
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311.1

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_4

**АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ 110 кВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАЛОГАБАРИТНЫХ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ
КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП****А.А. Лоскутов**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

А.Б. ЛоскутовНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

Ю.С. ШальновНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижегород, Россия

e-mail: shalnov_yura@mail.ru

Рассмотрены распределенные средства продольной компенсации, устанавливаемые по всей длине воздушных линий (ВЛ) электропередачи, а именно: малогабаритные устройства продольной компенсации (МУПК). Выявлены основные преимущества использования МУПК, монтируемых на проводах ВЛ. С помощью программного комплекса *PSCAD* рассмотрено применение МУПК в электрической сети 110 кВ. Получены результаты по увеличению пропускной способности ВЛ и улучшению статической устойчивости узла нагрузки электрической сети путем повышения напряжения на конце электропередачи.

Ключевые слова: имитационное моделирование, малогабаритные устройства продольной компенсации, повышение пропускной способности, устойчивость электрической сети, FACTS, PSCAD.

Для цитирования: Лоскутов, А.А. Анализ устойчивости энергетической системы 110 кВ с использованием малогабаритных устройств продольной компенсации для воздушных ЛЭП / А.А. Лоскутов, А.Б. Лоскутов, Ю.С. Шальнов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 4-22. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_4

ANALYSIS OF POWER SYSTEM 110 kV STABILITY USING SMALL LONGITUDINAL COMPENSATION DEVICES FOR OVERHEAD LINE

A.A. Loskutov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

A.B. Loskutov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

Yu.S. Shalnov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

e-mail: shalnov_yura@mail.ru

Abstract. The article discusses the distributed means of longitudinal compensation installed along the entire length of the transmission line, namely, small-sized longitudinal compensation devices (SLCD). The main advantages of using SLCDs mounted on overhead lines are revealed. The application of the compensation devices in the 110 kV electrical network is considered using the PSCAD. Results were obtained to increase the transmission capacity of overhead lines and improve the static stability of the load node of the electrical network by increasing the voltage at the end of the transmission line.

Keywords: electrical grid stability, increasing transmission line capacity, FACTS, PSCAD, simulation, small-sized longitudinal compensation devices.

For citation: A.A. Loskutov, A.B. Loskutov and Yu.S. Shalnov, “Analysis of power system 110 kV stability using small longitudinal compensation devices for overhead line”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-22, 2021.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_4

I. Введение

В России возрастают требования к максимальному использованию пропускной способности электрических сетей с целью повышения эффективности работы уже существующих линий электропередач, что может обеспечиваться с помощью управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока (*FACTS*). Передача энергии ведется по проводам, следовательно, максимальная передаваемая мощность будет зависеть от пара-

метров линии. Строительство дополнительных высоковольтных линий может быть сопряжено с высокими затратами, соответственно, необходимо увеличивать пропускную способность уже имеющихся линий, уделяя также внимание повышению устойчивости электрических систем. Целесообразно внедрять в электрические системы и сети установки по компенсации реактивной мощности и компенсации индуктивного сопротивления, что является очевидным уже на этапе технико-экономической разработки плана развития сетевого района.

В России устройства *FACTS* пока не получили широкого распространения. Это связано с длительным сроком сооружения, высокой стоимостью и необходимостью отведения значительных площадей для размещения. Распределенные малогабаритные устройства продольной компенсации (МУПК) [1-5, 8, 10, 11] могут быть альтернативным устройствам *FACTS* вариантом. Данный класс устройств за счет управляемого воздействия на реактивную составляющую сопротивления воздушной линии (ВЛ) может осуществлять изменение их пропускной способности, обеспечивая оптимальное перераспределение потоков мощности между перегруженными и недогруженными линиями.

Способность МУПК влиять на перераспределение потоков мощности в линиях электропередачи, а также возможность изменения параметров и режимов работы данных устройств в темпе процесса (в режиме реального времени) позволяют рассматривать их в качестве эффективного технического инструмента как для существующих, так и для перспективных интеллектуальных электрических сетей.

II. Требования к устойчивости энергосистем

Для рассмотрения результатов применения устройств продольной компенсации (УПК) нужно обратить внимание на параметры устойчивости и коэффициентов, с помощью которых возможно определять степень статической устойчивости рассматриваемых участков сети. Статическую устойчивость можно определить как способность системы восстанавливать после малого возмущения исходный режим работы, или близкий к исходному, если возмущающее воздействие не снято.

При анализе статической устойчивости энергосистемы 110/10 кВ используются следующие оценочные показатели устойчивости [6]:

- 1) минимальный коэффициент запаса статической аperiodической устойчивости по активной мощности в контролируемых сечениях (K_P);
- 2) минимальный коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки (K_U).

В данной работе рассмотрено влияние УПК на коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки. Значения коэффициента запаса статической устойчивости в различных режимах работы в соответствии с [6] указаны в табл. 1.

