УДК 621.315.1

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО РАЗОМКНУТЫМ ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ С ПРОДОЛЬНОЙ САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ**¹Шишков Е.М., ²Проничев А.В., ²Солдусова Е.О.**¹*Филиал ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Новокуйбышевск, e-mail: e.m.shishkov@ieee.org;*²*ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Самара, e-mail: esoldusova@inbox.ru*

Для целей организации продольной компенсации на сверхдальних воздушных линиях электропередачи в предыдущих работах авторов предложен способ использования собственной распределённой ёмкости – построение разомкнутой линии электропередачи с расщеплённой фазой, составляющие которой электрически изолированы друг от друга таким образом, что часть составляющих подключена только к шинам источника питания, а часть – только к шинам потребителя. В настоящей работе произведена оценка предела передаваемой мощности разомкнутых воздушных линий при различных значениях нагрузки. Для анализа эффективности применения разомкнутых линий электропередачи использовались методы математического моделирования в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотеки элементов SimScape SimPowerSystems. Исходными данными для анализа являлись геометрические конфигурации опор воздушных линий и параметры сталеалюминиевых проводов. Составлена математическая модель для анализа режимов нагрузки и холостого хода разомкнутой линии. Проведен расчёт некоторых аварийных режимов работы разомкнутой линии. С использованием данной модели проведена оценка некоторых видов замыканий. Результаты первичного анализа аварийных режимов РВЛ позволяют утверждать о возможности использования традиционных принципов организации защит линий. В режимах с шунтированием внутрифазной ёмкости не происходит нарушения устойчивости работы линии, однако для обнаружения внутрифазных повреждений необходимо предусматривать нетокковые виды релейных защит: дистанционные, высокочастотные.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, продольная компенсация, самокомпенсированная линия**POWER TRANSMISSION BY OPEN OVERHEAD LINES
WITH SERIES SELF-COMPENSATION****¹Shishkov E.M., ²Pronichev A.V., ²Soldusova E.O.**¹*Branch of Samara State Technical University, Novokuybyshevsk, e-mail: e.m.shishkov@ieee.org;*²*Samara State Technical University, Samara, e-mail: esoldusova@inbox.ru*

For the purpose of organizing series compensation for long-distance overhead power transmission lines, the authors proposed in previous works the method of using their own distributed capacitance – the construction of an open power line with a split phase, the components of which are electrically isolated from each other in such a way that one part of the components is connected only to the power supply buses, and other part only to the consumer's buses. In this paper, the limit of the transmission capacity of open overhead lines at different load values is estimated. To analyze the efficiency of using open overhead transmission lines, mathematical modeling methods were used in the MATLAB / Simulink with using the SimScape SimPowerSystems element library. The initial data for the analysis were geometric configurations of overhead line supports and parameters of steel-aluminum wires. A mathematical model is developed for the analysis of load and off-load conditions of the open line. Calculation of some emergency operation modes of the open overhead line. Using this model, the following types of closures were evaluated. The results of the primary analysis of the emergency regimes of the open overhead line make it possible to assert the possibility of using the traditional principles of organization of line protections. In modes with shunting of the in-phase capacitance, there is no disruption in line stability, however, in order to detect intra-phase damage, it is necessary to provide non-current types of relay protection: remote, high-frequency.

Keywords: overhead transmission line, series compensation, self-compensated line

Устройства продольной компенсации традиционно используются на дальних линиях электропередачи для снижения их величины продольного индуктивного сопротивления [1]. В работах И.И. Соловьёва и А.А. Вульфа [2] выдвинута идея использования для этих целей настройки линии электропередачи на нулевое сопротивление путём достижения резонанса напряжений или резонанса токов. В работе профессором Н.Ф. Ракушевым [3] эта идея воплощена при помощи оригинальной двухпроводной схемы однофазной разомкнутой линии, в которой электрическая мощность переда-

ётся через ёмкостное сопротивление между двумя электрически изолированными друг от друга проводами, каждый из которых электрически соединён только с одним из узлов, между которыми происходит передача энергии.

Трёхфазная реализация схемы разомкнутой линии предложена авторами в работе [4]. Эта схема предполагает использование в качестве фазных проводников составляющих расщеплённой фазы, в результате чего разомкнутая линия может быть переоборудована из традиционной трёхфазной высоковольтной линии электропередачи.

