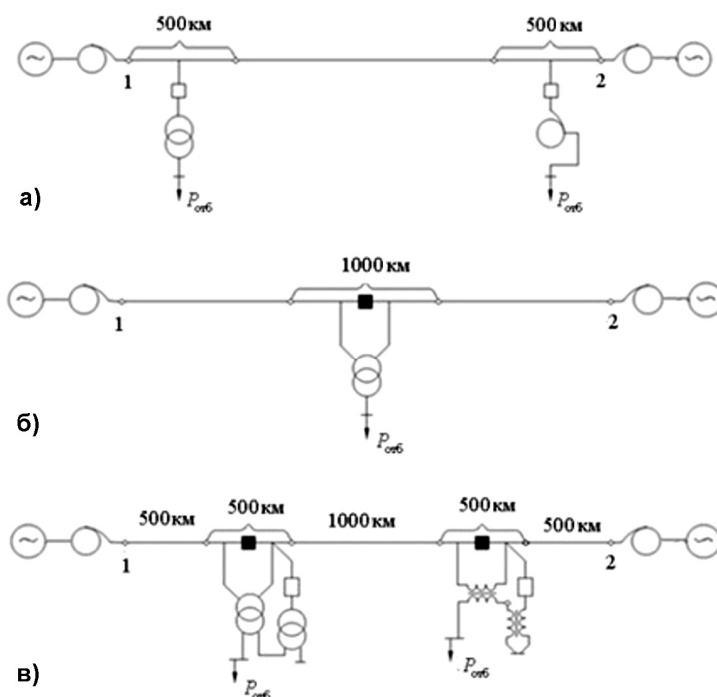


Рис. 4. Схемы промежуточного отбора мощности: а – параллельный; б – последовательный; в – последовательно-параллельный

Но для сверхдальних линий длиной более четверти волны традиционные схемы замещения не отражают всю полноту и создают ряд неудобств, например, для полуволновой линии продольное активное сопротивление колеблется в районе 0 и выходит за пределы положительного диапазона, а поперечные проводимости имеют чрезмерно большую величину [11]. Таким образом, традиционный подход для анализа и составления схемы замещения для полуволновой линии требует некоторых изменений с учетом свойств полуволновых линий. К таким свойствам относится равенство модулей и токов по концам электропередачи (рис. 2).

Предлагается использовать идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации $k = -1$, т. е. трансформатор, токи и напряжения, на зажимах которого находятся в противофазе [12]. Тогда, используя

каскадное соединение четырехполосников, получим схему замещения полуволновой линии [11] (рис. 3).

В Сибирском научно-исследовательском институте энергетики (г. Новосибирск) были разработаны три способа присоединения трансформаторов промежуточного отбора мощности к полуволновой электропередаче (рис. 4): параллельный (в конечных зонах), последовательный (в средней зоне), последовательно-параллельный (в промежуточных зонах между конечной и средней).

В средней части линии ток независимо от передаваемой мощности изменяется в пределах 5–10 % от натурального, поэтому в этой части традиционно используется последовательный отбор. Но все меняется в режиме холостого хода, когда из-за отсутствия тока нагрузки схема становится неработоспособной [13].

Поэтому предлагается использование универсального параллельно-последовательного отбора мощности из ПЭП с помощью тиристорного стабилизатора параметров (ТСП), разработанного в институте физико-технических проблем Севера СО РАН [14].

Работа ТСП основана на методе стабилизации напряжения в точке отбора мощности. На рис. 5 представлена схема полуволновой электропередачи, на которой показана нагрузка в произвольной точке m и устройство реактивной мощности в пункте n , которое может потребоваться для введения режимов по условию напряжения в допустимую область.

В качестве исходной информации принимается мощность и напряжение на приёмном конце полуволновой электропередачи, мощность нагрузки в промежуточной точке, которая в общем случае может включать мощность дополнительных компенсирующих устройств, необходимых по условию обеспечения приемлемого режима напряжений в любой точке линии. Кроме того, предусматривается установка устройств реактивной мощности в промежуточном пункте со стороны отправного конца линии [15].