Таблица 1.
Значения коэффициентов устойчивости

Table 1.
Stability coefficients

№	Электроэнергетический режим ЭС	K_U , min
1	Нормальный	0,15
2	Послеаварийный	0,10
3	Вынужденный	0,10

Коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки (K_U) определяется:

$$K_U = \frac{U - U_{кр}}{U_{кр}}, \quad (1)$$

где U – напряжение в узле нагрузки в рассматриваемом режиме, кВ;
 $U_{кр}$ – критическое напряжение в узле нагрузки, кВ.

Критическое напряжение в узлах нагрузки соответствует границе статической устойчивости электродвигательной нагрузки и определяется на основании фактических данных, предоставленных потребителем электрической энергии. При отсутствии данных критическое напряжение следует принимать равным [6]:

$$U_{кр} = 0,7 \cdot U_{ном}, \quad (2)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение электрической сети, кВ.

Исходя из ГОСТ 32144-2013 о нормах качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [7], предназначенного для регулирования напряжения в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц, положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Таким образом, для сети 110 кВ минимальное и максимальное значения напряжений соответствуют:

$$U_{\min} = U_{ном} \cdot 0,9 = 110 \cdot 0,9 = 99 \text{ кВ}, \quad (3)$$

$$U_{\max} = U_{ном} \cdot 1,1 = 110 \cdot 1,1 = 121 \text{ кВ}. \quad (4)$$

В сети 110 кВ $U_{кр}$ равно:

$$U_{кр} = 0,7 \cdot 110 = 77 \text{ кВ} . \quad (5)$$

Поскольку минимальное значение K_u в нормальном режиме равно 0,15, напряжение в сети 110 кВ, при котором достигается данная величина, вычисляется из формулы (1):

$$U = K_U \cdot U_{кр} + U_{кр} = 0,15 \cdot 77 + 77 = 88,55 \text{ кВ} .$$

Получив критическое напряжение по статической устойчивости узла нагрузки, следует рассчитать K_u для допустимого минимального, максимального и для номинального напряжений, определяемый выше по нормам качества электроэнергии:

$$K_{U_{\min}} = \frac{99 - 77}{77} = 0,286 , \quad (6)$$

$$K_{U_{\max}} = \frac{121 - 77}{77} = 0,571 , \quad (7)$$

$$K_{U_{\text{ном}}} = \frac{110 - 77}{77} = 0,429 . \quad (8)$$

Таким образом, имеется диапазон изменения K_U , относительно которого будут сравниваться полученные значения в рассматриваемых режимах работы УПК.

III. Малогабаритные устройства продольной компенсации

МУПК основано на технологии *Smart Wire* (умный провод) [8] и обеспечивают управляемое воздействие на реактивную составляющую сопротивления ЛЭП.

Основными эффектами от применения МУПК являются:

- 1) перераспределение мощности между отдельными параллельно работающими линиями или сечениями;
- 2) повышение пропускной способности;
- 3) повышение устойчивости и надежности работы;
- 4) уменьшение потерь энергии.

Массогабаритные характеристики МУПК позволяют размещать их на линиях электрических передач. При этом управляемые элементы распределяются вдоль всего маршрута размещения. Таким образом, появляется возможность различной компоновки устройств компенсации реактивной мощности по всему рассматриваемому участку электрической сети.

Размещение МУПК на проводах позволяет не использовать высоковольтную изоляцию ввиду значительного удаления от поверхности земли, что влияет на стоимость устройств. Одним из главных преимуществ является конструктивное исполнение, позволяющее без разрыва проводов монтировать устройства на воздушные линии, а значит, возможно применение не только на новых ЛЭП, но и на работающих участках электрических сетей. Также важным пунктом является высокая мобильность устройств и их демонтаж [8].

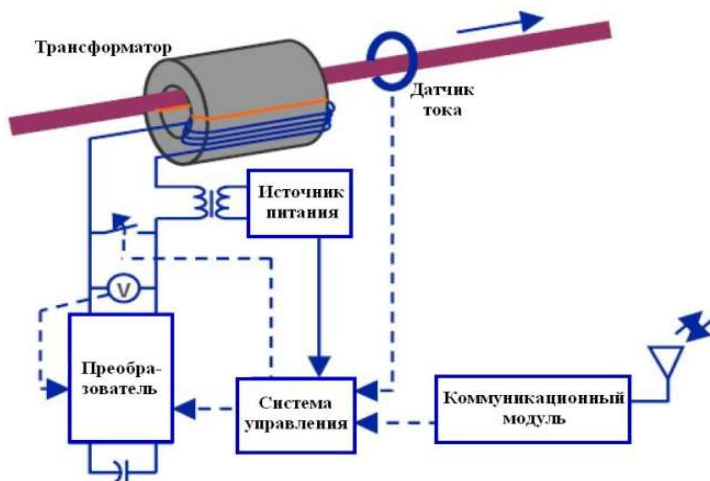


Рис. 1. Обобщенная структура МУПК

Fig. 1. Generalized structure of the small-sized longitudinal compensation devices

Подключение емкости к вторичной обмотке приводит к образованию колебательного контура, вторым элементом которого является индуктивность намагничивания силового трансформатора. В зависимости от соотношения емкости, приведенной к первичной обмотке, и индуктивности намагничивания трансформатора, могут наблюдаться два разных влияния на выходное реактивное сопротивление контура.

