<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-4-294-298>
УДК 621.315.1

Оценка надежности воздушной линии электропередачи с расщепленной резервной фазой

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

ФГБУН Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук

ул. Октябрьская 1, 677891, г. Якутск, Россия

Поступила / Received 08.08.2018

Принята к печати / Accepted for publication 17.10.2018

Передача электрической энергии является важнейшей составляющей электроэнергетической системы. Оптимизация, модернизация транспортной системы электроэнергетики, увеличение пропускной способности, а также вариативности схем подключения при условии сохранения требуемого уровня надежности и безопасности являются на сегодняшний день актуальными задачами в целом для энергетической отрасли. Рассмотрен вопрос определения эффективности работы схемно-технического решения для двухцепной трехфазной линии электропередачи с дополнительным режимом работы — «с расщепленной резервной фазой» и определению ее основных показателей надежности. Подробно представлено схемно-техническое решение для двухцепной линии электропередачи с расширением режимов работы. Функциональное резервирование линии электропередачи в соответствии со схемно-техническим решением основано на переключении традиционной двухцепной линии электропередачи в аварийном режиме на режим одноцепной с расщепленной фазой, в качестве которой выступает вторая рабочая цепь. Рассмотрены пути повышения натуральной мощности двухцепной линии электропередачи. Приведены результаты расчета пропускной способности линии с расщепленной резервной фазой и сравнения основных параметров воздушных линий электропередачи с дополнительным режимом работы — с расщепленной резервной фазой и линий электропередачи в традиционных режимах работы. Представлены результаты расчетов показателей надежности, такие, как вероятные относительные числа часов перерыва электроснабжения и недоотпуска электрической энергии. Сопоставление вариантов показало, что вероятный относительный недоотпуск электрической энергии двухцепной воздушной линии электропередачи с дополнительным режимом работы — с расщепленной резервной фазой, меньше приблизительно на 13%, чем традиционной двухцепной, что положительно скажется на маневренности и надежности работы всей системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: воздушная линия электропередачи, пропускная способность, волновое сопротивление, функциональное резервирование, расщепленная резервная фаза

Благодарности

Результаты работы, представленные в статье, получены в ходе выполнения НИР в рамках Госзаказа (проект АААА-А17-117080910032-0).

Адрес для переписки:

Васильев П. Ф.

ФГБУН Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук

ул. Октябрьская 1, 677891, г. Якутск, Россия
e-mail: kb-8@mail.ru

Address for correspondence:

Vasilyev P. F.

Larionov Institute of physical and technical problems of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Oktyabrskaya St., 1, 677891, Yakutsk, Russia

e-mail: kb-8@mail.ru

Для цитирования:

Васильев П. Ф., Нестеров А. С., Кобылин В. П. Оценка надежности воздушной линии электропередачи с расщепленной резервной фазой. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №4. – С. 294–298.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-4-294-298>

For citation:

Vasilyev P. F., Nesterov A. S., Kobylin V. P. [Assessment of reliability of an overhead transmission line with a split back-up phase]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2018, vol. 11, no. 4, pp. 294–298. (in Russian). <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-4-294-298>

Assessment of reliability of an overhead transmission line with a split back-up phase

Vasilyev P. F.*, Nesterov A. S., Kobylin V. P.

*Larionov Institute of physical and technical problems of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Oktyabrskaya St., 1, 677891, Yakutsk, Russia*

Transmission of electrical energy is the most important component of an electric power system. Optimization, modernization of the electric power transport system, increasing the capacity, as well as variability of connection arrangements, while maintaining the required level of reliability and safety, is regarded today as an urgent task for the energy industry as a whole. The article is devoted to the problem of determining the efficiency of the circuit design solution for a double-circuit three-phase power transmission line with an additional mode of operation — «with a split back-up phase» and determining its main reliability indicators. A circuit design solution for a double-circuit power transmission line with expansion of operating modes is presented in detail. The functional redundancy of the transmission line in accordance with the circuit design solution is based on switching of a conventional double-circuit power transmission line in the emergency mode to the single-circuit split-phase mode, which is the second working circuit. The ways of increasing the natural power of a double-circuit power transmission line are considered. The results of calculation of the capacity of a line with a split back-up phase and a comparison of the main parameters of overhead transmission lines with an additional mode of operation — with a split back-up phase — and power lines in conventional modes of operation, are presented. The results of calculations of reliability indicators are presented, such as the probable relative number of hours of interruption of power supply and the undersupply of electrical energy. A comparison of options have shown that the probable relative under-supply of the electric power of a double-circuit overhead transmission line with an additional operating mode — with a split back-up phase, is lower by approximately 13% than that of a conventional double-circuit power line, which will positively affect the maneuverability and reliability of the entire system.

