

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А.С. Нестеров, П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин

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

Система транспорта электрической энергии является важнейшей составляющей электроэнергетической системы. Модернизация, оптимизация ее работы, увеличение пропускной способности, а также вариативность схем подключения при условии поддержания или повышения показателей надежности является архиважной задачей всей энергетической отрасли. Статья посвящена разработке схемно-технического решения для двухцепной трехфазной линии электропередачи с определением нового режима ее работы – «с расщепленной резервной фазой». Дается характеристика традиционным и нетрадиционным видам электропередачи переменного тока, таким как воздушные линии с резервной фазой, шестифазные линии электропередачи и управляемые линии электропередачи (FACTS). Приводится анализ путей повышения эффективности воздушных линий электропередачи, применяющих структурное и функциональное резервирование. Подробно рассмотрено схемно-техническое решение для двухцепной линии электропередачи с расширением режимов работы. Описаны возможные режимы работы двухцепных линий электропередачи. Рассмотрены пути повышения натуральной мощности линии электропередачи. Приведены результаты расчета пропускной способности линий с расщепленной резервной фазой и проведен сравнительный анализ пропускной способности воздушных линий электропередачи в режиме с расщепленной резервной фазой с линиями в традиционном исполнении.

Ключевые слова: функциональное резервирование, резервная фаза, воздушная линия электропередачи, пропускная способность, волновое сопротивление.

Введение

Развитие электрических сетей является одним из важнейших показателей уровня электроэнергетики страны. В России более 50 % оборудования электрических сетей выработало свой расчетный ресурс, хотя еще сохраняет достаточную работоспособность. Ухудшение технического состояния электрических сетей является одной из основных причин роста повреждаемости воздушных линий электропередачи и силового оборудования подстанций. В данное время остро стоит задача реконструкции и (или) модернизации электрических сетей, что требует колоссальных капитальных вложений. С данной точки зрения, задача выбора оптимального технического решения для воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) с необходимой степенью надежности является наиболее актуальной.

На территории России для передачи электрической энергии на дальние расстояния чаще всего применяются двухцепные ВЛЭП, которые приняты в качестве объекта исследования.

Целью данной работы является определение пропускной способности двухцепной воздушной линии электропередачи в аварийном режиме, т. е. в режиме с «расщепленной резервной фазой» (РРФ).

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

- проведение анализа работы ВЛЭП в режиме с РРФ;
- определение основных параметров линии;
- определение и сопоставление пропускной способности ВЛЭП с РРФ с традиционной двухцепной линией в аварийном режиме.

Д.Т. Жанаев, Т.Б. Заславская в своей работе [1] разработали и предложили схему резервирования трехфазной рабочей цепи резервной фазой, которая в нормальном режиме работы линии электропередачи присоединяется параллельно к одной из рабочих фаз, а в аварийном режиме переключается автоматически взамен поврежденной фазы. Так, например, при эксплуатации линии электропередачи «Куйбышев – Москва» на напряжении 400 кВ расщепление на три провода фазы показало снижение волнового сопротивления с 400 до 277 Ом, а натуральная мощность возросла с 400 до 576 МВт. Очевидным недостатком резервирования рабочей цепи четвертой фазой является наличие несимметрии и недоиспользование суммарного сечения проводов.

Необходимо отметить большой прогресс управляемых линий электропередачи переменного тока [2], известных за рубежом как FACTS, а также шестифазных линий электропередачи, созданных американскими специалистами, повышающие натуральную мощность линии на 50–70 % [3], но

слабой стороной которых является пониженная надежность по сравнению с двухцепными.

Авторами работы «Повышение эффективности эксплуатации воздушных линий электропередачи с резервной фазой» [4] предложен путь повышения эффективности эксплуатации двухцепной воздушной линии электропередачи. При увеличении числа проводов в фазе во многих случаях препятствием является невозможность уменьшения междуфазных расстояний. Расщепление проводов может быть реализовано только за счет кардинального изменения схемы подвески проводов и конструкции опор. Следует также отметить, что реализация данного способа на двухцепных воздушных линиях представляет собой несложную техническую задачу, так как для реализации данного технического решения потребуется только установка дополнительных выключателей нагрузки на открытых распределительных устройствах, увеличив лишь ширину коридора порталных соединений. При этом исполнение опор линий электропередачи не предполагается к конструктивному изменению.

Определение основных параметров и расчет пропускной способности ВЛЭП с РРФ

Общеизвестно, что предел передаваемой по линии мощности P_H , являющейся показателем величины пропускной способности линии электропередачи, определяется выражением $P_H = \frac{U_{ном}^2}{Z_c}$, где $U_{ном}$, Z_c – номинальное напряжение и волновое сопротивление соответственно.

