

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУВОЛНОВОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ТИРИСТОРНЫМ СТАБИЛИЗАТОРОМ ПАРАМЕТРОВ

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

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

Приведена оценка эффективности внедрения полуволновых электропередач с промежуточным отбором мощности. Транспорт электрической энергии на переменном токе на дальние и сверхдальние расстояния возможен двумя различными способами – с помощью компенсированной, а также полуволновой электропередач. Первый предусматривает компенсацию реактивных параметров электропередачи с применением источников дополнительной реактивной мощности, устанавливаемых на подстанциях в промежуточных пунктах электропередачи. Второй предполагает использование полуволновой технологии передачи электрической энергии. Задача отбора мощности из полуволновой электропередачи осуществляется с помощью тиристорного стабилизатора параметров. Для сравнительной оценки эффективности были сопоставлены капитальные затраты на строительство воздушных линий и подстанций при прочих равных условиях для обоих вариантов электропередачи. Расчет производился по методике расчета показателей стоимости электропередач, утвержденных и рекомендованных ПАО «ФСК ЕЭС». Приведенные расчеты показали, что затраты на строительство воздушных линий и подстанций для полуволновых электропередач с тиристорным стабилизатором параметров дешевле на 11 % по сравнению со строительством компенсированной электропередачи.

Ключевые слова: компенсированная электропередача, полуволновая электропередача, отбор мощности, тиристорный стабилизатор параметров, технико-экономические показатели.

Введение

Транспорт электрической энергии на переменном токе на дальние и сверхдальние расстояния возможен двумя различными способами – с помощью компенсированной, а также полуволновой электропередач [1–14].

Первый предусматривает компенсацию реактивных параметров электропередачи с применением источников дополнительной реактивной мощности (ИРМ), устанавливаемых на подстанциях в промежуточных пунктах электропередачи (рис. 1) [10, 11].

У электропередач данного типа сохранение устойчивости и обеспечение всех необходимых условий для ее выполнения являются основными ограничивающими пропускную способность факторами [10, 11].

С помощью источников реактивной мощности компенсируется волновая длина линии, реактивные параметры и поддерживается рабочее напряжение в местах установки при различных передаваемых мощностях.

Для осуществления компенсации, источники реактивной мощности устанавливаются в промежуточных пунктах через определенное расстояние

[10, 11]. Для поддержания рабочего напряжения в промежуточных узлах линии устанавливаются шунтирующие с подмагничиванием реакторы, статические или асинхронизированные тиристорные компенсаторы, подключаемые через согласующие трансформаторы. Количество установленных на линии ИРМ прямо пропорционально влияют на величину пропускной способности (чем больше число ИРМ, тем выше пропускная способность линии).

Недостатком компенсированных электропередач является строительство промежуточных подстанций, а также использование многочисленных ИРМ.

Во втором способе используются полуволновые и настроенные на полуволну транзитные электропередачи (ПЭП). Сверхдальние электропередачи с длиной электрической волны равной половине волны (λ) по условию устойчивости обеспечивают необходимую пропускную способность без устройств продольной компенсации (УПК) и ИРМ. Электропередачи данного типа могут передавать электрическую энергию на расстояния 2000–4000 км на различных напряжениях [1–17, 19, 22].

Сравнительная характеристика электропередач на сверхдальние расстояния показана в табл. 1.