IV. Моделирование применения УПК в сети 110 кВ

Для рассмотрения эффектов от применения МУПК в программном комплексе *PSCAD* произведено моделирование эквивалентного по принципу влияния на электрические параметры системы устройства продольной компенсации (УПК). Модель электрической сети с УПК представлена на рис. 2.

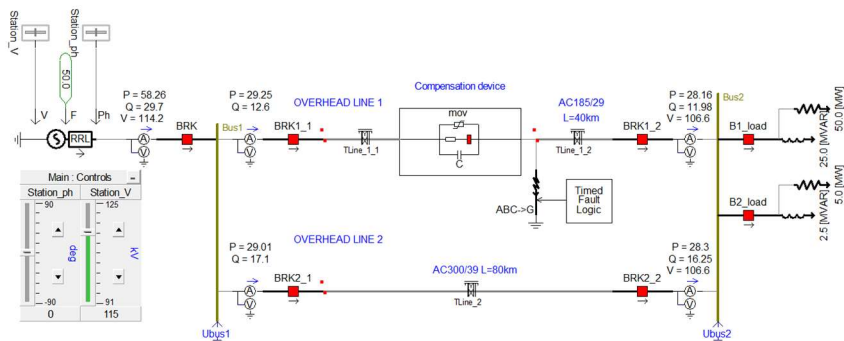


Рис. 2. Электрическая сеть с УПК

Fig. 2. Electric network with longitudinal compensation device

Параметры элементов имитационной модели представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Параметры элементов имитационной модели

Table 2.

Parameters of elements of the simulation model

Параметр	Ед. изм.	Значение	
<i>Источник</i>			
Базовое напряжение	кВ	115	
Импеданс	Ом	2,66 ∠88°	
<i>Нагрузка</i>			
		<i>P</i>	<i>Q</i>
Нагрузка-1 (B1 load)	МВт, Мвар	50	25
Нагрузка-2 (B2 load)	МВт, Мвар	5	2,5
Нагрузка-3 (B3 load)	МВт, Мвар	5	2,5
<i>Воздушные линии электропередачи</i>			
		ВЛ-1	ВЛ-2
Марка и сечение провода	-	185/29	300/39
Удельное активное сопротивление	Ом/км	0,1591	0,0958
Среднегеометрическое расстояние между фазами	м	13,572	13,572
Диаметр провода	мм	18,8	21,6
Удельное реактивное сопротивление	Ом/км	0,472	0,464
Удельная емкостная проводимость	мкСм/км	2,399	2,446
Длина ЛЭП	км	80	80

Продолжение табл. 2.
Table 2 (continued).

Полное активное сопротивление линии	Ом	12,728	7,664
Полное индуктивное сопротивление ВЛ	Ом	37,780	37,083
Полная емкостная проводимость линии	мкСм	191,928	195,662

При имитационном моделировании в *PSCAD* рассмотрен метод защиты УПК с помощью варистора и токоограничивающей ветви (рис. 3). Проверка работы будет осуществлена с помощью моделирования короткого замыкания на линии, где установлено устройство компенсации.

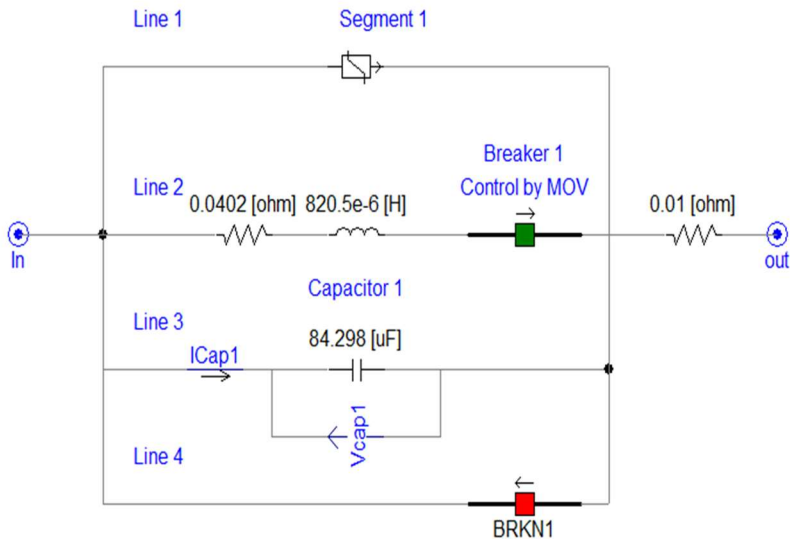


Рис. 3. Модель УПК

Fig. 3. Model of the longitudinal compensation device

Модель УПК состоит из четырех ветвей, включающих в себя варистор, конденсатор, токоограничивающую ветвь и ветвь для режима отключения УПК из работы [4]. Главным элементом является конденсатор. Его емкость подбирается в зависимости от сопротивления линии и нужной компенсации. Данные представлены в табл. 3.