KEYWORDS: transmission power line, line capacity, wave impedance, functional redundancy, split back-up phase

Развитие электрических сетей является одним из важнейших показателей уровня электроэнергетики страны. В России более 50% оборудования электрических сетей выработало расчетный ресурс, хотя еще сохраняет достаточную работоспособность. В то же время ухудшение технического состояния электрических сетей приводит к росту числа отказов воздушных линий (ВЛ) электропередач и силового оборудования подстанций. В связи с данным обстоятельством в настоящее время остро встает задача реконструкции и/или модернизации электрических сетей, что требует, прежде всего, огромных капитальных вложений. С данной точки зрения задача выбора оптимального технического решения для ВЛ с необходимой степенью надежности при увеличении пропускной способности является наиболее актуальной.

Известно, что основные способы повышения натуральной мощности линии достигаются за счет увеличения номинального напряжения сети; уменьшения волнового сопротивления линии, которое достигается за счет расщепления фазных проводов [1] и за счет конструктивного изменения ВЛ путем компактизации геометрических параметров; применения устройств продольной компенсации и управляемых источников реактивной мощности на промежуточных подстанциях [2–5].

Необходимо отметить большой прогресс управляемых линий электропередачи переменного тока, известных за рубежом как FACTS, а также шестифазных линий электропередачи, повышающих натуральную

мощность линии на 50–70% [6, 7], недостатком которых является пониженная надежность по сравнению с двухцепными.

Разработанная и предложенная авторами схема резервирования трехфазной рабочей цепи резервной фазой, которая в нормальном режиме работы линии электропередачи присоединяется параллельно к одной из рабочих фаз ВЛ, а в аварийном режиме переключается автоматически взамен поврежденной фазы. Например, при эксплуатации линии электропередачи Куйбышев – Москва, расщепленной на три провода фазы, волновое сопротивление снизилось в 1,5 раза, а натуральная мощность возросла в 1,44 раза. При этом очевидным недостатком резервирования рабочей цепи ВЛ четвертой фазой явились наличие несимметрии и недоиспользование суммарного сечения электропередачи.

На основе выполненного анализа была определена цель исследования — оценка показателей надежности двухцепной ВЛ с дополнительным режимом работы (с расщепленной резервной фазой).

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

- проведение анализа работы воздушной линии электропередачи в режиме с «расщепленной резервной фазой»;
- определение основных параметров линии;
- оценка показателей надежности работы двухцепной воздушной линии электропередачи с дополнительным режимом с «расщепленной резервной фазой» («РПФ»).

При увеличении числа проводов в фазе во многих случаях препятствием является невозможность уменьшения междупазных расстояний [8]. 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 ВЛ представляет собой несложную техническую задачу, так как потребуется только установка дополнительных выключателей нагрузки на открытых распределительных устройствах при увеличении лишь ширины коридора порталных соединений. При этом исполнение опор линий электропередачи не предполагает их конструктивного изменения.

Разработанное схемно-техническое решение (рисунок) повышает эффективность электропередачи двухцепных ВЛ уменьшением волнового сопротивления линии при определенном режиме работы, указанном в схеме [9, 10].

Функциональное резервирование линии электропередачи в соответствии со схемно-техническим решением 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 «расщеплению фазы» на три составляющие, таким образом создается «резервная цепь — фаза» («РРФ»), 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 «РРФ» объединяются коммутирующими выключателями и автоматически присоединяются к рабочей цепи взамен

поврежденной фазы. Необходимо пояснить, что в качестве «РРФ» может выступать как первая, так и вторая из рабочих цепей двухцепной ВЛ. В аварийном режиме ВЛ с «РРФ» при обрыве одной из фаз любой из рабочей цепи «вторая» цепь объединяется в «РРФ» взамен поврежденной фазы «первой» цепи.

В качестве примера сравнение пропускной способности трехпроводной (отказ одной любой цепи двухцепной ВЛ) и двухцепной ВЛ в режиме с «РРФ» в классе напряжения 220 кВ при длине линии 200 км и марки провода АС-300/39 показало, 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 (таблица 1).

При сравнительной оценке показателей надежности ВЛ с «РРФ» за условную единицу принята надежность, обеспечиваемая в результате питания по одноцепной линии с трехфазным управлением.

Сопоставлялись следующие варианты:

- одноцепная ВЛ с трехфазным управлением;
- двухцепная ВЛ в одноцепном режиме (при отказе одной любой цепи);
- двухцепная ВЛ в режиме с «РРФ».