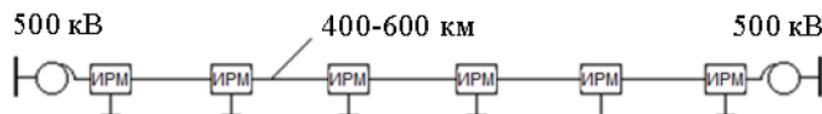


Рис. 1. Компенсированные электропередачи

Сравнительная характеристика КЭП и ПЭП [11]

№	Показатели		КЭП		ПЭП	
	1	Оптимальный диапазон, км	50 Гц	300–1500		2000–4000
	60 Гц		200–1200		1500–3000	
2	Номинальное напряжение, кВ		750	1150	750	1150
3	Пропускная способность, ГВт		2–4	5–10	2–4	5–10
4	Фактор, ограничивающий пропускную способность		Устойчивость		Повышение напряжения	
5	Мощность компенсирующих устройств		0,5–3,0		0–1,5	
6	Промежуточный отбор мощности		Без ограничений		Специальное оборудование	
7	Степень адаптации к условиям развития энергосистемы		Высокая		Средняя	

Промежуточное подключение энергосистем к транзитной полуволновой линии электропередачи (ЛЭП) для отбора мощности или взаимного обмена электрической энергией может быть осуществлено с помощью тиристорного стабилизатора параметров (ТСП), основные принципы работы которой отражены в работах [15–22].

Как видно из табл. 1, пропускная способность данных электропередач идентична, а оптимальная длина электропередачи варьируется в широких пределах, поэтому для сравнительной оценки эффективности сопоставляем капитальные затраты на строительство воздушных линий и подстанций при прочих равных условиях. При этом следует отметить, что ПЭП конструктивно ничем не отличаются от традиционных трехфазных линий электропередачи, как и КЭП.

Методика и технико-экономическое сопоставление КЭП и ПЭП с отборами мощности

Расчет производился по методике расчета показателей стоимости электропередач, утвержденных и рекомендованных ПАО «ФСК ЕЭС» [23]. При прочих равных условиях, отличие между двумя вариантами будет в учете стоимостных показателей подстанций с ИРМ и с применением ТСП.

В общем случае эффективность от внедрения будет определяться сопоставлением сумм приведенных затрат, которые рассчитываются с помощью следующей формулы

$$Z = E_n \times K + I, \quad (1)$$

где K – капитальные вложения в сооружение объекта, тыс. руб.; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; I – ежегодные издержки на эксплуатацию объекта, тыс. руб./год.

Расчет основных затрат на строительство электропередачи был проведен в базисных ценах 2000 года с учетом индексов конвертации цен на текущий период и поправочных коэффициентов, указанных в [23]. Класс напряжения – 500 кВ, длина ЛЭП – 3000 км.

Показатели базисной стоимости ВЛ (без учета налога на добавленную стоимость (НДС)) напряжением 500 кВ приведены в табл. 2. Показатели в данной таблице учитывают комплексные производственные затраты, предусмотренные в [24], которые соответствуют усредненным условиям сооружения ВЛ и нормативному ветровому давлению до 0,61 кПа.

При строительстве ВЛ в условиях более сложных, чем приведены в табл. 2, затраты на строительство корректируются с применением поправочных коэффициентов [23]. Исходя из многообразия пунктов усложняющих условия строительства ВЛ, применим усредненный коэффициент с учетом всех совокупных факторов, равный 1,025.

Для получения полной стоимости ВЛ к показателям табл. 2 добавляют затраты, сопутствующие строительству при условном пересчете для решетчатых стальных опор на напряжение 500 кВ, которые составляют:

Таблица 2

Базисные показатели стоимости ВЛ (без учета НДС) напряжением 500 кВ

Напряжение ВЛ, кВ	Характеристика промежуточных опор	Провода сталеалюминиевые сечением, шт. × мм ²	Количество цепей на опоре, шт.	Базисные показатели стоимости ВЛ, тыс. руб./км		
				Стальные опоры		Железобетонные опоры
				решетчатые	многогранные	
500	Свободностоящие двухстоечные, с внутренними связями	3 × 330	1	2315	2673	–

3,3 % – временные здания и сооружения;
6,0 % – прочие работы и затраты для объектов, находящихся в удаленных труднодоступных регионах, не обеспеченных основными производственными ресурсами;

3,18 % – содержание службы заказчика-застройщика, строительный контроль;

8,5 % – проектно-исследовательские работы, затраты на проведение экспертизы проектной документации и авторский надзор.