Таблица 3.
 Параметры УПК при различном проценте
 изменения индуктивного сопротивления ВЛ

Table 3.
 Parameters of the longitudinal compensation device with a different percentage
 of change in the inductive resistance of the overhead line

$k_{\text{сопр}}, \%$	Вводимое X_c , Ом	C , мкФ
0	0	0
20	7,552	421,491
40	15,104	210,745
60	22,656	140,497
80	30,208	105,373
100	37,76	84,298

V. Методика расчета емкости УПК

Для моделирования УПК на воздушных линиях нужно рассчитать емкость конденсаторной батареи, которая приводит к изменению индуктивной составляющей сопротивления воздушной линии. Сопротивление ВЛ состоит из активной и индуктивной составляющих. В табл. 2 рассчитаны параметры для ВЛ-1 и ВЛ-2.

УПК способно изменять реактивное сопротивление ВЛ в соответствии с выражением:

$$X_{\text{вл}} = X_L - X_C. \quad (9)$$

где X_L – индуктивное сопротивление ВЛ, X_C – емкостное сопротивление, вносимое УПК.

Таким образом, с помощью УПК можно менять реактивное сопротивление ВЛ, что влияет на снижение потерь напряжения на участке ВЛ:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot (X_L - X_C)}{U_{\text{ном}}}, \quad (10)$$

где P – активная мощность, Q – реактивная мощность, R – активное сопротивление ВЛ, $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение.

Находим нужное емкостное сопротивление в зависимости от того, на сколько процентов нужно снижать индуктивное сопротивление ВЛ:

$$X_C = k_{\text{сопр}} \cdot X_L, \quad (11)$$

где $k_{\text{сопр}}$ – коэффициент сопротивления, зависит от процента снижения

индуктивной составляющей сопротивления ВЛ.

Коэффициент сопротивления выбирается в зависимости от того, на какую величину нужно снижать индуктивное сопротивление ВЛ.

Далее определяется емкость конденсатора:

$$C = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot X_c} \cdot \quad (12)$$

После этого полученные емкости вводятся в устройство УПК.

Таким образом, для получения итогового сопротивления ВЛ при включении УПК, нужно из индуктивного сопротивления ВЛ (табл. 2) вычесть вводимое емкостное сопротивление, как это показано в (9).

VI. Работа УПК при включенной одной ВЛ-1 110 кВ

Рассмотрим режим при работе одной ВЛ 110 кВ (рис. 2). Емкость УПК выбирается в зависимости от сопротивления ЛЭП. Обычно конденсаторы применяются для компенсации от 25 до 75 % индуктивного сопротивления линии электропередачи [9]. При моделировании произведены изменения сопротивления от 20 до 100 %.

Произведен расчет сети без применения УПК для рассмотрения начальных значений напряжения, мощностей и токов без воздействия конденсаторов. При нормальном режиме работы без УПК ток в линии составляет 308 А, напряжение на узле нагрузки 98,07 кВ, что ниже порога по допустимому минимальному напряжению в соответствии с [7]. Соответственно, нужно повысить напряжение на конце передачи с помощью УПК.

Результаты расчетов режима работы ВЛ при включении УПК приведены в табл. 4-7. В табл. 4 приведено изменение тока в линии при изменении индуктивного сопротивления ВЛ-1, при этом провод АС 185/29 имеет длительно-допустимый ток 510 А. При уменьшении индуктивного сопротивления ВЛ-1 за счет внедрения УПК ток повышается, соответственно, процент загрузки по току повышается на 6,08 %. При внедрении УПК на 100 % наблюдается увеличение среднеквадратичного значения напряжения с 98,07 до 107,5 кВ, что способствовало уменьшению снижения напряжения ниже установленных в [7] значений при дополнительной загрузке сети (табл. 5). При внедрении УПК на 20 % уже имеет место увеличение напряжения с 98,07 кВ до 100,1 кВ, что входит в допустимые значения по [7]. Также увеличен коэффициент запаса статической устойчивости по напряжению при максимальной работе УПК с 0,274 до 0,396 (на 30,8 %). При том, что минимальное значение коэффициента при допустимых уровнях напряжения (99 кВ) согласно (6) составляет 0,286. Исходя из данных табл. 6, можно сделать вывод, что передаваемая активная мощность увеличивается с уменьшением индуктивного сопротивления.

Таблица 4.
Изменение тока линии электропередачи 110 кВ при работе УПК

Table 4.
Change in the current of the 110 kV power transmission line during the operation of the longitudinal compensation device

$X_{ВЛ-1}$, Ом	Вводимое сопротивление УПК X_c , %	Ток ЛЭП, А	Процент загрузки по току, %
37,76	0	308	60,39
30,208	20	315	61,76
22,656	40	321	62,94
15,104	60	327	64,12
7,552	80	333	65,29
0	100	339	66,47

Таблица 5.
Изменение напряжения в узле нагрузки 110 кВ при работе УПК

Table 5.
Voltage change at the 110 kV load node during the operation of the longitudinal compensation device