Рис. 1. Математическая модель в среде MATLAB/Simulink для расчета некоторых аварийных режимов работы трехфазной разомкнутой ВЛ

Таблица 1

Сведения об анализируемых линиях

Класс напряжения, кВ	Конфигурация пролёта		
	Тип промежуточных опор	Высота подвеса фазы, м	Марка провода в фазе
500	Промежуточные опоры на оттяжках ПБ1	27,2	АС-700/86
750	Промежуточные опоры на оттяжках ПП750-1	35	АС-500/64

С использованием разработанной [5] математической модели, а также описанных в работе [6] методик расчёта установившегося режима разомкнутой линии авторами выполнен анализ эффективности использования внутрифазной ёмкости разомкнутой линии для регулирования напряжения в прилегающей к её концевым узлам электрической сети. При этом непосредственным управляющим воздействием является шунтирование или дешунтирование внутрифазной ёмкости разомкнутой линии путём коммутации выключателей на её концах.

Оценка выполнена на примере воздушной линии 500 кВ Ростовская АЭС – Шахты. Для определения конфигурации расщеплённой фазы использованы результаты работы [7].

Цель исследования: расчет и анализ режимов нагрузки предложенной в [4] конструкции трехфазной разомкнутой ВЛ, а также анализ эффективности применения предложенной в [4] конструкции трехфазной разомкнутой ВЛ как средства регулирования напряжения.

Материалы и методы исследования

Для анализа эффективности применения разомкнутых линий электропередачи используются методы математического моделирования в среде MATLAB/Simulink с использованием библиотеки элементов SimScape SimPowerSystems. Выполнен анализ режимов работы линий двух классов напряжения (500 и 750 кВ) и трех вариантов конструкций расщепленной фазы. Сведения об анализируемых линиях представлены в табл. 1.

С учётом полученных ранее результатов анализа установившихся режимов РВЛ [7–9] в настоящей работе проведен расчёт некоторых аварийных режимов работы разомкнутой линии. Для этого модель общего участка линии представлена в виде четырёх последовательно соединённых блоков многопроводной схемы замещения, каждый из которых моделирует участок равной длины (рис. 1).

С использованием данной модели проведена оценка следующих видов замыканий:

- внутрифазное КЗ (замыкание между прямой и обратной составляющей);
- внутрифазное КЗ с участием земли;
- замыкание прямой или обратной составляющей на землю.

Для анализа эффективности применения разомкнутых линий электропередачи в решении задачи

регулирования напряжения используются методы математического моделирования в среде RastWin3. Выполнен анализ режимов работы сети 500 кВ на примере объединённой энергосистемы Юга (рис. 2).

Регулирование напряжения в сети производилось путём шунтирования продольной ёмкости разомкнутой линии, описанной в [3] с целью снижения напряжения в узлах линии и дешунтирования – для увеличения напряжения. В работе представлены результаты анализа напряжения в узлах сети при использовании описанного способа регулирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Режим внутрифазного КЗ – аварийный режим, характерный только для линии с продольной компенсацией. Опасность данного режима заключается в шунтировании внутрифазной ёмкости, которое может привести к нарушению устойчивости работы линий.

Однако результаты моделирования кратковременно возникающего внутрифазного КЗ позволяют говорить лишь о незначительных изменениях напряжения в повреждённой фазе.

При этом ток в месте установки защиты изменяется незначительно, что вынуждает использовать дистанционные либо высокочастотные защиты для обнаружения данного вида замыканий (рис. 3).

Как и следовало ожидать, в режиме внутрифазного замыкания с участием земли наблюдается значительная несимметрия напряжений. Характер изменения тока в месте установки защит позволяет использовать для защиты от замыканий на землю те же виды защит, что и для традиционных линий (рис. 4).

На рис. 5 представлены результаты расчета режима сети с шунтированной продольной ёмкостью ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – Шахты. Узел «Ростовская АЭС» является базисным, напряжение на нем постоянное и составляет 525 кВ.

Далее было произведено включение продольной ёмкости и рассчитан соответствующий этому режим. Результаты расчета режима представлены на рис. 6.

По результатам расчета режима были определены значения напряжения во всех узлах сети до и после включения шунти-

руемой продольной ёмкости на ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – Шахты, величины угла между фазами напряжения δ (табл. 2).

Расчеты показывают, что наибольшее увеличение напряжения наблюдается

в узлах, непосредственно связанных с разомкнутой линией, и составляет порядка 27 кВ. Однако небольшое увеличение напряжения наблюдается практически во всех узлах сети.

Рис. 2. ОЭС Юга

Рис. 3. Внутрифазное КЗ – замыкание между прямой и встречной составляющей расщепленной фазы

Рис. 4. Однофазное короткое замыкание

Рис. 5. Результаты расчета режима до включения продольной емкости

Рис. 6. Результаты расчета режима после включения продольной емкости

Таблица 2

Результаты расчета напряжений в узлах сети 500 кВ

Узел	Напряжение, кВ		$\delta, ^\circ$	
	До компенсации	После компенсации	До компенсации	После компенсации
Ростовская АЭС	525	—	—	—
Шахты	496,24	522,92	–1,55	0,61
Тихорецк	516,72	517	0,42	0,83
Центральная	502,94	503,09	0,4	0,9
Кубанская	498,94	499,09	–4,35	–3,84
Ставропольская ГРЭС	503,32	503,46	8,51	8,98
Невинномысск	514,07	514,05	7,22	7,54
Буденновск	524,5	524,46	0,9	1,08

Выводы

В работе построена математическая модель трехфазной разомкнутой ВЛ для расчёта некоторых аварийных режимов работы разомкнутой линии. С использованием данной модели проведена оценка следующих видов замыканий:

- внутрифазное КЗ (замыкание между прямой и обратной составляющей);
- внутрифазное КЗ с участием земли;
- замыкание прямой или обратной составляющей на землю.

Результаты первичного анализа аварийных режимов РВЛ позволяют утверждать о возможности использования традиционных принципов организации защит линий. В режимах с шунтированием внутрифазной ёмкости не происходит нарушения устойчивости работы линии, однако для обнаружения внутрифазных повреждений необходимо предусматривать нетоковые виды релейных защит: дистанционные, высокочастотные.

Также в работе проведен расчет режимов сети 500 кВ объединенной энергосистемы Юга. Рассмотрен эффект применения разомкнутых линий с шунтированной продольной ёмкостью на примере ВЛ 500 кВ Ростовская АЭС – Шахты. Определены значения напряжений в узлах сети до и после включения продольной ёмкости и построены соответствующие векторные диаграммы. Полученные в данной работе результаты позволяют говорить о разомкнутых линиях электропередачи с шунтируемой продольной ёмкостью как об эффективном способе регулирования напряжения.

Список литературы

1. Готман В.И., Глазачев А.В., Бацева Н.В. Продольная компенсация дальних электропередач с промежуточными системами // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4. С. 68–75.
2. Вульф А.А. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям. М.: Госэнергоиздат, 1945. 83 с.
3. Ракушев Н.Ф. Сверхдальняя передача энергии переменным током по разомкнутым линиям. М.: Госэнергоиздат, 1957. 160 с.
4. Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. Разомкнутая трёхфазная воздушная линия электропередачи переменного тока // Пат. 130458 РФ, МПК8 Н 02 J 3/20 / ФГБОУ «Самарский государственный технический университет». № 2013103649/07; заявл. 28.01.2013; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.
5. Шишков Е.М., Гольдштейн В.Г., Кривихин И.Н. Математическая модель самокомпенсированной воздушной линии электропередачи // Сборник докладов VI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Иваново, 2015. С. 620–623.
6. Shishkov E., Goldstein V., Krivihin I. Open Overhead Transmission Lines. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 792. P. 293–299.
7. Фролов А.Л., Гольдштейн В.Г., Мадениятов А.Б. Анализ пропускной способности разомкнутых самокомпенсирующихся ЛЭП, использующих стандартные конструкции проводов и опор // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции (2–6 октября 2017, Самара). В 3 т. Т. 1. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. С. 144–145.
8. Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Фролов А.Л. Развитие теории анализа установившихся режимов многопроводных несимметричных воздушных ЛЭП // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции (2–6 октября 2017, Самара). В 3 т. Т. 1. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. С. 144–145.
9. Фролов А.Л., Гольдштейн В.Г. Физические процессы в самокомпенсирующихся линиях электропередачи, использующих стандартные конструкции проводов и опор // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VII Международной молодежной научно-технической конференции. Казань, 2016. Т. 1. С. 231–233.