Складывая все приведенные затраты и добавляя к рассчитанному итогу стоимость, учитываемую по приведенным выше коэффициентам, получаем итоговый необходимый объем капитальных вложений для строительства условной ВЛ (табл. 3), где колонка «Номер таблицы» указывает ссылку на таблицы, пункты и приложения, указанные в [23].

Исходя из базисных показателей стоимости ВЛ 500 кВ, с учетом всех коэффициентов, стои-

мость затрат на строительство ВЛ составит 46 703,477 млн руб.

Расчета затрат на строительство подстанций в отличие от воздушных линий будет отличаться для двух вариантов. Для определения количества опорных подстанций в компенсированной ЭП определяется количество узлов подключения ИРМ. В транзитной электропередаче через традиционную ВЛ 500 кВ с проводами АС 3×330/43 предельная длина электропередачи при условии допустимых пределов по напряжению соответствует примерно 1000 км (рис. 2). Соответственно, для электропередачи длиной в 3000 км потребуется как минимум 2 подстанции с подпором напряжения. В случае учета отбора мощности к стоимости подстанций с ИРМ добавятся стоимость подстанций с отбором мощности с ЛЭП. Для сравнения, при прочих равных условиях, предположим, что на протяжении всей электропередачи будут два узла с отбором мощности, отличные от узлов установки ИРМ.

Таблица 3

Укрупненный расчет затрат на строительство ВЛ 500 кВ

№ п/п	Составляющие затрат	Номер таблицы в [23]	Расчет затрат	Величина затрат, тыс. руб.
1.1	Стоимость ВЛ 500 кВ по базисным показателям	Табл. 1	3000 × 2315	6 945 000
1.2	Вырубка просеки	Табл. 4	1200 × 389	466 800
1.3	Устройство лежневых дорог	Табл. 4	300 × 650	130 000
1.4	Установка выключателей по концам электропередачи	Табл. 13	2 × 28814	57 628
2	Итого			7 527 056
3	Стоимость строительства ВЛ (с учетом затрат, сопутствующих строительству 23,48 %)	п. 2.3	7527056 × 1,2348	9 294 409
4	Стоимость с учетом регионального коэффициента для ДФО	Прил. 2	9078382 × 1,09	10 130 906
5	Стоимость с учетом коэффициента пересчета 4,61 к ценам 1 квартала 2019 г.		10130906 × 4,61	46 703 477

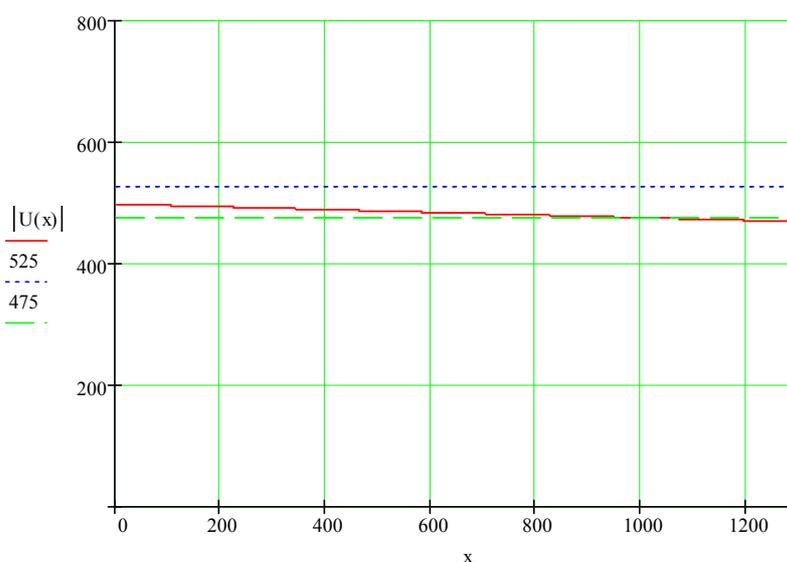


Рис. 2. Предельное расстояние передачи электрической энергии по традиционной ВЛ 500 кВ

Электроэнергетика

Расчет стоимости подстанций будет также проводиться по методике, указанной в [23]. Базисные показатели стоимости условной подстанции приведены в табл. 4.