$X_{ВЛ-1}$, Ом	Вводимое сопротивление УПК X_c , %	Напряжение, кВ	K_U
37,76	0	98,07	0,274
30,208	20	100,1	0,300
22,656	40	102	0,325
15,104	60	103,9	0,349
7,552	80	105,7	0,373
0	100	107,5	0,396

Таблица 6.
Параметры активной мощности при применении УПК

Table 6.
Active power parameters when using longitudinal compensation device

Изменение емкостного сопротивления X_c , %	Начало ВЛ-1			Конец ВЛ-1		
	P без УПК, МВт	P с УПК, МВт	ΔP , МВт	P без УПК, МВт	P с УПК, МВт	ΔP , МВт
0	51,57	51,57	0	47,76	47,76	0
20	51,57	53,64	2,07	47,76	49,7	1,94
40	51,57	55,71	4,14	47,76	51,61	3,85
60	51,57	57,78	6,21	47,76	53,53	5,77

Продолжение табл. 6.
Table 6 (continued).

Изменение емкостного сопротивления X_C , %	Начало ВЛ-1			Конец ВЛ-1		
	P без УПК, МВт	P с УПК, МВт	ΔP , МВт	P без УПК, МВт	P с УПК, МВт	ΔP , МВт
80	51,57	59,84	8,27	47,76	55,44	7,68
100	51,57	61,86	10,29	47,76	57,31	9,55

При снижении индуктивного сопротивления наблюдается повышение передачи активной мощности по концу ВЛ-1, что благоприятно сказывается как на потребителе, так и на устойчивости узла нагрузки. Процент увеличения активной нагрузки при УПК 20 % равен 3,9 % (1,94 МВт), при УПК 100 % равен 16,66 % (9,55 МВт).

Таблица 7.
Параметры реактивной мощности при применении УПК

Table 7.
Reactive power parameters when using longitudinal compensation device

Изменение емкостного сопротивления X_C , %	Начало электропередачи			Конец электропередачи		
	Q без УПК, Мвар	Q с УПК, Мвар	ΔQ , Мвар	Q без УПК, Мвар	Q с УПК, Мвар	ΔQ , Мвар
0	32,61	32,61	0	23,87	23,87	0
20	32,61	31,69	-0,92	23,87	24,84	0,97
40	32,61	30,58	-2,03	23,87	25,8	1,93
60	32,61	29,3	-3,31	23,87	26,76	2,89
80	32,61	27,83	-4,78	23,87	27,71	3,84
100	32,61	26,17	-6,44	23,87	28,65	4,78

Исходя из данных табл. 7, можно сделать вывод, что реактивная мощность повышается в конце линии на 4,78 Мвар, что составляет 16,66 %, но при этом наблюдается снижение в начале электропередачи на 6,44 Мвар, составляет 24,6 %, следовательно, линией потребляется меньше реактивной мощности.

Таким образом, при работе ВЛ-1 с УПК повышается передаваемая активная мощность и увеличивается уровень напряжения в конце передачи, что способствует улучшению коэффициента запаса статической устойчивости по напряжению.

VII. Работа УПК при включенных двух параллельных ВЛ-1 и ВЛ-2 110 кВ

Рассмотрим режим при работе двух параллельных ВЛ-1 с проводом АС 185/29 и ВЛ-2 с проводом АС 300/39. УПК устанавливается на ВЛ-1.

Таблица 8.
Изменение тока в ВЛ-1 и ВЛ-2 110 кВ при работе УПК в ВЛ-1

Table 8.
Change in current in 110 kV overhead lines 1 and 2 during operation of the longitudinal compensation device installed in overhead line 1

$X_{ВЛ-1}, \text{ Ом}$	Вводимое сопротивление УПК $X_c, \%$	Ток ВЛ-1, А	Процент загрузки по току ВЛ-1, %	Ток ВЛ-2, А	Процент загрузки по току ВЛ-2, %
37,76	0	161	31,57	170	23,94
30,2	20	179	35,10	154	21,69
22,65	40	200	39,22	136	19,15
15,1	60	227	44,51	116	16,34
7,552	80	261	51,18	98	13,80
0	100	303	59,41	97	13,66

Таблица 9.
Изменение напряжения в узле нагрузки 110 кВ при работе УПК в ВЛ-1

Table 9.
Voltage changes in the 110 kV load node during the operation of the longitudinal compensation device in the overhead line 1

$X_{ВЛ-1}, \text{ Ом}$	Вводимое сопротивление УПК $X_c, \%$	Напряжение, кВ	K_U
37,76	0	106,7	0,386
30,2	20	107,1	0,391
22,65	40	107,4	0,395
15,1	60	107,8	0,400
7,552	80	107,9	0,401
0	100	107,9	0,401

Как видно из табл. 8, при уменьшении индуктивного сопротивления ВЛ-1 за счет внедрения УПК на 100 %, ток повышается с 161 до 303 А (с 31,57 до 59,41 % загрузки по току), а в ВЛ-2 наблюдается снижение с 170 до 97 А (с 23,94 до 13,66 % загрузки по току). При применении УПК на участке с двумя параллельными ВЛ изменение напряжения на конце электропередачи незначительно (табл. 9). Уровень напряжения на конце электропередачи при работе двух ВЛ-1 и ВЛ-2 (106,7 кВ) выше, чем при работе одной ВЛ-1 (98,07 кВ) на 8,63 кВ, что уже предотвращает снижение нап-

ряжения до недопустимых значений. Изменение коэффициента запаса статической устойчивости также является незначительным: с 0,386 до 0,401.