Обеспечение потребителей отбора мощности допустимым уровнем напряжения в «электрическом центре» и в промежуточных точках вдоль

полуволновой линии электропередачи достигается двумя способами:

- первый вариант – изменением параметров линии электропередачи, которое привело бы к изменению ее эквивалентной волновой длины, то есть смещало бы только вдоль оси абсцисс зависимости напряжения от длины в нужном направлении (вправо или влево). Например, компенсацией только волновой длины линии, смещая только вдоль оси абсцисс от отправного конца линии путем передачи реактивно-емкостной мощности или путем передачи реактивно-индуктивной мощности от приемного конца линии (рис. 5) [16];

- второй вариант заключается в том, что нормализация режима напряжения в «электрическом центре» средней части полуволновой линии в допустимых областях реализуется изменением только волнового сопротивления линии и только вдоль оси ординат (рис. 6) [15].

Из рис. 6 видно, что график распределения напряжения может смещаться в разные стороны относительно оси абсцисс. Таким образом, в нужном месте отбора мощности можно поднять характеристику напряжения до требуемых ТСП значений (стабилизация возможна с 173 кВ). Но при данном варианте изменения параметров линии в некоторых режимах наблюдаются недопустимые уровни напряжений на концевых зонах (графики 4 и 6 на рис. 6).

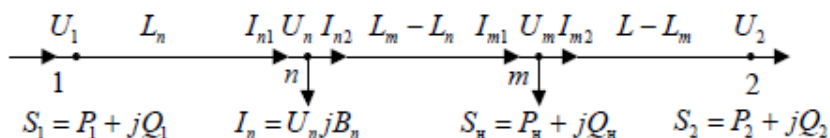


Рис. 5. Расчетная схема полуволновой линии с отбором мощности в произвольной промежуточной точке

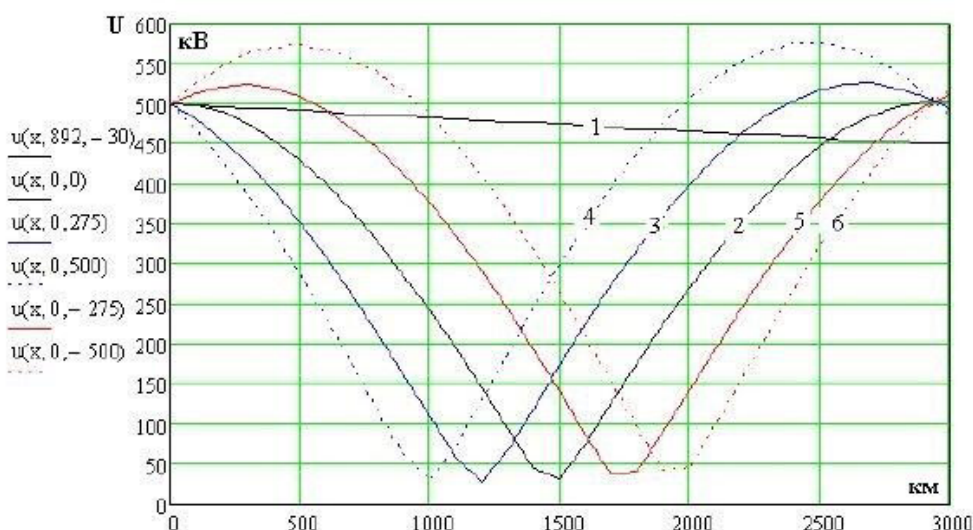


Рис. 6. Распределение напряжения вдоль ПЭП в режимах натуральной мощности и холостого хода в зависимости от реактивной мощности на линии

Используя дополнительные источники реактивно-емкостной мощности, реализующие уменьшение в n раз индуктивности линии и увеличение в n раз емкости линии, можно обеспечить подъем характеристики напряжения вдоль оси ординат путем уменьшения только волнового сопротивления линии $Z_B = \sqrt{x_0/b_0}$. Это достигается путем передачи реактивно-емкостной мощности. В этом случае дополнительные устройства на линии выбираются так, чтобы уменьшить величину Z_B . При этом волновая длина (естественный угол сдвига напряжения) $\alpha_0 = \sqrt{x_0 b_0}$ не изменится, а напряжение при отборе поднимется до требуемых ТСП значений (табл. 1) [15].