Для получения полной стоимости подстанции к сумме стоимостных показателей ее основных элементов добавляются затраты, сопутствующие строительству, которые исчисляются от этой суммы [23] и составляют:

1,3 % – временные здания и сооружения;

9,0 % – прочие работы и затраты для объектов, находящихся в удаленных труднодоступных регионах, не обеспеченных основными производственными ресурсами;

3,18 % – содержание службы заказчика-застройщика, строительный контроль;

8 % – проектно-изыскательские работы и авторский надзор.

Исходя из базисных показателей стоимости открытой ПС 500 кВ, с учетом регионального коэффициента, стоимость затрат на строительства типовой подстанции составит 3 924 788 тыс. руб. (табл. 5).

Типовая компоновка подстанций с регулированием напряжения включает в себя управляемые шунтирующие реакторы на стороне ВН и статический тиристорный компенсатор на стороне НН. Учитывая укрупненные показатели стоимости установки дополнительного оборудования, затраты на строительство одной подпорной подстанции составят 4 890 726 тыс. руб. (табл. 6).

Показатели стоимости СТК, приведенные в табл. 6, учитывают: собственно, СТК, включая систему охлаждения; РУ НН, силовые и контрольные кабели в пределах ячейки и до панелей в ОПУ; панели релейной защиты, установленные в

Таблица 4

Базисные показатели стоимости открытой ПС напряжением 500 кВ

Напряжение ПС, кВ	Кол-во и мощность Т (АТ), шт. × МВА	Схема РУ на стороне		Кол-во ВЛ		Капитальные вложения, тыс. руб.
		ВН	СН	ВН	СН	
500/110/10	2 × 250	Четырёхугольник. 500-7	Одна рабочая, секционированная выключателем, система шин. 110-9	2	4	642 960

Таблица 5

Укрупненный расчет затрат на строительство ПС 500 кВ

№ п/п	Составляющие затрат	Номер таблицы в [23]	Расчет затрат	Величина затрат, тыс. руб.
1.1	Базисный показатель стоимости ПС 500/110/10 кВ 2 × 250 МВА	Табл. 10	642 960	642 960
1.2	Итого			642 960
2.1	Стоимость строительства ПС (с учетом затрат, сопутствующих строительству 21,48 %)	п. 2.3	642 960 × 1,2148	781 068
2.2	Стоимость с учетом регионального коэффициента для ДФО	Прил. 2	781 068 × 1,09	851 364
2.3	Стоимость с учетом коэффициента пересчета 4,61 к ценам 1 квартала 2019 г.		851 364 × 4,61	3 924 788

Таблица 6

Укрупненный расчет затрат на строительство ПС 500 кВ с ИРМ

№ п/п	Составляющие затрат	Номер таблицы в [23]	Расчет затрат	Величина затрат, тыс. руб.
1.1	Базисный показатель стоимости ПС 500/110/10 кВ 2 × 250 МВА	Табл. 10	642 960	642 960
1.2	СТК-15 160 МВАр	Табл. 19	50 240	50 240
1.3	УШР-500 кВ 3 × 60 МВА	Табл. 20	108 000	108 000
2	Итого			801 200
2.1	Стоимость строительства ПС (с учетом затрат, сопутствующих строительству 21,48 %)	п. 2.3	801 200 × 1,2148	973 298
2.2	Стоимость с учетом регионального коэффициента для ДФО	Прил. 2	781 068 × 1,09	1 060 895
2.3	Стоимость с учетом коэффициента пересчета 4,61 к ценам 1 квартала 2019 г.		1 060 895 × 4,61	4 890 726

ОПУ и относящиеся к ячейке; строительно-монтажные работы по сооружению здания и монтажу оборудования.