Рассмотрим изменение передаваемой мощности (табл. 10). При изменении сопротивления ВЛ-1 с помощью УПК наблюдается переток мощности между параллельными ВЛ-1 и ВЛ-2. Данные результаты нужно применять в сетевых районах, где наблюдается превышение загрузки одной из ВЛ. Для этого с помощью УПК можно изменить сопротивление ВЛ и изменить переток мощности, чтобы разгрузить перегруженную ВЛ.

Таблица 10.
Параметры активной и реактивной мощности при УПК в ВЛ-1

Table 10.
Parameters of active and reactive power at the longitudinal compensation device in the overhead line 1

Изменение емкостного сопротивления X_c , %	Активная мощность (P), МВт			Реактивная мощность (Q), Мвар		
	ВЛ-1	ВЛ-2	Δ	ВЛ-1	ВЛ-2	Δ
0	28,16	28,3	0,14	11,98	16,25	4,27
20	31,65	25,22	-6,43	12,33	16,1	3,77
40	35,96	21,3	-14,66	12,43	16,2	3,77
60	41,33	16,27	-25,06	12,11	16,69	4,58
80	48,02	9,741	-38,279	10,96	17,92	6,96
100	56,19	1,304	-54,886	8,184	20,56	12,376

VIII. Моделирование устройства защиты УПК от короткого замыкания

Последовательные конденсаторы подвергаются воздействию широкого диапазона токов, что может привести к возникновению больших напряжений на конденсаторах. При коротких замыканиях ток и напряжение на выводах конденсаторов резко возрастают. Во избежание пробоя конденсаторов они должны быть защищены специальным оборудованием. Таким образом, для предотвращения выхода из работы УПК важно обратить внимание на вопрос защиты конденсатора от перенапряжений при аварийных ситуациях в сетевом районе.

Модель *PSCAD* предусматривает защиту УПК от перенапряжений с помощью варистора (рис. 3). На ВЛ-1 смоделировано короткое замыкание в момент времени 2 с (рис. 4). Это приведет к увеличению напряжения на конденсаторе. Устройство защиты становится активным, когда напряжение конденсатора пытается превысить защитный уровень. В ответ варистор ограничит напряжение конденсатора на защитном уровне и не позволит ему возрасти.