Таблица 1. Сравнение параметров ВЛ 220 кВ
Table 1. Comparison of parameters of overhead transmission lines 220 kV

Тип ВЛ Type of line	Напряжение, кВ Voltage, kV	Волновое сопротивление, Ом Wave resistance, Ohm	Пропускная способность, МВт Throughput capacity, MW
Двухцепная ВЛ в авар. режиме Double-circuit line in an emergency	220	407,7	118,7
Двухцепная ВЛ в режиме с «РРФ» Double-circuit line with «SBP»	220	268,7	180,1

Рисунок. Устройство резервирования линии электропередачи: а — двухцепная ВЛ в нормальном режиме работы; б — двухцепная ВЛ в режиме 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
Figure. Device redundancy transmission lines а — double circuit overhead line in the normal operation mode; б — double-circuit overhead line with а «SBP». 1 — bearing; 2–7 — traverse; 8–13 — garland hanging insulators; 14–16 — phase wire working circuit; 17–19 — «standby phase» split into three parts; 20–41 — load break switches

Учитывалось, что двухцепная ВЛ — на одной опоре. Надежность оценивалась следующими показателями:
1) Вероятным относительным числом часов перерывов электроснабжения (K_t) от плановых (t_{np}) и аварийных (t_{ap}) ремонтов на 100 км линии в год:

$$K_t = \frac{t_{np} + t_{ap}}{t_{np.одн} + t_{ap.одн}}$$

2) Вероятным относительным недоотпуском электроэнергии (K_p) при плановых и аварийных ремонтах на 100 км линии в год:

$$K_p = \frac{t_{np} \cdot P_{np} + t_{ap} \cdot P_{ap}}{t_{np.одн} \cdot P_{np.одн} + t_{ap.одн} \cdot P_{ap.одн}},$$

где P_{np} , P_{ap} , $P_{np.одн}$, $P_{ap.одн}$ — мощности, передаваемые рассматриваемой линией, и мощности, передаваемые одноцепной ВЛ при плановых и аварийных ремонтах соответственно.

При расчете показателей надежности статистические данные повреждений ВЛ 110 кВ, 220 кВ приведены в таблице 2 [11]. При этом учитывалось, что плановый ремонт не производится в период максимальной нагрузки, поэтому принято $t_{np} = 0,7 \cdot P_{max}$. Аварийное отключение, как правило, происходит в максимум нагрузки.

На основе анализа нормативов по проведению ремонтных работ принято, что для рассматриваемой электропередачи, кроме одноцепной ВЛ с трехфазным управлением, отключение напряжения необходимо в 20% от годового объема работ ($T_0 = 0,2 \cdot T_{np}$).

Время ремонта для двухцепной линии с примени-

Таблица 2. Параметры потока отказов и время восстановления ВЛ при неисправности оборудования

Table 2. Failure flow parameters and recovery time of overhead power lines due to equipment failure

Показатели надежности Reliability indicator	Исполнение ВЛ 110 кВ Execution of the lines 110		Напряжение, кВ Voltage, kV	
			220	
Число отказов в год The number of failure per year	Одноцепные Single-circuit		1,7	3,9
	Двухцепные	Одной цепи One circuit	3,9	2,0
		Двух цепей Two circuits	0,4	0,9
Время восстановления, час/год Recovery time, h/y	Одноцепные Single-circuit		13,1	14,0
	Двухцепные Double circuit	Одной цепи One circuit	8,7	10,5
		Двух цепей Two circuits	13,1	16,6

ем схемно-технического решения принималось как для двухцепной.

Расчет показателей надежности приведен в таблице 3.

Выводы

1. Предложено усовершенствование схемы транспорта мощности на двухцепных ВЛ посредством функционального резервирования линии электропередачи с возможностью переключения на новый (дополни-

Таблица 3. Результаты расчета показателей надежности ВЛ

Table 3. Results of calculation of reliability indicators of overhead power lines

Показатели Indicator		Одноцепная ВЛ, кВ Single-circuit line, kV		Двухцепная ВЛ, кВ Double-circuit line, kV		Двухцепная ВЛ в режиме с РПФ, кВ Double-circuit line with «SBP»	
		110	220	110	220	110	220
Максимальная передаваемая мощность, МВт Maximum transmitted power, MW	В норм. режиме In normal mode	1	1	2	2	2	2
	В авар. режиме In emergency mode	0	0	1	1	1,35	1,35
Дефицит мощности в авар., ремонтном режиме, МВт Capacity shortage, MW		1	1	1	1	0,65	0,65
Время пребывания в ремонте, час/год Time of stay in the repair, h/y	Плановом Planned repair	44,0	61,5	8,8	12,3	8,8	12,3
	Аварийном Emergency repair	13,1	14,0	8,7	10,5	8,7	10,5
	Всего Summary	57,1	75,5	17,5	22,8	17,5	22,8
Недоотпуск энергии в долях от P_{max} Undersupply of energy	Плановом Planned repair	30,8	43,0	6,2	8,6	6,2	8,6
	Аварийном Emergency repair	9,1	9,8	8,7	10,5	8,7	10,5
	Всего Summary	39,9	52,8	14,9	19,1	14,9	19,1
K_t	%	100	100	32	35	32	35
K_p	%	100	100	37	36	24	23

тельный) режим работы в период выявления места и причины отказа.

2. Расчет и сравнительный анализ показал увеличение пропускной способности ВЛ с «РРФ» на 35% по сравнению с двухцепной ВЛ в аварийном режиме, что является существенным увеличением и доказывает вероятность применения данного режима, как дополнительного при отсутствии возможности или экономической целесообразности нецелесообразно переоснащения существующей ВЛ.

3. Расчетным путем выявлено, что вероятный относительный недоотпуск электрической энергии в двухцепной ВЛ с дополнительным режимом работы (с «РРФ») ниже на 13% по сравнению с традиционной двухцепной ВЛ, что положительно скажется на маневренности работы всей системы.

Список использованных источников

1. Барбашов И. В., Виноградов А. А., Федотова Е. К. Электрические сети электроэнергетических систем. Белгород. Изд-во Белгородского ГТУ 2016.
2. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. Москва: Альянс 2009.
3. Копейкина Т. В. Технические аспекты применения компактных управляемых воздушных линий электропередачи. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований 2015; 12(4): 581–584.
4. Зарудский Г. К., Самалюк Ю. С. О режимных особенностях компактных воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ. Электричество 2013; (5): 8–13.
5. Карева С. Н. Применение в ЕНЭС компактных управляемых воздушных линий электропередачи. Энергия единой сети 2013; 4(9): 60–68.
6. Степанов В. М., Карницкий В. Ю. Компактные линии электропередачи. Тула: Известия Тульского государственного университета 2010; (3–5): 49–51.
7. Horowitz S. H., Phadke A. G., Renz B. A. The Future of Power Transmission. IEEE Power and Energy Magazine 2010; 8(2): 34–40.
8. Во Х. К., Косточкин А. А. Преимущества использования линий электропередачи с резервной фазой. Томск: ВН-ТК Энергетика: эффективность, надежность, безопасность 2013; (1) 385–388.
9. Нестеров А. С., Лебедев М. П., Кобылин В. П., Васильев П. Ф.,

Давыдов Г. И., Хоютанов А. М. Повышение эффективности эксплуатации воздушных линий электропередачи с резервной фазой. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика» 2016; 4: 45–48.

10. Нестеров А. С., Лебедев М. П., Кобылин В. П., Васильев П. Ф. Устройство резервирования линии электропередачи. Патент № 2014151341/07 (РФ). Бюллетень изобретений 2016.

11. Файбисович Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во НЦ ЭНАС 2009.

References

1. Barbashov I. V., Vinogradov A. A., Fedotova E. K. Electrical networks of electrical power systems. Belgorod: Izd-vo Belgorodskogo GTU 2016. (In Russ.)
2. Idel'chik V. I. Electric systems and networks. Moskva: Al'yans 2009. (In Russ.)
3. Kopeikina T. V. Technical aspects of application of the compact operated electricity transmission air-lines. International journal of applied and fundamental research 2015; 12(4): 581–584. (In Russ.)
4. Zarudskii G. K., Samalyuk Y. S. About regime features of compact air-lines of an electricity transmission of 220 kV. Electricity 2013; (5): 8–13. (In Russ.)
5. Kareva S. N. Application in ENES of the compact operated electricity transmission air-lines. Energiya edinoini seti 2013; 4(9): 60–68. (In Russ.)
6. Stepanov V. M., Karniczkiy V. Yu. Compact power lines. Tula: Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta 2010; (3–5): 49–51.
7. Horowitz S. H., Phadke A. G., Renz B. A. The Future of Power Transmission. IEEE Power and Energy Magazine 2010; 8(2): 34–40. (In Eng.)
8. Vo X. K., Kostochkin A. A. The advantages of using power lines with a backup phase. Tomsk: VN-TK Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost' 2013; (1): 385–388.
9. Nesterov A. S., Lebedev M. P., Kobylina V. P., Vasil'ev P. F., Davydov G. I., Khoyutanov A. M. Increase in efficiency of operation of air-lines of an electricity transmission with a reserve phase. South Ural State University bulletin. Series «Power engineering» 2016; (4): 45–48. (In Russ.)
10. Nesterov A. S., Lebedev M. P., Kobylina V. P., Vasil'ev P. F. Device of reservation of a power line The patent 2014151341/07 Russian Federation. Bulletin of inventions 2016. (In Russ.)
11. Faibisovich D. L. Reference book on design of electrical networks. 3-e izd., pererab. i dop. Moskva: Izd-vo NTs ENAS 2009. (In Russ.)