Необходимо отметить, что основными путями повышения натуральной мощности воздушной линии являются:

1. Увеличение номинального напряжения сети. Пропускная способность линии имеет прямо пропорциональную зависимость по отношению к напряжению.
2. Уменьшение волнового сопротивления ли-

нии. Достигается за счет расщепления фазных проводов [5], а также за счет конструктивного изменения воздушных линий путем компактизации геометрических параметров [6–8].

3. Применение устройств продольной компенсации. При продольной компенсации реактивной мощности последовательно нагрузке подключаются конденсаторы, однако возникают аварийные режимы, так как через конденсаторы проходит ток нагрузки, в том числе токи короткого замыкания [9].

4. Использование управляемых источников реактивной мощности на промежуточных подстанциях (статические тиристорные компенсаторы, синхронные компенсаторы и др.).

Разработанное схемно-техническое решение повышает эффективность электропередачи двухцепных ВЛЭП (рис. 1) уменьшением волнового сопротивления линии при определенном режиме работы, указанном в схеме [4].

Функциональное резервирование линии электропередачи в соответствии со схемно-техническим решением [4] основывается на переключении традиционной двухцепной линии электропередачи в аварийном режиме на режим одноцепной с расщепленной фазой, в качестве которой выступает вторая рабочая цепь. Это достигается, согласно изобретению, «расщеплением фазы» на три составляющие. Таким образом, создается «резервная цепь – фаза», которая при нормальном режиме работы является рабочей цепью двухцепной линии, присоединенной параллельно. При этом обеспечиваются симметрии полных сопротивлений и напряжений по фазам. При однофазном повреждении на рабочей цепи составляющие «расщепленной» резервной фазы объединяются коммутирующими выключателями и автоматически присоединяются к рабочей цепи взамен поврежденной фазы. Необходимо пояснить, что РРФ может выступать как одна, так и вторая из рабочих цепей двухцепной ВЛЭП.

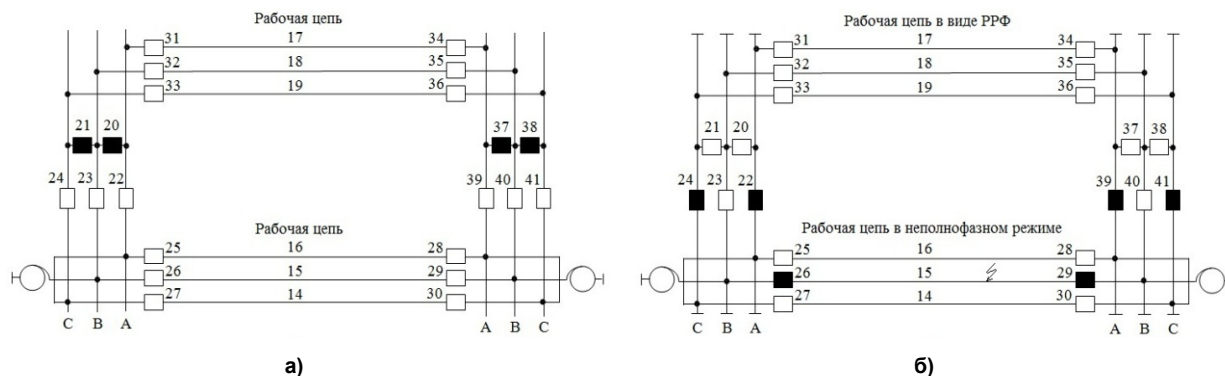


Рис. 1. Устройство резервирования линии электропередачи: а – двухцепная ВЛЭП в нормальном режиме работы; б – двухцепная ВЛЭП в режиме одноцепной с РРФ. 1 – опора; 2–7 – траверсы; 8–13 – гирлянды подвесных изоляторов; 14–16 – фазные провода рабочей цепи; 17–19 – «резервная фаза», расщепленная на три составляющие токопровода; 20–41 – выключатели нагрузки

Результаты расчета

Тип ВЛЭП	Напряжение, кВ	Волновое сопротивление, Ом	Пропускная способность, МВт
Двухцепная в АР	220	407,7	118,7
ВЛЭП с РРФ	220	268,7	180,1

Сравнение пропускной способности проводилось между трехпроводной, т. е. одной любой цепи двухцепной линии и ВЛЭП в режиме с РРФ. В аварийном режиме ВЛЭП с РРФ при обрыве одной из фаз любой из рабочей цепи «вторая» цепь объединяется в РРФ взамен поврежденной фазы «первой» цепи.

Исходными данными были приняты: длина линии $L = 200$ км, напряжение $U = 220$ кВ. Характер нагрузки – активно-индуктивный. Марка провода АС-300/39.

Для трехпроводной линии параметры при исходных данных были приняты [10] и расчет основывался по общеизвестным методикам, в том числе по [11]. Результаты расчета представлены в таблице.

Для ВЛЭП с РРФ взяты конструктивные параметры двухцепной воздушной линии свободностоящей промежуточной металлической опоры башенного типа (рис. 2).

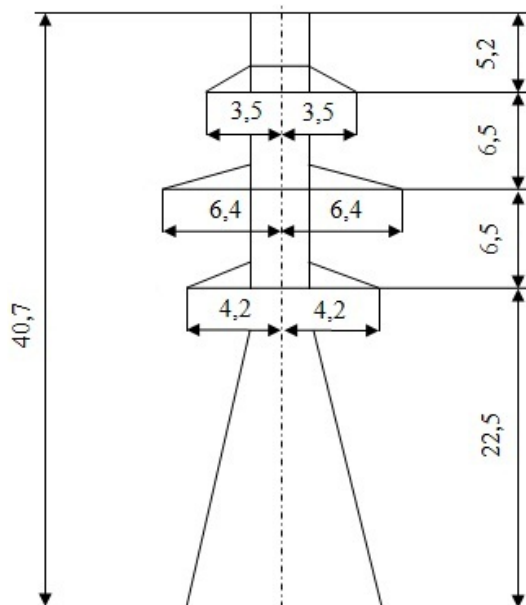


Рис. 2. Схема свободностоящей промежуточной металлической опоры башенного типа двухцепной ВЛ

Определяем активное удельное сопротивление фазы, расщепленной на три провода:

$n = 3$ – число проводов в расщепленной фазе;

$$x_{0300} = 0,429 \text{ Ом/км};$$

$$b_{0300} = 2,645 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/км};$$

$$r_{0300} = 0,096 \text{ Ом/км};$$

$$r_{0p} = \frac{r_{0300}}{n} = 0,032 \text{ Ом/км}.$$

Среднегеометрическое расстояние между проводами:

$$D = 6,5 \text{ м};$$

$$D_{ст} = \sqrt[3]{2} \cdot D = 8,2 \text{ м}.$$

Эквивалентный радиус расщепленной фазы:

$$d = 24,8 \text{ мм, диаметр провода } a = 6500 \text{ мм};$$

$$R_{эк} = \sqrt[3]{\frac{d}{2} \cdot a^2} = 806,1 \text{ мм}.$$

Определяем удельное значение индуктивного сопротивления расщепленной фазы:

$$X_0 = 0,144 \cdot \log\left(\frac{D_{ст} \cdot 10^3}{R_{эк}}\right) + \frac{0,0157}{n} = 0,183 \text{ Ом}.$$

Определим эквивалентные удельные значения сопротивлений с одной расщепленной фазой взамен рабочей фазы, например «В»:

Удельное значение емкостной проводимости:

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log\left(\frac{D_{ст}}{R_{эк}}\right)} = 4,295 \cdot 10^{-6} \text{ См/км};$$

$$b_{0э} = \frac{b_{0300}}{2} + b_0 = 5,618 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Удельное значение активной проводимости:

$$g_0 = \frac{\Delta P_{кор} \cdot 10^{-3}}{U^2} = 1,736 \cdot 10^{-8} \text{ См/км}.$$

Удельное значение индуктивного сопротивления:

$$x_{0э} = \frac{x_{0300}}{2} + x_0 = 0,398 \text{ Ом}.$$

Удельное значение активного сопротивления:

$$r_{0э} = \frac{r_{0300}}{2} + r_{0p} = 0,08 \text{ Ом}.$$

$$\chi^2 = \sqrt{(r_{0э} + ix_{0э}) \cdot (g_0 + ib_{0э})} = 1,509 \cdot 10^{-3}.$$

Волновое сопротивление:

$$Z_{с2} = \sqrt{\frac{(r_{0э} + ix_{0э})}{(g_0 + ib_{0э})}} = 268,7 \text{ Ом}.$$

Определение пропускной способности линии:

$$P_{max2} = \frac{U^2}{Z_{с3} \cdot \sin(\chi^2 \cdot L)} = 587,9 \text{ МВт};$$

$$P_{нат2} = \frac{U^2}{Z_{с3}} = 180,1 \text{ МВт}.$$

Результаты расчета представлены в таблице.

Проведенные расчеты воздушной линии электропередачи с расщепленной резервной фазой показывают, что в аварийном режиме натуральная мощность линии составила 180,1 МВт, что приблизительно на 35 % больше, чем для двухцепной линии электропередачи в аварийном режиме, когда одна цепь выводится из работы и линия работает в одноцепном режиме.

Результаты расчета подтверждают ранее рассмотренные методы увеличения пропускной способности линий электропередачи [12]. Предложенная схема обоснована с практической точки зрения [11], при этом подразумевается улучшение эксплуатационных показателей, что, в свою оче-

редь, должно привести к повышению показателей надежности работы линии в целом. Данное схемно-техническое решение было предложено как один из вариантов повышения эффективности работы ВЛЭП для централизации изолированной зоны Республики Саха (Якутия) при условии увеличения нагрузок последней [13].

Заключение

1. Предложено усовершенствование работы схемы выдачи мощности на двухцепных ВЛЭП посредством функционального резервирования линии электропередачи возможностью переключения на новый (дополнительный) режим работы.

2. Расчет и сравнительный анализ показали увеличение пропускной способности ВЛЭП с РРФ на 35 % по сравнению с двухцепной ВЛЭП в аварийном режиме, что является существенным увеличением и доказывает вероятность применения данного режима как дополнительного, если нет возможности или экономически нецелесообразно переоснащение существующей ВЛЭП.

3. Имеются логические предпосылки предполагать увеличение надежности воздушной линии, а именно таких показателей, как число часов перерыва электроснабжения и вероятных относительных недоотпусков электроэнергии при плановых и аварийных ремонтах, что требует дополнительной качественной и количественной оценки.

Литература

1. Жанаев, Д.Т. *Линии электропередач с резервной фазой* / Д.Т. Жанаев, Т.Б. Заславская. – Саратов: Саратовский университет, 1990. – 120 с.

2. Horowitz, S.H. *The Future of Power Transmission* / S.H. Horowitz, A.G. Phadke, B.A. Renz // *IEEE Power and Energy Magazine*. – 2010. – Vol. 8, no. 2. – P. 34–40. DOI: 10.1109/MPE.2009.935554

3. Stewart, J.R. *High Phase order – Ready for Application* / J.R. Stewart, I.S. Grant // *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*. – 1982. – Vol. 101, no. 6. – pp. 1757–1767. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317229

4. *Повышение эффективности эксплуатации воздушных линий электропередачи с резервной фазой* / А.С. Нестеров, М.П. Лебедев, В.П. Кобылин и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 45–48. DOI: 10.14529/power160406

5. Глазунов, А.А. *Электрические сети и системы* / А.А. Глазунов. – Москва: Госэнергоиздат, 1960. – 368 с.

6. Лысков, Ю.И. *Компактные воздушные линии электропередачи 330, 500 и 750 кВ с опорами «охватывающего типа»* / Ю.И. Лысков, А.И. Курносков, Н.Н. Тиходеев // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1984. – № 4. – С. 3–11.

7. *Transmission line reference book: 115–138 kV. Compact line designs* // EPRI. – 1978.

8. Paris, L. *Die Zukunft der Ultra – Hochspannungsleitungen* / L. Paris // *Elektrizitätswirtschaft*. – 1970. – No. 19. – P. 514–520.

9. Козьма, А.А. *Электрические станции, сети и системы* / А.А. Козьма. – Харьков: Харьковский университет, 1963. – 380 с.

10. *Справочник по проектированию электрических сетей* / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2009. – 392 с.

11. Пат. 2578040 Российская Федерация. *Устройство резервирования линии электропередачи* / А.С. Нестеров, М.П. Лебедев, В.П. Кобылин, П.Ф. Васильев; заявитель и патентообладатель Институт физико-технических проблем Севера СО РАН. – № 2014151341/07; заявл. 17.12.2014; опубл. 20.03.2016, Бюл. № 8. – 6 с.

12. *Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах* / Г.Н. Александров, Г.А. Евдокунин, Т.В. Лисочкина и др. – Л.: Ленинградский университет, 1987. – 231 с.

13. *Альтернативные источники электроэнергии для снабжения предприятий промышленных центров Арктической зоны Якутии* / Г.И. Давыдов, В.П. Кобылин, А.В. Кобылин и др. // *Электротехника*. – 2017. – № 9. – С. 84–88.

Нестеров Андрей Сергеевич, ведущий инженер отдела электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера, г. Якутск; nesterov.as@inbox.ru.

Васильев Павел Филиппович, канд. техн. наук, заведующий отделом электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера, г. Якутск; kb-8@mail.ru.

Кобылин Виталий Петрович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера, г. Якутск; v.p.kobylin@iptpn.ysn.ru.

Поступила в редакцию 24 июля 2017 г.

CALCULATION AND ANALYSIS OF OVERHEAD TRANSMISSION LINE CAPACITY

A.S. Nesterov, *nesterov.as@inbox.ru*,

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

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

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

Power transport is the most important component of an electric power system. Modernization and optimization of its operation, increase in capacity, as well as variation in connection circuitry with maintained or improved reliability is a crucial objective for the whole energy industry. The paper is about creating a circuit-technical solution for a dual-circuit three-phase power transmission line whereby we define a new operating mode “with a split backup phase”. We herein describe conventional and non-conventional types of AC transmission such as overhead transmission lines, six-phase power lines, and flexible alternating current transmission systems (FACTS). We further analyze ways to improve the efficiency of overhead power transmission lines using structural and functional redundancy. A circuit-technical solution for a dual-circuit power transmission line with expanded operating modes is considered in detail. Possible operating modes of dual-circuit power lines are described. We also consider ways to increase the natural capacity of such lines. We have calculated the capacity of split backup phase lines and present the results of our calculations herein along with an analysis of such capacity in comparison to that of conventional transmission lines.

Keywords: functional redundancy, backup phase, overhead transmission line, line capacity, wave impedance.

References

1. Zhanaev D.T., Zaslavskaya T.B. *Linii elektroperedach s rezervnoy fazoy* [Power Lines with a Backup Phase]. Saratov, Saratovskiy Universitet Publ., 1990. 120 p.
2. Horowitz S.H., Phadke A.G., Renz B.A. The Future of Power Transmission. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 34–40. DOI: 10.1109/MPE.2009.935554
3. Stewart J.R., Grant I.S. High Phase order – Ready for Application. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, 1982, vol. 101, no. 6, pp. 1757–1767. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317229
4. Nesterov A.S., Lebedev M.P., Kobylin V.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I., Khoitunov A.M. Increasing Operational Efficiency of Overhead Power Lines with Back-Up Phase. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 45–48. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160406
5. Glazunov A.A. *Elektricheskie seti i sistemy* [Power Networks and Systems]. Moscow, Gosynergizdat Publ., 1960. 368 p.
6. Lyskov Yu.I., Kurnosov A.I., Tikhodeev N.N. [Compact 330, 500 and 750 kV Overhead Transmission Lines Using Portal-Design Transmission Towers]. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Energy and Transport], 1984, no. 4, pp. 3–11. (in Russ)
7. Transmission line reference book: 115–138 kV. Compact line designs. *EPRI*, 1978.
8. Paris L. Die Zukunft der Ultra – Hochspannungsleitungen. *Elektrizitätswirtschaft*, 1970, no. 19, pp. 514–520.
9. Koz'ma A.A. *Elektricheskie stancii, seti i sistemy* [Power Plants, Networks, and Systems]. Kharkiv, University of Kharkiv Publ., 1963. 380 p.
10. Faybisovich D.L. (Ed.) *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey* [Handbook on Power Network Design]. 3rd ed. Moscow, ENAS Publ., 2009, 392 p.
11. Nesterov A.S., Lebedev M.P., Kobylin V.P., Vasil'ev P.F. *Ustrojstvo rezervirovaniya linii elektroperedachi* [Power Line Backup Device]. Patent RF, no. 2578040, 2016.
12. Aleksandrov G.N. *Novye sredstva peredachi elektroenergii v energosistemakh* [New Ways to Transmit Power in Power Systems]. Leningrad, University of Leningrad Publ., 1987. 231 p.

13. Davydov G.I., Kobylin V.P., Kobylin A.V., Li-Fir-Su R.P., Sedalishchev V.A., Nesterov A.S. [Alternative Power Sources for Enterprises in the Industrial Centers of the Sakha Arctic Zone]. *Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 9, pp. 84–88. (in Russ.)

Received 24 July 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Нестеров, А.С. Анализ и расчет пропускной способности воздушных линий электропередачи / А.С. Нестеров, П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 21–26. DOI: 10.14529/power180103

FOR CITATION

Nesterov A.S., Vasilyev P.F., Kobylin V.P. Calculation and Analysis of Overhead Transmission Line Capacity. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 21–26. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180103