Рассматривая применение полуволновых линий, следует уделить внимание приоритетному направлению с выдачей мощности крупными электростанциями, включая Южно-Якутский гидроэнергетический комплекс, объединение Центрального, Южного и Западного энергетических районов Республики Саха (Якутия) с ОЭС Сибири, Востока и Магаданской области с экспортом в страны Азиатско-Тихоокеанского региона (рис. 7) [17].

При этом образуется несколько возможных вариантов реализации полуволновых электропередач (табл. 2). Наиболее перспективным следует считать вариант электрической связи с точкой объединения в городе Олекминске, при этом образуются три самостоятельные магистральные линии, позволяющие реализовать полуволновые тех-

Таблица 1

Параметры регулирования и значения напряжений в контрольных точках

Расстояние до точки отбора, м	Коэффициент регулирования	Напряжение, кВ		
		на отправном конце	в середине линии	в месте отбора
2500	0,33	512,251	490,732	432,379
2000	0,16	524,346	443,07	468,11
1700	0,17	519,998	353,451	337,012
1500	0,15	502,938	432,626	432,626
1300	0,13	514,366	492,947	497,135
1000	0,147	524,558	440,628	473,058
500	0,15	513,814	367,282	511,323

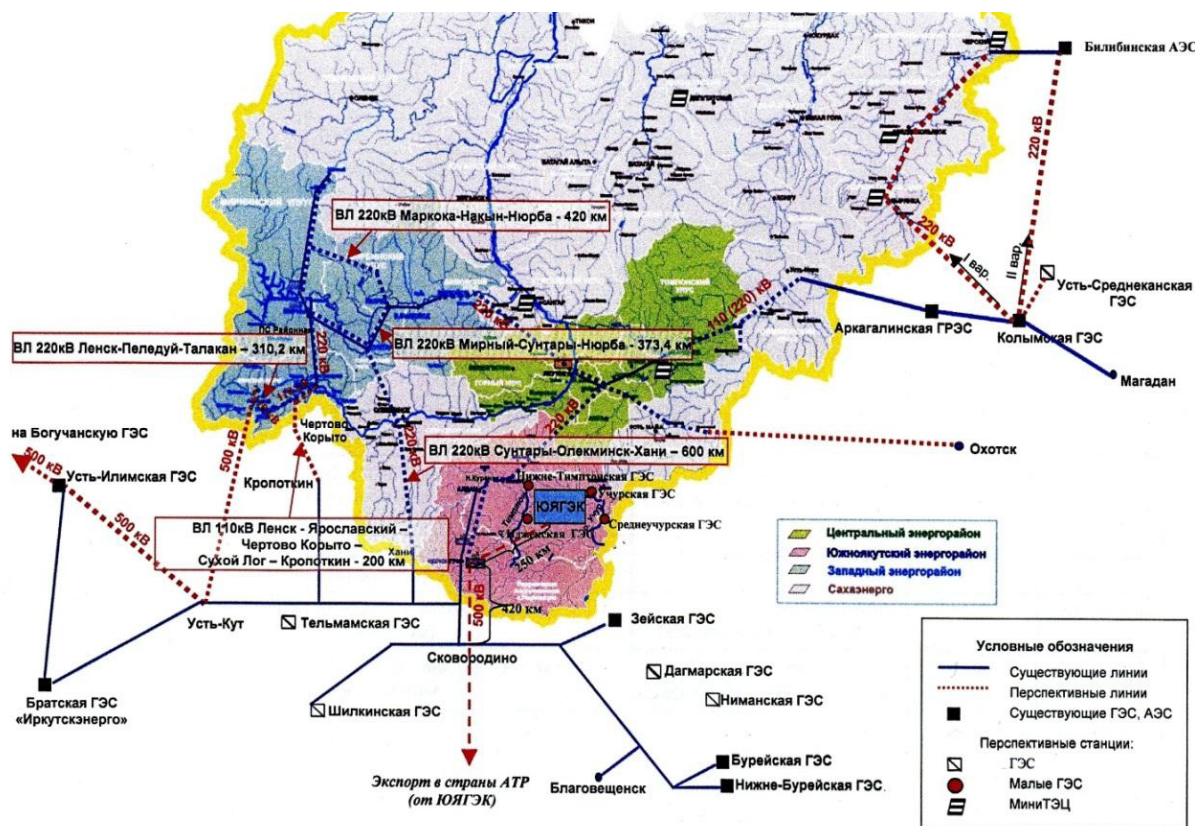


Рис. 7. Перспективная схема развития электросетевых объектов на территории Республики Саха (Якутия)