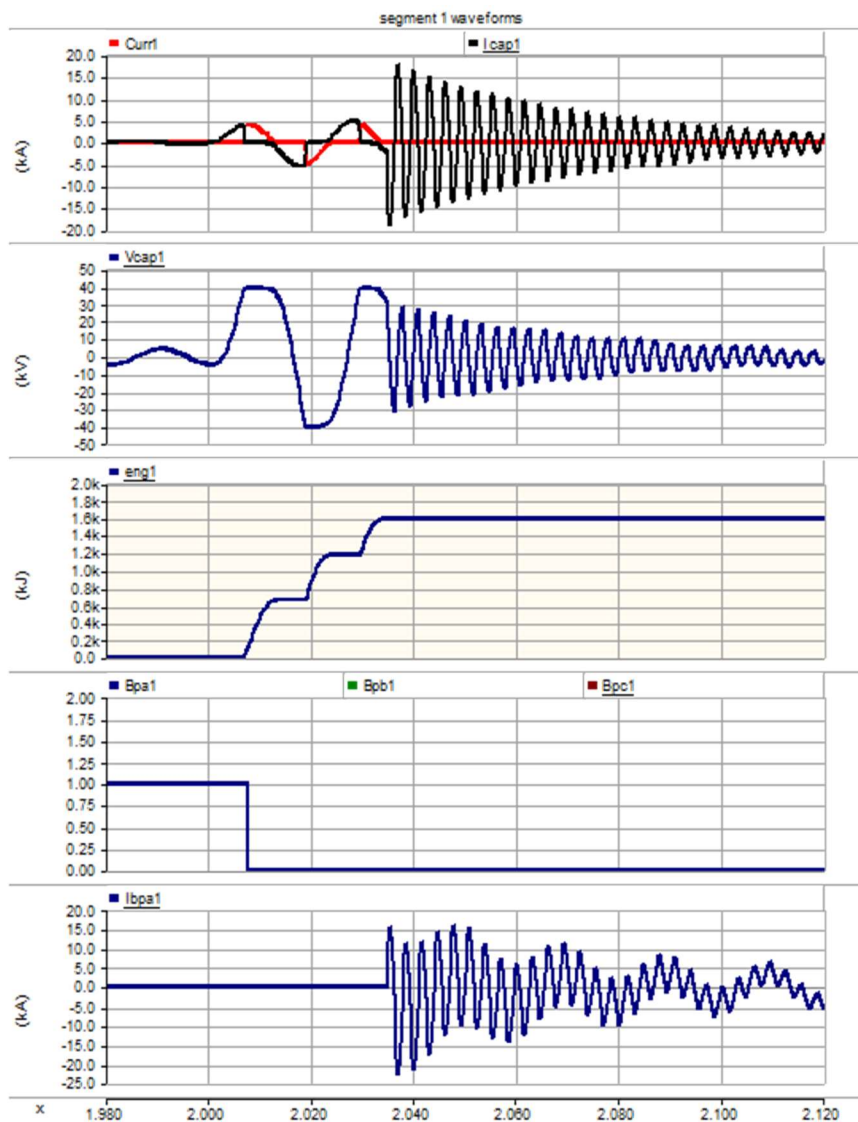


Рис. 4. Осциллограммы при работе защиты во время КЗ

Fig. 4. Oscillograms of protection operation during short circuit

При превышении напряжения на конденсаторе (V_{cap1}) варистор начинает менять свою вольтамперную характеристику и подавать ток в противофазе для уменьшения тока через конденсатор. Когда один из сигналов энергии или тока превышает допустимое значение на варисторе (*engal* и *curral*), в работу включается выключатель второй цепи, который перенаправляет ток КЗ от варистора. На графиках момент включения в работу выключателя второй ветви показан как *Bpa1* (рис. 4). Катушка индуктивности ограничивает выбросы высокочастотных токов, а резистор обеспечивает дополнительное демпфирование.

Напряжение на конденсаторе (V_{cap1}) ограничивается до тех пор, пока напряжение превышает допустимое значение. Как только оно перестает превышать допустимую границу, варистор перестает ограничивать ток (график *Curr1*). На V_{cap1} наблюдается затухание напряжения до нормальных значений. После того как выполнено ограничение перенапряжения, наблюдается высокий ток на I_{cap1} (ток через выключатель второй линии), имеющий затухающий характер. Вместе с тем затухает напряжение, которое было ограничено ранее.

Таким образом, задача защиты конденсатора от перенапряжения выполняется.

IX. Заключение

Можно выделить следующие ключевые моменты в использовании УПК на имитационной модели *PSCAD* с двумя воздушными линиями и одним узлом нагрузки.

1. При внедрении УПК на 100 % в электрическую систему с работой одной ВЛ-1, наблюдаются:

- увеличение активной передаваемой мощности с 47,76 до 57,31 МВт, что составляет увеличение на 16,66 %;
- напряжение узла нагрузки увеличилось с 98,07 до 107,5 кВ;
- снижение реактивной мощности в начале ВЛ-1 на 6,44 Мвар, что составляет 24,6 %;
- повышение коэффициента статической устойчивости по напряжению с 0,274 до 0,396.

2. Данные при применении УПК при одной воздушной линии показывают увеличение передаваемой мощности, повышение напряжения на узле нагрузки, значительное уменьшение потребляемой реактивной мощности электропередачей и улучшение статической устойчивости, что подтверждает теоретические данные по основным преимуществам УПК.

3. Рассматривая применение УПК на участке с двумя ВЛ-1 и ВЛ-2 при установке компенсации на ВЛ-1, необходимо отметить, что изменения передаваемой мощности не столь значительны, как при одной ВЛ-1.

Изменяя сопротивление одной из ВЛ, мы наблюдаем переток мощ-

ности от одной к другой линии. Данный метод помогает разгружать перегруженные ВЛ и регулировать потоки мощности в сетевом районе. Например, при превышении загрузки ВЛ можно наблюдать зависимость перетока мощности, а также величины тока, проходящего по двум ВЛ

Данные по току до применения УПК показывают, что ток на первой ВЛ составляет 161 А, на второй – 170 А. Если нужно разгрузить ВЛ-2, тогда, благодаря работе УПК на 100 %, ток на ВЛ-1 возможно увеличить до 303 А, а на второй линии – уменьшать до 97 А. Следовательно, есть возможность изменять переток мощности в линиях, не допуская при этом перегрузки одной и недогрузки второй ВЛ.

УПК влияет на параллельные ВЛ по большей мере тем, что способствует регулированию перетоков мощности между линиями передачи. Такое свойство полезно, если определенные линии загружены достаточно сильно, по сравнению с другими. К примеру, согласно практике ведения режимов АО «СО ЕЭС» для ЛЭП, нагрузка которых более чем 75 % от максимально допустимых значений токов в нормальном режиме, требуется дополнительный контроль.

© Лоскутов А. А., 2021

© Лоскутов А. Б., 2021

© Шальнов Ю. С., 2021

Поступила в редакцию 27.08.2021

Received 27.08.2021

Библиографический список

- [1] Панфилов Д.И., Шакарян Ю.Г., Асташев М.Г., Рашитов П.А., Антонов А.В. Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи // *Электротехника*. 2017. № 7. С. 78-82.
- [2] Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Рашитов П.А., Рожков А.Н. Применение двухтактного преобразователя в малогабаритном устройстве распределенной продольной компенсации для воздушных линий электропередачи // *Известия РАН. Энергетика*. 2016. № 6. С. 56-67.
- [3] Astashev M.G., Panfilov D.I., Rashitov P.A., Rozhkov A.N., Seregin D.A. Automated control unit of power flow in intellectual electricity distribution network // in *proc. Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”*, Dec. 14-15, 2016, Moscow, Russia. Springer, 2017. P. 159-164. DOI: 10.1007/978-3-319-62870-7_17
- [4] Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Мурачев А.С., Платонов П.С. Малогабаритные устройства продольной компенсации и оценка их влияния на параметры срабатывания устройств релейной защиты ВЛ 220 кВ // *Известия РАН. Энергетика*. 2018. № 2. С. 26-35.