В случае полуволновой электропередачи с ТСП учет стоимости подстанций будет исходить из количества узлов подключения и капитальных вложений на строительство самого ТСП. Затраты, связанные со строительством нетиповых проектных решений, определяются индивидуальным расчетом или по объекту-аналогу [23]. Учитывая данное, и из-за сложности оценки реальных капитальных затрат на строительство ТСП, воспользуемся данными, приведенными в той же методике. Расчет укрупненных показателей будет производиться выбором максимальных стоимостных показателей на одинаковые классы напряжения (табл. 7).

Сведем укрупненный расчет затрат в табл. 8. Сравнительная оценка полученных результатов расчета укрупненных показателей показана в табл. 9.

По формуле (1) требуется учет ежегодных затрат на эксплуатацию, приведенные расчеты показали эффективность подстанций с ТСП по сравнению с компенсированной ЭП. При учете эксплуатационных затрат по укрупненным показателям требуется расчет для четырех подстанций в компенсированной ЭП против двух подстанций с ТСП. Очевидно, что затраты на содержание четырех подстанций обойдутся дороже. Поскольку по стоимостному показателю подстанции с ТСП имеют преимущество (табл. 9), расчеты энергетической эффективности, а также учет эксплуатационных затрат были опущены.

Укрупненный расчет затрат на строительство ТСП

Таблица 7

№ п/п	Составляющие затрат	Расчет затрат	Величина затрат, тыс. руб.
1.1	Вольтодобавочный трансформатор (стоимостной аналог АТ 250 МВА 500/110)	61 000	61 000
1.2	Регулировочный трансформатор 63МВА 110/10	12 377	12 377
1.3	Питающий трансформатор 63МВА 110/10	12 377	12 377
1.4	Синхронный компенсатор КСВБ-160	163 506	163 506
1.5	Блок силовых тиристоров с микропроцессорной системой управления	16 × 53	850
2	Итого		250 110

Укрупненный расчет затрат на строительство ПС 500 кВ с ТСП

Таблица 8

№ п/п	Составляющие затрат	Номер таблицы в [24]	Расчет затрат	Величина затрат, тыс. руб.
1.1	Базисный показатель стоимости ПС 500/110/10 кВ 2 × 250 МВА	Табл. 10	642 960	642 960
1.2	Затраты на ТСП		250 110	250 110
2	Итого			893 070
2.1	Стоимость строительства ПС (с учетом затрат, сопутствующих строительству 21,48 %)	п. 2.3	893 070 × 1,2148	1 084 901,4
2.2	Стоимость с учетом регионального коэффициента для ДФО	Прил. 2	781 068 × 1,09	1 182 542,6
2.3	Стоимость с учетом коэффициента пересчета 4,61 к ценам 1 квартала 2019 г.		1 060 895 × 4,61	5 451 521,2

Сравнительная оценка двух вариантов электропередачи

Таблица 9

№ п/п	Составляющие затрат	Расчет затрат	Величина затрат, тыс. руб.
	КЭП		
1.1	Затраты на строительство ПС 500 кВ	2 × 3 924 788	7 849 576
1.2	Затраты на строительство ПС 500 кВ с ИРМ	2 × 4 890 726	9 781 452
1.3	Затраты на строительство ВЛ 500 кВ	46 703 477	46 703 477
2	Итого		64 334 505
	ПЭП		
1.1	Затраты на строительство ПС 500 кВ с ТСП	2 × 5 451 521,2	10 903 042,8
1.2	Затраты на строительство ВЛ 500 кВ	46 703 477	46 703 477
2	Итого		57 606 519,8

Заклучение

Исходя из сравнительной оценки (см. табл. 9), видно, что капитальные затраты на строительство полуволновой электропередачи с промежуточным отбором мощности обойдутся дешевле на 11 %, чем у компенсированной электропередачи при прочих равных условиях.

Литература

1. Hubert, F.J. *Half-Wavelength Power Transmission Lines* / F.J. Hubert, M.R. Gent // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1965. – vol. 84. – P. 965974. DOI: 10.1109/tpas.1965.4766125

2. Prabhakara, F.S. *Performance of Tuned Half-Wave-Length Power Transmission Lines* / F.S. Prabhakara, K. Parthasarathy, H.N.R. Rao // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1969. – vol. PAS-88. – P. 1795–1802. DOI: 10.1109/tpas.1969.292295

3. Wang, G. *Research status and prospects of the half-wavelength transmission lines* / G. Wang, Q. Li, L. Zhang // *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. – 2000.

4. *A study and design of half-wavelength lines as an option for long distance power transmission* / M.L. Santos, J.A. Jardini, M. Masuda, G.L.C. Nicola // *IEEE PES Trondheim PowerTech: The Power of Technology for a Sustainable Society*. – 2011. DOI: 10.1109/ptc.2011.6019235

5. *Reliability and economic analysis of UHV Half-Wave-length AC transmission* / Y. Song, B. Fan, Y. Bai et al. // *IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON*. – 2012. DOI: 10.1109/powercon.2012.6401413

6. *Route construction analysis and overvoltage characteristics of true type half wavelength AC transmission line test* / P. Gu, P. Wang, B. Han et al. // *Dianli Jianshe/Electric Power Construction*. – 2018. – Vol. 39. – P. 101–107.

7. Tang, L. *Study on the current differential protection for half-wave-length AC transmission lines* / L. Tang, X. Dong, B. Wang, S. Shi // *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. – 2018. DOI: 10.1109/pesgm.2017.8273851

8. Tavares, M.C. *Half-wave length line energization case test – proposition of a real test* / M.C. Tavares, C.M. Portela // *International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE*. – 2008. DOI: 10.1109/ichve.2008.4773923

9. Iliceto, F. *Analysis of half-wave length transmission lines with simulation of corona losses* / F. Iliceto, E. Cinieri // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1988. – Vol. 3. – P. 2081–2091. DOI: 10.1109/61.194020

10. Самородов, Г.И. *Оптимизация схем и параметров дальних и сверхдальних электропередач переменного тока: автореф. дис. ... д-ра техн. наук* / Г.И. Самородов. – Новосибирск, 1990. – 32 с.

11. Самородов, Г.И. *Сверхдальние электропередачи* / Г.И. Самородов. – Новосибирск, 1994. – 112 с.

12. Зильберман, С.М. *Методические и практические вопросы полуволновой технологии передачи электроэнергии: автореф. дис. д-ра техн. наук* / С.М. Зильберман. – Красноярск, 2009. – 39 с.

13. Щербаков, В.К. *Возможности передач настроенных на полуволну: сб. науч. ст.* / В.К. Щербаков // *Вопросы дальних электропередач*. – Новосибирск, 1960. – С. 3–20.

14. Щербаков, В.К. *Технические и экономические характеристики настроенных электропередач* / В.К. Щербаков. – Новосибирск: Наука, 1965. – 68 с.

15. *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.

16. *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*. – СПб., 2014. – С. 467–471.

17. *Разработка научно-методологического сопровождения реализации энергетической стратегии региона Севера с учетом топливно-энергетического комплекса и магистральных линий электропередачи развития ЕНЭС на Востоке России* / В.П. Кобылин, В.А. Седалищев, Р.П. Ли-Фир-Су и др. – Якутск: Институт физико-технических проблем Севера, 2013. – 96 с. – Деп. в ВИНТИ, № 249-В2013 от 27.08.2013.

18. 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

19. 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.

20. 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.

21. *Промежуточный отбор мощности из по-*

лувошной электропередачи / А.В. Кобылин, Г.И. Самородов, С.М. Зильберман и др. // *Электричество*. – 2015. – № 6. – С. 4–11.

22. Устройство отбора мощности из линии электропередачи / А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 65–71. DOI: 10.14529/power190307

23. СТО 56947007-29.240.124-2012. Укрупнённые стоимостные показатели линий электропередачи и подстанций напряжением 35–750 кВ. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». – 2013.

24. СТО 56947007-29.240.55.016-2008. Нормы технологического проектирования воздушных линий электропередачи напряжением 35–750 кВ. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». – 2008.

Хоютанов Александр Михайлович, ведущий инженер отдела электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск; shuriklater@mail.ru.

Кобылин Виталий Петрович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела электронергетики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН; ee.iftps@yandex.ru.

Васильев Павел Филиппович, канд. техн. наук, заведующий отделом электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН; kb-8@mail.ru.

Давыдов Геннадий Иванович, научный сотрудник отдела электронергетики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН; dav_gen@mail.ru.

Поступила в редакцию 15 ноября 2019 г.

DOI: 10.14529/power200106

EVALUATION OF THE APPLICATION EFFICIENCY OF THE HALF-WAVE ELECTRIC TRANSMISSION LINE WITH A THYRISTOR PARAMETER STABILIZER

A.M. Khoiutanov, shuriklater@mail.ru,
V.P. Kobylin, ee.iftps@yandex.ru,
P.F. Vasilyev, kb-8@mail.ru,
G.I. Davydov, dav_gen@mail.ru

V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS,
Yakutsk, Russian Federation

The article assesses the efficiency of half-wave power transmission with intermediate power take-off and its implementation. The transportation of AC electricity over extremely long distances is possible using two fundamentally different methods, i.e. compensated and half-wave power transmissions. The former method involves compensated power transmission with power take-offs, which include reactive power sources located at the terminal and intermediate points of the line. The latter method uses half-wave and half-wave power transmission. The task of power selection from a half-wave power transmission is carried out using a thyristor parameter stabilizer. To conduct a comparative assessment of efficiency the capital costs for the construction of overhead lines and substations are compared for both transmission options, while other parameters are equal. The calculation is made according to the aggregated cost indicators of power lines and substations with a voltage of 35-750 kV, approved and recommended by PJSC FGC UES. The above calculations show that the cost of constructing overhead lines and substations for half-wave power transmissions with a thyristor stabilizer parameters is 11 % cheaper than the construction of compensated power transmission.

Keywords: compensated power transmission, half-wave power transmission, power take-off, thyristor parameters stabilizer, technical and economic indicators.

References

1. Hubert F.J., Gent M.R. Half-Wavelength Power Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1965, vol. 84, pp. 965–974. DOI: 10.1109/tpas.1965.4766125
2. Prabhakara F.S., Parthasarathy K., Rao H.N.R. Performance of Tuned Half-Wave-Length Power Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, vol. PAS-88, pp. 1795–1802. DOI: 10.1109/tpas.1969.292295

3. Wang G., Li Q., Zhang L. Research status and prospects of the half-wavelength transmission lines. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2000.
4. Santos M.L., Jardini J.A., Masuda M., Nicola G.L.C. A study and design of half-wavelength lines as an option for long distance power transmission. *IEEE PES Trondheim PowerTech: The Power of Technology for a Sustainable Society*, 2011. DOI: 10.1109/ptc.2011.6019235
5. Song Y., Fan B., Bai Y., Qin X., Zhang Z. Reliability and economic analysis of UHV half-wave-length AC transmission. *IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON*, 2012. DOI: 10.1109/powercon.2012.6401413
6. Gu P., Wang P., Han B., Xiang Z., Ban L., Zhao H., Jiao C. Route construction analysis and overvoltage characteristics of true type half wavelength AC transmission line test. *Electric Power Construction*, 2018, vol. 39, pp. 101–107.
7. Tang L., Dong X., Wang B., Shi S. Study on the current differential protection for half-wave-length AC transmission lines. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2018. DOI: 10.1109/pesgm.2017.8273851
8. Tavares M.C., Portela C.M. Half-wave length line energization case test – proposition of a real test. *International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2008*. DOI: 10.1109/ichve.2008.4773923
9. Iliceto F., Cinieri E. Analysis of half-wave length transmission lines with simulation of corona losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1988, vol. 3, pp. 2081–2091. DOI: 10.1109/61.194020
10. Samorodov G.I. *Optimizatsiya skhem i parametrov dal'nikh i sverkhdal'nikh elektroperedach peremennogo toka: avtoref. dokt. diss.* [Optimization of Circuits and Parameters of Long-Distance and Ultra-Long Alternating Current Transmissions. Abstract of doct. diss.]. Novosibirsk, 1990. 32 p.
11. Samorodov G.I. *Sverkhdal'nie elektroperedachi poluvolnovogo tipa* [Ultra-Long Power Transmission of a Half-wave Type]. Novosibirsk, Science Publ., 2003. 177 p.
12. 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.
13. Shcherbakov V.K. [Possibilities of transmissions tuned to a half-wave]. *Voprosy dal'nikh elektroperedach* [Issues of long-distance power transmission]. Novosibirsk, 1960, pp. 3–20. (in Russ.)
14. Shcherbakov V.K. *Tekhnicheskie i ekonomicheskie kharakteristiki nastroennykh elektroperedach* [Technical and economic characteristics of tuned power lines]. Novosibirsk, Science Publ., 1965. 68 p.
15. Khoyutanov 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.)
16. Khoyutanov 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]. St. Petersburg, 2014, pp. 467–471. (in Russ.)
17. Kobylin V.P., Sedalishchev V.A., Li-Fir-Su R.P., Khoyutanov A.M., et al. *Razrabotka nauchno-metodologicheskogo soprovozhdeniya realizatsii energeticheskoy strategii regiona Severa s uchetom 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.
18. Khoiutanov 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
19. Khoyutanov 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.
20. Khoyutanov 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.
21. Kobylin A.V., Samorodov G.I., Zil'berman S.M., Kobylin V.P., Khoyutanov A.M. *Promezhutochnyy otbor moshchnosti iz poluvolnovoy elektroperedachi* [Intermediate Power Take-Off from Half-Wave Power Transmission]. *Electrical Technology Russia*, 2015, no. 6, pp. 4–11.
22. Khoiutanov A.M., Kobylin V.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I. Power Takeoff from a Transmission Line: a Special Unit. *Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 65–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190307

23. STO 56947007-29.240.124-2012. *Ukrupnennye stoimostnye pokazateli liniy elektroperedachi i podstantsiy napryazheniem 35-750 kV* [The aggregated cost indicators of power lines and substations with a voltage of 35–750 kV]. *Standart organizatsii OAO "FSK EES"* [The standard of organization of JSC FGC UES]. Moscow, 2013.

24. STO 56947007-29.240.55.016-2008. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya vozdushnykh liniy elektroperedachi napryazheniem 35-750 kV* [Standards for the technological design of overhead power lines with a voltage of 35-750 kV]. *Standart organizatsii OAO "FSK EES"* [The standard of organization of JSC FGC UES]. Moscow, 2008.

Received 15 November 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Оценка эффективности применения полуволновой линии электропередачи с тиристорным стабилизатором параметров / А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 47–55. DOI: 10.14529/power200106

FOR CITATION

Khoiutanov A.M., Kobylin V.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I. Evaluation of the Application Efficiency of the Half-Wave Electric Transmission Line with a Thyristor Parameter Stabilizer. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 47–55. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200106