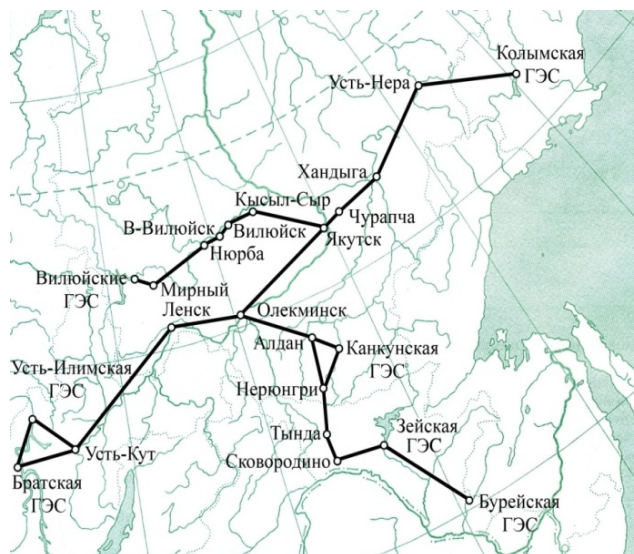


Рис. 8. Трасса магистральной линии полуволнового типа между объединениями Восточной Сибири, Республики Саха (Якутия) и Магаданской области

Таблица 2

Основные характеристики магистральной линии полуволнового типа между объединениями Восточной Сибири, Республики Саха (Якутия) и Магаданской области

Показатели	Значения
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, Нп/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

нологии: Усть-Илимская ГЭС – Колымская ГЭС, Усть-Илимская ГЭС – Бурейская ГЭС и Вилуйская ГЭС – Бурейская ГЭС (рис. 8) со следующими характеристиками (табл. 2) [17].

Заключение

Таким образом, разработанные методики расчета режимов напряжений в полуволновой электропередаче позволяют осуществлять отбор мощности с линии в любой точке подключения независимо от расстояния. Предложенный второй способ стабилизации режимных параметров на промежуточной подстанции не имеет недостатков первого способа и может быть использован для глубокого регулирования напряжения в месте отбора в случаях, когда напряжение в месте отбора находится в требуемых ТСП пределах, регулирование может быть выполнено первым способом. Сформированные варианты перспективного развития электроэнергетических центров Восточной Сибири и Дальнего Востока с применением полуволновых

технологий позволяют обеспечить надежным электроснабжением и дать мощный импульс для развития экономики всего региона.

Литература

1. Хоютанов, А.М. Методы обеспечения устойчивой работы самокомпенсирующейся линии с промежуточными отбором мощности в составе энергообъединения Восточной Сибири, Якутии и Дальнего Востока / А.М. Хоютанов, П.Ф. Васильев // Труды VI евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата 24–29 июня 2013 г.: сб. науч. работ. – Якутск, 2013. – С. 134–138.
2. Распределение параметров вдоль полуволновой электропередачи и её пропускная способность, в составе объединения «ЕНЭС Востока России» / А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, Г.И. Давыдов и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 4-5. – С. 872–875.

3. Мисриханов, М.Ш. Сближение фаз ВЛ – один из способов получения простых компактных электропередач повышенной пропускной способности / М.Ш. Мисриханов, А.Ю. Токарский // *Повышение эффективности энергосистем. Электроэнергетика. Труды ИГЭУ сб. науч. работ.* – М.: Энергоатомиздат, 2003. – Вып. 6: – С. 162.
4. Постолатий, В.М. Повышению пропускной способности и управляемости электропередач переменного тока / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова // *Материалы междунар. научно-техн. конф. «Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния».* – Новосибирск, 2003. – Т. 1. – С. 106–112.
5. Красильникова, Т.Г. Выбор и обоснование конструкции ВЛ СВН с резервной фазой / Т.Г. Красильникова // *Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния».* – Новосибирск, 2003. – Т. 1. – С. 118–127.
6. Применение полуволновых технологий для повышения пропускной способности межсистемных и межрегиональных линий электропередач / А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, П.Ф. Васильев и др. // *Труды VII евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата.* – Санкт-Петербург, 2014. – С. 467–471.
7. Красильникова, Т.Г. Разработка четырехфазной технологии передачи электроэнергии на дальние расстояния: автореф. дис. д-ра техн. наук: Новосибирск, 2013. – 41 с.
8. Разработка научно-методологического сопровождения реализации энергетической стратегии региона Севера с учетом топливно-энергетического комплекса и магистральных линий электропередачи развития ЕНЭС на Востоке России / А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, В.А. Седалищев и др. – Якутск: Институт физико-технических проблем Севера, 2013. – 96 с. – Деп. в ВИНТИ, № 249-В2013 от 27.08.2013.
9. Промежуточный отбор мощности из полуволновой электропередачи / А.В. Кобылин, Г.И. Самородов, С.М. Зильберман и др. // *Электричество.* – 2015. – № 6. – С. 4–11.
10. Дьяков, А.Ф. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т. / под общ. ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергопрогресс, 2012.
11. Зильберман, С.М. Методические и практические вопросы полуволновой технологии передачи электроэнергии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: Красноярск, 2009. – 39 с.
12. Самородов, Г.И. Четырехфазные электропередачи / Г.И. Самородов // *Известия РАН. Энергетика.* – 1995. – № 6. – С. 101–108.
13. Пат. 2607649 Российская Федерация. Способ отбора мощности из полуволновой электропередачи в «электрическом центре» / А.М. Хоютанов, Р.П. Ли-Фир-Су, В.П. Кобылин, А.В. Кобылин; заявитель и патентообладатель Институт физико-технических проблем Севера СО РАН. – №2015126971, заявл. 02.07.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 7 с.
14. Хоютанов, А.М. Повышение надежности, живучести и эффективности самокомпенсирующейся линии с промежуточным отбором мощности в составе энергообъединения Восточной Сибири, Якутии и Дальнего Востока / А.В. Кобылин, А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин и др. // *Наука и образование.* – 2014. – № 1 (73). – С. 54–58.
15. Пат. 2559805 Российская Федерация. Устройство отбора мощности из магистральной линии электропередачи / А.В. Кобылин, Р.П. Ли-Фир-Су, В.П. Кобылин, М.П. Лебедев, П.Ф. Васильев, Д.Е. Афанасьев, В.А. Седалищев, Г.И. Давыдов; заявитель и патентообладатель Институт физико-технических проблем Севера СО РАН. – № 2014114749/07; заявл. 14.04.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22. – 5 с.
16. Пат. 2559024 Российская Федерация. Устройство отбора мощности из линии электропередачи / А.М. Хоютанов, Р.П. Ли-Фир-Су, В.П. Кобылин, А.В. Кобылин; заявитель и патентообладатель Институт физико-технических проблем Севера СО РАН. – №2014117828/07; заявл. 29.04.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22. – 5 с.
17. Кобылин, А.В. Повышение пропускной способности и управляемости линий электропередачи переменного тока Республики Саха (Якутия) в составе ЕНЭС Востока России / В.П. Кобылин, Р.П. Ли-Фир-Су, А.В. Кобылин // *Материалы Всероссийской научно-практ. конференции «Сварка и безопасность»:* пленарный доклад. – Якутск, 2012. – Т. 1. – С. 72–82.

Хоютанов Александр Михайлович, ведущий инженер отдела электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера, г. Якутск; shuriklater@mail.ru.

Васильев Павел Филиппович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера, г. Якутск; kb-8@mail.ru.

Кобылин Виталий Петрович, д-р техн. наук, заведующий отделом электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера, г. Якутск; v.p.kobylin@iptpn.yasn.ru.

Поступила в редакцию 3 июля 2017 г.

INCREASING OF RELIABILITY AND EFFICIENCY OF LONG-DISTANCE INTERSYSTEMS COMMUNICATIONS

A.M. Khoiutanov, *shuriklater@mail.ru*,

P.F. Vasilyev, *kb-8@mail.ru*,

V.P. Kobylin, *v.p.kobylin@iptpn.ysn.ru*

Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

According to the analysis of methods of electrical energy transmission to ultralong distances, the most perspective options are given. The use of the half-wave or set-up on a half-wave electricity transmissions is offered. It is proved that such lines are effective and significant for transit of electrical energy for ultralong distances, but the issue of output coupling from the line still remains undecided. With the use of half-wave power line model the research on output coupling are conducted. As a result, the methods and ways of output coupling from a half-wave power line are developed. The feature of half electricity transmissions is voltage variation in a middle part of the line from maximum, in the loading mode, to zero, in the idling mode. It doesn't allow one to apply parallel output coupling in the mode of idling in this part of the line. It is set that the use of the thyristor stabilizator of parameters allows one to make selection in any intermediate point half-wave power lines while compensating only the wave length of the line is a more effective method of voltage regulation in the place of selection. The research results showed a possibility of the application of half-wave power lines as the perspective options for the development of electrical networks connecting Eastern Siberia and the Far East.

Keywords: half electricity transmission, output coupling, thyristor stabilizator of parameters, compensating of parameters of the line, combining of power supply systems.

References

1. Khoiutanov A.M., Vasil'ev P.F. [Methods of Ensuring Steady Work of Self-compensated Line with Intermediate Selection of Power as Part of Power Association of Eastern Siberia, Yakutia and the Far East]. *Trudy VI evraziyskogo simpoziuma po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata 24–29 iyunya 2013 g: sb. nauch. rabot* [Works VI of the Euroasian Symposium on Problems of Durability of Materials and Cars for Regions of a Frigid Climate on June 24–29, 2013], Yakutsk, 2013, pp. 134–138. (in Russ.)
2. Khoiutanov A.M., Kobylin V.P., Davydov G.I., Nesterov A.S., Vasil'ev P.F. [Distribution of Parameters Along Half-wave Electricity Transmission and its Capacity as Part of Association “ENES of the East of Russia”]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Magazine of Applied and Basic Researches], 2016, no. 4-5, pp. 872–875. (in Russ.)
3. Misrikhanov M.Sh., Tokarskiy A.Yu. [Rapprochement of Phases VL – One of Ways of Receiving Simple Compact Electricity Transmissions of the Increased Capacity]. *Povyshenie effektivnosti energosistem. Elektroenergetika. Trudy IGEU Vyp. 6: sb. nauch. rabot* [Increase in Efficiency of Power Supply Systems. Power industry. Works of IGEU, vol.6], Moscow, Energoatomizdatel'stvo Publ., 2003, p. 162. (in Russ.)
4. Postolatiy V.M., Bykova. E.V. [Capacity Growth and Controllability of Electricity Transmissions of Alternating Current]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Peredacha energii peremennym tokom na dal'nie i sverkhdal'nie rasstoyaniya”* [Materials of the International Scientific and Technical Conference “Transmission of Energy by an Alternating Current on Long and Ultralong Distance”], Novosibirsk, 2003, vol. 1, pp. 106–112. (in Russ.)
5. Krasil'nikova T.G. [Choice and Justification of Construction of High-voltage Line with Reserve Phase]. *Materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. “Peredacha energii peremennym tokom na dal'nie i sverkhdal'nie rasstoyaniya”* [Materials of Intern. Scientific-techn. Conf. “Transmission of Energy by Alternating Current to Distant and Ultra-long Distances”], Novosibirsk, 2003, vol. 1, pp. 118–127. (in Russ.)
6. Khoiutanov A.M., Kobylin V.P., Vasil'ev P.F., Davydov G.I., Nesterov A.S. [Application of Half-wave Technologies to Increase Capacity of Inter-system and Inter-regional Power Lines]. *Trudy VII evraziyskogo simpoziuma po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata* [Proceedings of the VII Eurasian Symposium on Strength Problems of Materials and Machines for Cold-Climate Regions]. Sankt-Peterburg, 2014, pp. 467–471. (in Russ.)
7. Krasil'nikova T.G. *Razrabotka chetyrekhfaznoy tekhnologii peredachi elektroenergii na dal'nie rasstoyaniya* Avtoref. dokt. diss. [Development of Four-Phase Technology for Transmission of Electricity over Long Distances. Abstract of doct. diss.]. Novosibirsk, 2013, 41 p. (in Russ.)

8. Khoiyutanov A.M., Kobylin V.P., Sedalishchev V.A., Li-Fir-Su R.P., Khoiyutanov A.M., et al. *Razrabotka nauchno-metodologicheskogo soprovozhdeniya realizatsii energeticheskoy strategii regiona Severa s uchëtom toplivno-energeticheskogo kompleksa i magistral'nykh liniy elektroperedachi razvitiya ENES na Vostoke Rossii* [Development of Scientific and Methodological Support for Implementation of Energy Strategy of the North Region Taking into Account Fuel and Energy Complex and Main Transmission Lines of the UNEG Development in the East of Russia]. Institute of Physical and Technical Problems of the North, Yakutsk, 2013, 96 p.
9. Kobylin A.V., Samorodov G.I., Zil'berman S.M., Kobylin V.P., Khoiyutanov A.M. [Intermediate Power Take-off from Half-Wave Power Transmission]. *Electrical Technology Russia*, 2015, no. 6, pp. 4–11. (in Russ.)
10. D'yakov A.F. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy* [Electric Networks of Ultra- and Ultra-High Voltage UES of Russia. Theoretical and Practical Basis], in 3 vol., edited by D'yakov A.F., Moscow, Energoprogress Publ, 2012.
11. Zil'berman S.M. *Metodicheskie i prakticheskie voprosy poluvolnovoy tekhnologii peredachi elektroenergii Avtoref. dokt. diss.* [Methodical and Practical Questions of Half-wave Technology of Electric Power Transmission. Abstract of doct. diss.], Krasnoyarsk, 2009. 39 p.
12. Samorodov G.I. [Four-phase Power Transmission]. *Moscow, Izvestiya RAN; Energetika* [Russian Academy of Sciences; Power Engineering], 1995, no. 6, pp. 101–108. (in Russ.)
13. Khoiyutanov A.M., Li-Fir-Su R.P., Kobylin V.P., Kobylin A.V. *Sposob otbora moshchnosti iz poluvolnovoy elektroperedachi v "elektricheskom tsentre"* [Method of Power Take-off from Half-wave Power Transmission in "Electrical Center"]. Patent RF, no. 2607649, 2015.
14. Kobylin A.V., Khoiyutanov A.M., Kobylin V.P., et al. [Increase in Reliability, Survivability and Efficiency of Self-compensating Line with Intermediate Power Take-off as Part of Energy Association of Eastern Siberia, Yakutia and the Far East]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2014, no. 1(73), pp. 54–58. (in Russ.)
15. Kobylin A.V., Li-Fir-Su R.P., Kobylin V.P., Lebedev M.P., Vasil'ev P.F., Afanas'ev D.E., Sedalishchev V.A., Davydov G.I. *Ustroystvo otbora moshchnosti iz magistral'noy linii elektroperedachi* [Power Take-off from Main Power Transmission Line]. Patent RF, no. 2559805, 2014.
16. Khoiyutanov A.M., Li-Fir-Su R.P., Kobylin V.P., Kobylin A.V. *Ustroystvo otbora moshchnosti iz linii elektroperedachi* [Power Take-off from Power Transmission Line]. Patent RF, no. 2559024, 2014.
17. Kobylin A.V., Li-Fir-Su R.P., Kobylin A.V. [Increase of Carrying Capacity and Controllability of AC Power Lines of the Republic of Sakha (Yakutia) in the UNEG of the East of Russia]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakt. konferentsii "Svarka i bezopasnost": plenarnyy doklad* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Conference "Welding and Safety": Plenary Report], 2012, vol. 1, pp. 72–82. (in Russ.)

Received 3 July 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Хоютанов, А.М. Повышение надежности и эффективности сверхдальних межсистемных связей / А.М. Хоютанов, П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 67–75. DOI: 10.14529/power170308

FOR CITATION

Khoiyutanov A.M., Vasilyev P.F., Kobylin V.P. Increasing of Reliability and Efficiency of Long-Distance Intersystems Communications. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 67–75. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170308