- [5] Панфилов Д.И., Асташев М.Г. Устройство продольной компенсации для линий электропередачи, Пат. 2683784 RU, заявл. 06.06.18; опубл. 02.04.19. – Бюл. № 10.
- [6] Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок "Методические указания по устойчивости энергосистем". Утв. приказом Минэнерго России № 630 от 03.08.2018.
- [7] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [8] Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Лачугин В.Ф. Исследование и разработка опытного образца малогабаритного устройства распределенной продольной компенсации для ЛЭП 220 кВ с выбором и обоснованием пилотного объекта внедрения. М.: ОАО «Энергетический Институт им. Г.М. Кржижановского», 2016.
- [9] PSCAD Cookbook. Series Compensation Study. Canada: Manitoba Hydro International Ltd, 2018.
- [10] Dhaked D.K., Lalwani M. A comprehensive review on a D-FACTS controller: enhanced power flow controller (EPFC) // International Journal of Advances in Engineering & Technology. 2017. Vol. 10. Is. 1. Pp. 84-92.
- [11] Laufenberg M. D-FACTS devices in PowerWorld Simulator. Power World Corporation, 2014.

References

- [1] D.I. Panfilov, M.G. Astashev, Y.G. Shakaryan, A.V. Antonov and P.A. Rashitov, "Small devices for longitudinal compensation in overhead power lines", *Russian Electrical Engineering*, vol. 88, no. 7, pp. 471-474, 2017.
- [2] M.G. Astashev, D.I. Panfilov, P.A. Rashitov and A.N. Rozhkov, "Primenenie dvuhstaktnogo preobrazovatelya v malogabaritnom ustrojstve raspredelyonnoj prodol'noj kompensacii dlya vozdushnyh linij elektroperedachi [Application of a push-pull converter in a small-sized device for distributed longitudinal compensation for overhead power lines]", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 4, pp. 56-67, 2016 (in Russian).
- [3] M.G. Astashev, D.I. Panfilov, P.A. Rashitov, A.N. Rozhkov and D.A. Seregin, "Automated control unit of power flow in intellectual electricity distribution network", in proc. *Scientific-Practical Conference "Research and Development – 2016"*, Dec. 14-15, 2016, Moscow, Russia, pp. 159-164. DOI: 10.1007/978-3-319-62870-7_17
- [4] V.F. Lachugin, D.I. Panfilov, M.G. Astashev, A.S. Murachev and P.S. Platonov, "Distributed static series compensators (DSSC) and impact assessment on the relay protection settings for overhead line 220 kV", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 2, pp. 26-35, 2018 (in Russian).
- [5] D.I. Panfilov and M.G. Astashev, "Device of longitudinal compensation for electrical transmission lines". Patent RU 2683784, Apr. 02, 2019.
- [6] Trebovaniya k obespecheniyu nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem, nadezhnosti i bezopasnosti ob"ektov elektroenergetiki i energopriniimayushchih ustanovok

- “Metodicheskie ukazaniya po ustojchivosti energosistem” [Requirements for ensuring the reliability of electric power systems, reliability and safety of electric power facilities and power receiving installations "Guidelines for the sustainability of power systems".]. Approved by order of the Ministry of Energy of Russia no. 630 dated Aug. 03, 2018 (in Russian).
- [7] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [8] D.I. Panfilov, M.G. Astashev and V.F. Lachugin, *Issledovanie i razrabotka opytnogo obrazca malogabaritnogo ustrojstva raspredelennoj prodol'noj kompensacii dlya LEP 220 kV s vyborom i obosnovaniem pilotnogo ob'ekta vnedreniya* [Research and development of a prototype of a small-sized device for distributed longitudinal compensation for 220 kV transmission lines with the selection and justification of a pilot implementation object]. Moscow: Stock Company G.M. Khrzhizhanovsky Power Engineering Institute, 2016 (in Russian).
- [9] *PSCAD Cookbook. Series Compensation Study*. Canada: Manitoba Hydro International Ltd., 2018.
- [10] D.K. Dhaked and M. Lalwani, “A comprehensive review on a D-FACTS controller: enhanced power flow controller (EPFC)”, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 10, is. 1, pp. 84-92, Feb. 2017.
- [11] M. Laufenberg, *D-FACTS devices in Power World Simulator*. Power World Corporation, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лоскутов Антон Алексеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Лоскутов Алексей Борисович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Шальнов Юрий Сергеевич, магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Loskutov Anton Alekseyevich, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Loskutov Aleksey Borisovich, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Shal'nov Yuriy Sergeyeovich, master of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation