

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

СПОСОБЫ ЛИКВИДАЦИИ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ*

Т.Г. КРАСИЛЬНИКОВА¹, С.Г. ДЖОНОНАЕВ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем. E-mail: tatka552005@ya.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем. E-mail: jononaev.87@mail.ru

С точки зрения возмущающих воздействий на примыкающие системы существенное значение имеет способ ликвидации коротких замыканий в линии. Возникающие на линии неустойчивые ОКЗ сопровождаются минимальными возмущениями на примыкающие системы, если они ликвидируются в цикле однофазного автоматического повторного включения. В этом случае поврежденную фазу линии отключают с двух сторон, а затем через определенное время так называемую бестоковую паузу автоматически повторно включают. За время бестоковой паузы вторичная дуга в месте перекрытия может погаснуть, а место перекрытия деионизироваться и почти полностью восстановить свою электрическую прочность. При эксплуатации СВН более 70 % однофазных коротких замыканий имеют неустойчивый характер, т. е. могут быть устранены в цикле кратковременной бестоковой паузы с последующим восстановлением нормальной схемы. Таким образом, ОАПВ относится к важнейшей мере, повышающей надежность электропередач сверхвысокого напряжения. Успешность ОАПВ при ликвидации дуговых коротких замыканий, с одной стороны, определяется характеристикой вторичной дуги, возникающей в длинных воздушных промежутках, а с другой стороны, эффективностью применяемых способов для снижения вторичных токов дуги и восстанавливаемых напряжений после ее погасания. Осуществление ОАПВ в электропередачах переменного тока затрудняется наличием подпитки места повреждения со стороны неотключенных фаз. Режимными параметрами, определяющими условия гашения вторичной дуги, являются вторичный ток дуги, протекающей в дуге до ее гашения, восстанавливающееся напряжение в месте ОКЗ после погасания вторичной дуги.

Ключевые слова: линия СВН, однофазное автоматическое повторное включение, четырехлучевые шунтирующие реакторы, быстродействующие шунтирующие выключа-

* Статья получена 31 марта 2016 г.

тели, идеально транспонированная линия, восстанавливающееся напряжение, вторичный ток дуги, бестоковая пауза

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-2-116-130

ВВЕДЕНИЕ

В дальних электропередачах отказы практически полностью определяются авариями на линии в связи с большой ее длиной. При этом в линиях напряжением 500...1150 кВ подавляющая доля отключений вызывается однофазными короткими замыканиями (ОКЗ). Это объясняется возрастающим запасом межфазовой изоляции линий вследствие увеличения изоляционных расстояний на опорах и в пролете. При эксплуатации линий сверхвысокого напряжения (СВН) более 70 % однофазных коротких замыканий имеют неустойчивый характер, т. е. могут быть устранены в цикле кратковременной бестоковой паузы с последующим восстановлением нормальной схемы. Таким образом, ОАПВ относится к важнейшей мере, повышающей надежность электропередач сверхвысокого напряжения.

Успешность ОАПВ при ликвидации дуговых коротких замыканий, с одной стороны, определяется характеристикой вторичной дуги, возникающей в длинных воздушных промежутках, а с другой стороны, эффективностью применяемых способов для снижения вторичных токов дуги и восстанавливающихся напряжений после ее погасания.

Осуществление успешного ОАПВ в электропередачах переменного тока затрудняется наличием подпитки места повреждения со стороны неотключенных фаз. Режимными параметрами, определяющими условия гашения вторичной дуги, являются вторичный ток дуги (ВТД), протекающей в дуге до ее гашения, I_d ; восстанавливающееся напряжение (ВН) в месте ОКЗ после погасания вторичной дуги, $U_{вн}$; скорость восстановления этого напряжения при гашении дуги.

Длительность горения вторичной дуги зависит и от других факторов, например, от первичного тока ОКЗ, определяющего длину дуги и степень ионизации ее канала, от метеоусловий, влияющих на растягивание и охлаждение дуги, что в целом определяет статистический характер времени горения дуги.

По имеющимся данным [1], среднее время горения вторичной дуги в основном зависит от величины установившегося ВТД. Эта зависимость показана на рис. 1. При токах дуги более 90 А гашение вторичной дуги становится проблематичным.

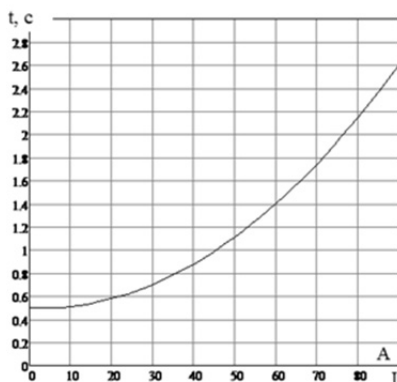


Рис. 1. Зависимость бестоковой паузы ОАПВ от амплитуды вынужденной составляющей вторичного тока дуги

Наибольший эффект дает применение ОАПВ, если длительность паузы составляет 0,5...1,0 с, для чего требуется ограничение вторичного тока дуги до 30...45 А (амплитудное значение). При паузе более 1,5...2,0 с ее длительность не оказывает существенного влияния на пропускную способность по условию динамической устойчивости, и в этом случае необходимая продолжительность паузы определяется лишь условием гашения ВТД.

С увеличением номинального напряжения, протяженности линии и степени ее загрузки влияние неповрежденных фаз становится всё более существенным, затрудняющим возможность успешного самопогасания вторичной дуги при ОАПВ.

Имеется много работ [2–13], посвященных проблеме ликвидации неустойчивых ОКЗ. Адекватное моделирование линии является необходимым условием для получения правильных результатов. Как правило, в длинных линиях используется транспозиция фаз, состоящая из трех шагов транспозиции. При оценке ВТД и ВН такие линии у нас и за рубежом обычно принимаются идеально транспонированными, т. е. обладающими симметрией фазных и межфазных параметров.

1. АНАЛИЗ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ВТОРИЧНЫХ ТОКОВ ДУГИ В ИДЕАЛЬНО ТРАНСПОНИРОВАННОЙ ВЛ

На рис. 2, а показана схема замещения для расчета установившихся ВН и ВТД в линиях с идеальной транспозицией, когда фазные сопротивления и проводимости, а также межфазные величины являются идентичными. Индуктивности примыкающих систем оказывают незначительное влияние на искомые величины, поэтому системы могут быть представлены ЭДС, которые по модулю равны максимальному рабочему напряжению. Активными сопротивлениями также можно пренебречь. После несложных преобразований схема приводится к виду на рис. 2, б.

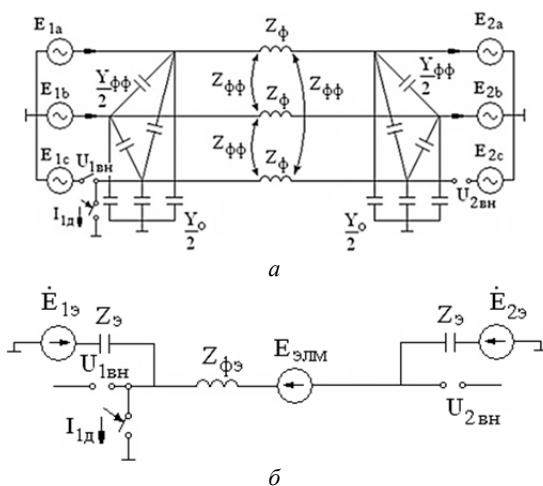


Рис. 2. Полная и эквивалентная схемы замещения линии при ОАПВ:

а – полная схема замещения линии в фазных координатах;
б – эквивалентная схема замещения линии

По методическим соображениям удобнее сначала провести анализ ВН на отключённой фазе, после чего на основе теоремы об эквивалентном источнике ток дуги для концевых точек линии, где имеют место наибольшие значения искомых величин, определится как

$$I_{1д} = \frac{U_{1ВН}}{Z_{1ВХ}}, \quad I_{2д} = \frac{U_{2ВН}}{Z_{2ВХ}},$$

где $U_{1ВН}$, $U_{2ВН}$ – ВН в соответствующей точке линии; $Z_{1ВХ}$, $Z_{2ВХ}$ – входные сопротивления схемы относительно соответствующих точек линии.

На рис. 3 показано влияние угла между напряжениями по концам идеально-транспонированной линии, увеличивающегося в процессе динамического перехода и достигающего значений $2,0 \dots 2,5 \delta_0$, где δ_0 – угол между напряжениями в исходном нормальном режиме. В относительных единицах величина ВН практически не зависит от длины линии. Если в качестве исходного режима принять режим натуральной мощности, то угол для характерных длин в нормальном режиме не превышает 30° , а в режиме качаний будет не более 75° . Отсюда следует, что ВН оценивается величиной $U_{1ВН} = (0,1 \dots 0,2) U_\phi$, где U_ϕ – фазное напряжение.

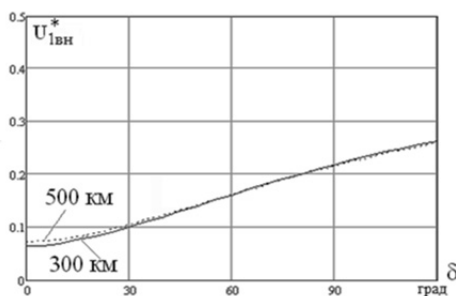


Рис. 3. Зависимость ВН от угла между концевыми напряжениями

При анализе целесообразно выделить электростатическую и электромагнитную составляющие для ВН и, соответственно, для ВТД. Электростатическая составляющая определяется подпиткой со стороны здоровых фаз через междофазные емкости. Электромагнитная составляющая определяется ЭДС взаимоиндукции, наведенной в аварийной фазе токами здоровых фаз.

В режиме холостого хода, когда ток в линии равен практически нулю, в токе подпитки присутствует лишь электростатическая составляющая, значение которой определяется уровнем напряжения на неповрежденных фазах и величиной междофазовых емкостных проводимостей.

При передаче по линии мощности в поврежденной фазе наводится токами неповрежденных фаз ЭДС. Под действием этого в контуре ЭДС аварийная фаза – земля, включающем емкостную проводимость на землю, протекает электромагнитная составляющая тока подпитки.

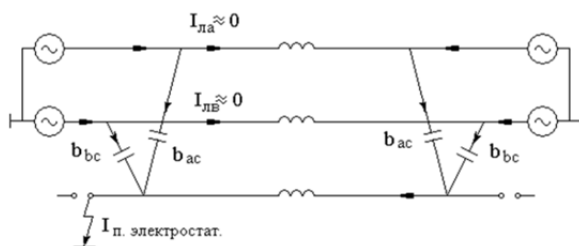


Рис. 4. Схема, поясняющая электростатическую составляющую тока подпитки

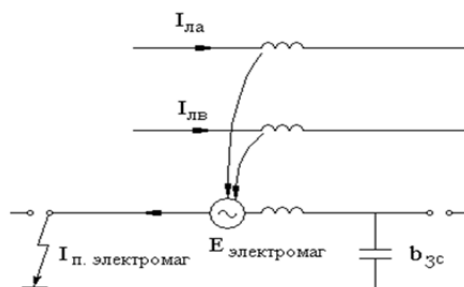


Рис. 5. Схема, поясняющая электромагнитную составляющую тока подпитки

На рис. 6 показан характер изменения электростатической и электромагнитной составляющих ВН в зависимости от угла между концевыми напряжениями.

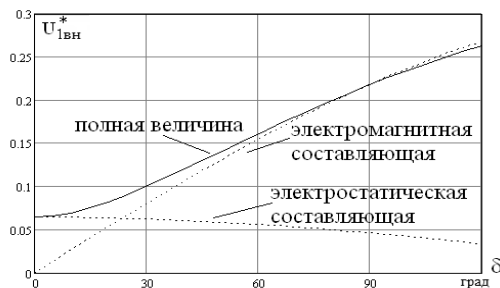


Рис. 6. Зависимость ВН и его составляющих от угла между концевыми напряжениями

Если ВН в относительных единицах практически не зависит от длины линии, то протяженность линии существенно влияет на вторичный ток дуги, что подтверждают кривые, приведенные на рис. 7.

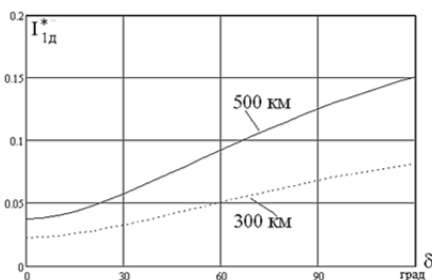


Рис. 7. Зависимость вторичного тока дуги от угла между концевыми ЭДС

В таблице приведены значения ВТД в абсолютных единицах для линий СВН при длинах 300 и 500 км и при $\delta = 0 \dots 2\lambda$, где $\lambda = \beta \cdot \ell$ — электрическая длина линии. Сопротивление дуги принималось равным $R_d = 10$ Ом, что соответствует сопротивлению первичной дуги.

Вторичные токи дуги для линий СВН при различных исходных данных

Номинальное напряжение, кВ	Длина линии, км	ВТД, А		
		$\delta = 0$	$\delta = \lambda$	$\delta = 2\lambda$
500	300	60	64	72
	500	104	121	159
750	300	81	88	106
	500	138	173	247

Из таблицы следует, что критические значения токов дуги более 90 А могут иметь место для всех линий СВН, особенно при их длине, превышающей 300 км, и углах отклонения $\delta \geq \lambda$.

Известно, что для снижения электростатической составляющей тока дуги подпитки необходимо компенсировать частично или полностью междуфазные емкости, а для уменьшения электромагнитной составляющей следует обеспе-

чить компенсацию емкостей на землю. Эти обе задачи решаются с помощью четырехлучевых шунтирующих реакторов.

Существует и другой вариант для создания условий, обеспечивающих надежное гашение вторичной дуги. Он заключается в автоматическом шунтировании фазы (АШФ) быстродействующими шунтирующими выключателями после ее отключения линейными выключателями.

2. АНАЛИЗ ВН И ВТД В ИДЕАЛЬНО ТРАНСПОНИРОВАННОЙ ВЛ ПРИ ОАПВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВЫХ РЕАКТОРОВ

Снижение тока дуги подпитки в ВЛ СВН обеспечивается за счет подключения к линии шунтирующих реакторов (рис. 8) по ее концам (если они были отключены в нормальном режиме для создания оптимальных условий работы). При этом вводится в работу нулевой реактор в нейтраль шунтирующего реактора, что позволяет осуществить компенсации не только емкостей линии на землю, но и междупазовых емкостей, тем самым ограничивая как электростатическую, так и электромагнитную составляющие тока подпитки. Число устанавливаемых на линии шунтирующих реакторов определяется 70...80 % степенью компенсации зарядной мощности линии и составляет один реактор при длине линии порядка 200 км, два реактора при длине 300...400 км и три реактора при длине 500...600 км.

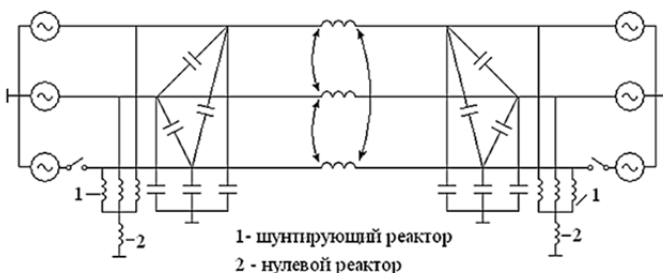


Рис. 8. П-образная схема замещения ВЛ с подключенными шунтирующими реакторами

Обычный ШР с глухо заземленной нейтралью (рис. 9) обеспечивает лишь компенсацию емкостей на землю, снижая, таким образом, электромагнитную составляющую тока дуги. Компенсация междупазовых емкостей может быть осуществлена путем включения в его нейтраль компенсационного (нулевого)

реактора (КР). Действительно, как видно из преобразованной схемы, будет иметь место компенсация как емкостей на землю, так и междупазных емкостей.

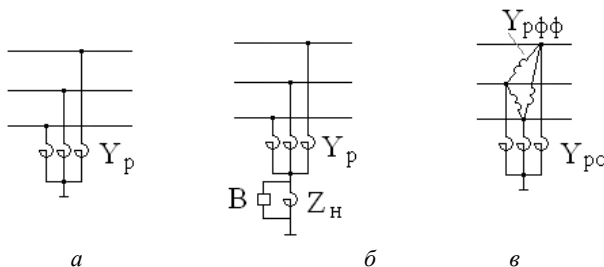


Рис. 9. Схемы шунтирующего реактора:

a – ШР; *б* – ШР с КР; *в* – преобразованная схема ШР с КР

Расчеты показали, что в линиях длиной до 400 км при симметричном расположении реакторов (по одному ШР на каждом конце линии) токи дуги не превышают 30 А и длительность паузы ОАПВ для рассматриваемого варианта может быть обеспечена в пределах 0,5 с. Для линий длиной 500 км токи подпитки превосходят допустимый уровень и требуются дополнительные мероприятия для их снижения.

3. АНАЛИЗ ВН И ВТД В ИДЕАЛЬНО ТРАНСПОНИРОВАННОЙ ВЛ ПРИ ОАПВ С АШФ

В трехфазных электропередачах для обеспечения условий надежного гашения дуги подпитки используется схема с включением в нейтраль шунтирующих реакторов индуктивных элементов, так называемых нулевых реакторов. ОАПВ с использованием четырехлучевых реакторов для ликвидации неустойчивых ОКЗ решает эту проблему не лучшим образом, особенно когда речь идет о линиях длиной порядка 500 км.

Необходимо также отметить недостатки, присущие ОАПВ с использованием четырехлучевых реакторов [14]. Первый недостаток состоит в возможности появления резонансных повышений напряжения в паузу ОАПВ, что накладывает ограничение на схему электропередачи в режиме ОАПВ.

Второй недостаток связан с необходимостью коммутации реакторных выключателей для введения в работу всех шунтирующих реакторов в паузу ОАПВ для обеспечения условий гашения вторичной дуги, поскольку в нормальных режимах при передаче значительных мощностей шунтирующие ре-

акторы, как правило, отключены от линии реакторными выключателями по условиям режима напряжений. При этом отказ любой фазы одного из выключателей приводит к невозможности проведения ОАПВ, что усугубляет аварийную ситуацию и тем самым снижает надежность работы.

Третий недостаток состоит в том, что подключение шунтирующих реакторов при осуществлении ОАПВ приводит к понижению напряжения на шинах и, соответственно, снижает пропускную способность электропередачи по условию динамической устойчивости.

Устранить указанные недостатки ОАПВ с использованием четырехлучевых реакторов, а также повысить эффективность и надежность ликвидации неустойчивых ОКЗ позволяет другой способ – ОАПВ с использованием автоматического шунтирования фазы (АШФ) с помощью быстродействующих шунтирующих выключателей [15]. Этот способ основывается на автоматическом шунтировании фазы (АШФ) после ее отключения, что обеспечивает резкое снижение токов дуги подпитки и, соответственно, быстрое и надежное гашение дуги. В этом варианте требуется оснащение ВЛ шунтирующими выключателями с высокими требованиями по исключению их ложного срабатывания, которое может приводить к аварийной ситуации в нормальной схеме.

Рисунок 10 показывает схему осуществления ОАПВ с АШФ. При возникновении ОКЗ на линии аварийная фаза отключается линейными выключателями В1 и В2 и затем с минимальной задержкой шунтируется по концам линии шунтирующими выключателями ШВ1 и ШВ2. В результате создаются благоприятные условия для гашения вторичной дуги. В конце паузы ОАПВ с АШФ происходит расшунтирование фазы и с минимально возможной задержкой включаются линейные выключатели.

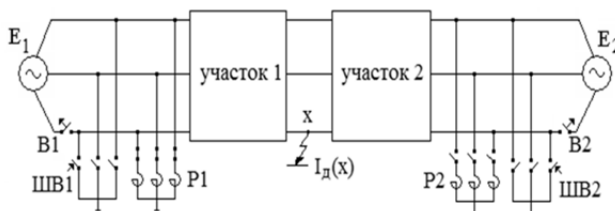


Рис. 10. Схема осуществления ОАПВ при АШФ

Расчеты показали, что в линиях длиной 300...500 км АШФ позволяет решить проблему снижения токов дуги подпитки до уровня 40 А и обеспечить паузу ОАПВ в пределах 0,5 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значения вторичных токов дуги для рассмотренных случаев были получены для идеально транспонированных линий. Предварительные расчеты показывают, что учет реальной транспозиции линии при оценке реализации ОАПВ является обязательным условием. Максимальные ВН и ВТД при реальной транспозиции превосходят в 1,5–2,5 раза соответствующие величины в случае, когда линия представляется как идеально транспонированная.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы применения ОАПВ в электропередаче 1150 кВ / Н.Н. Беляков, В.С. Рашкес, М.Л. Левинштейн, М.И. Хорошев // Электропередачи 1150 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – Кн. 1. – С. 129–158.
2. Исследование ОАПВ в электропередачах 750 кВ с четырехлучевым реактором / Н.Н. Беляков и др. // Электрические станции. – 1982. – № 12. – С. 43–48.
3. *Левинштейн М.Л., Хакимов Ф.З.* Компенсация токов подпитки дуги при ОАПВ ЛЭП с однократным циклом транспозиции // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1988. – № 5. – С. 45–51.
4. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1993. – 560 с.
5. *Kimbark E.W.* Supression of ground-fault arcs on single-pole switched EHV lines by shunt reactors // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – 1964. – Vol. PAS-83. – P. 285–290.
6. *Dudurych I.M., Galagher T.J., Rosolowski E.* Arc effect on single phase reclosing time of a UHV power transmission line // IEEE Transaction on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, N 2. – P. 854–860.
7. *Рашкес В.С.* Обобщение эксплуатационных данных эффективности ОАПВ ВЛ СВН и опытных данных времени гашения дуги подпитки // Электрические станции. – 1989. – № 3. – С. 65–72.
8. *Peterson H.A., David N.V.* A method for reducing dead time for single-phase reclosing in EHV transmission // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – 1969. – Vol. PAS-88. – P. 286–292.
9. *Khudsen N.* Single phase switching on transmission lines using reactors for extinction of the secondary arc. – Paris, 1962. – 11 p. – (CIGRE Report; 310).
10. The use of reactor in single phase switching / A.J. Fakhery, J. Grazan, B.R. Shperling, B.J. Ware. – (CIGRE Report; 13–06).

11. *Johns A.T., Ritchie W.M.* Application of an Improved technique for assessing the performance of single-pole reclosing schemes // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – 1984. – Vol. PAS-103, N 12. – P. 3651–3662.
12. *Tavares M.C., Portela C.M.* Transmission system parameters optimization – sensitivity analysis of secondary arc current and recovery voltage // IEEE Transaction on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19, N 3. – P. 1464–1471.
13. Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines – IEEE Committee Report // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, N 1. – P. 182–192.
14. *Зильберман С.М., Красильников Е.Н.* Комбинированная поперечная компенсация линий сверхвысокого напряжения // Электричество. – 2012. – № 1. – С. 19–23.
15. The application of high-speed grounding switches for single-pole reclosing on 500-kV power system / R.M. Hasibar, A.C. Legate, J.H. Brunke, W.G. Peterson // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – 1981. – Vol. PAS-100, N 4. – P. 1512–1515.
16. *Красильникова Т.Г., Манусов В.З.* Анализ токов дуги подпитки в паузу ОАПВ в процессе динамического перехода // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 313–316.
17. *Красильникова Т.Г.* Устройство для повышения эффективности ОАПВ в высоковольтных линиях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 1. – С. 232–234.

Красильникова Татьяна Германовна, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: транспорт электроэнергии на дальние расстояния, нетрадиционные способы передачи электроэнергии. Имеет около 50 публикаций. E-mail: tatka552005@yandex.ru

Джононаев Сайёд Гулмуродович, аспирант первого года кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: транспорт электроэнергии на дальние расстояния, нетрадиционные способы передачи электроэнергии. E-mail: jononaev.87@mail.ru

The methods of liquidation single-phase short circuit in the aerial lines of extra-high voltage*

T.G. Krasil'nikova¹, S.G. Jononaev²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: tatka552005@ya.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: jononaev.87@mail.ru

For interconnected system it is extremely important to promote a fast elimination of the single line to ground fault. The most used suppression method is the fast single-phase auto-reclosing (SPAR). In this maneuver only the faulty phase is opened at both ends, resulting in a minimum disturbance for the system that is still connected through the other two healthy phases. For EHV lines more than 70 % of SLG faults are non-permanent (transient or unstable), or better, can self-extinguish. These faults can be eliminated during dead time with the subsequent system restoration to normal condition. Thus, SPAR results in the main procedure to enhance EHV transmission systems reliability. SPAR success through the elimination of secondary arc is defined by the characteristic of the secondary arc elongation in long gaps, and also, the efficient mitigation methods to reduce secondary arc current (SAC) and, after secondary arc extinction, the recovery voltage (RV). The secondary arc is maintained through capacitive and inductive coupling of faulty opened phase and the healthy phases during SPAR. Besides, if the line is shunt compensated the opened phase will be physically connected to energized circuit through four-legged shunt reactor. The most important parameters associated to secondary arc extinction are: SAC flowing in arc before its extinction; RV appearing across the secondary arc path after secondary arc extinction.

Keywords: EHV transmission line, single-phase auto-reclosing, four-legged shunt reactor, high-speed grounding switch, transposed lines, recovery voltage, secondary arc current, dead time

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-2-116-130

REFERENCES

1. Belyakov N.N., Rashkes V.S., Levinshtein M.L., Khoroshev M.I. Perspektivy primeneniya OAPV v elektropredache 1150 kV [The prospects of application of the Single-Phase Auto-Reclosing in power transmission 1150 kV]. *Elektropredachi 1150 kV* [1150 kV transmission]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, bk. 1, pp. 129–158.
2. Belyakov N.N., et al. Issledovanie OAPV v elektropredachakh 750 kV s chetyrekhlučevym reaktorom [The research single-phase auto-reclosing in power transmission 750 kV with quadriradiate shuntings reactors]. *Elektricheskie stantsii – Power Technology and Engineering*, 1982, no. 12, pp. 43–48. (In Russian)

* Received 31 March 2016.

3. Levinshtein M.L., Khakimov F.Z. Kompensatsiya tokov podpitki dugi pri OAPV LEP s odnokratnym tsiklom transpozitsii [The compensation feeding currents arc when Single-Phase Auto-Reclosing transmission lines with single cycle transposition]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR – Proceedings of Academy of Sciences. Power Engineering and Transport*, 1988, no. 5, pp. 45–51.

4. Aleksandrov G.N., ed. Proektirovanie linii elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya [The design of superhigh voltage transmission lines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1993. 560 p.

5. Kimbark E.W. Supression of ground-fault arcs on single-pole switched EHV lines by shunt reactors. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 1964, vol. PAS-83, pp. 285–290.

6. Dudurych I.M., Gallagher T.J., Rosolowski E. Arc effect on single phase reclosing time of a UHV power transmission line. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 854–860.

7. Rashkes V.S. Obobshchenie ekspluatatsionnykh dannykh effektivnosti OAPV VL SVN i opytnykh dannykh vremeni gasheniya dugi podpitki [Generalisation of operational data of efficiency SPAR on EHV lines and experimental data of time of secondary arc extinction]. *Elektricheskie stantsii – Power Technology and Engineering*, 1989, no. 3, pp. 65–72.

8. Peterson H.A., David N.V. A method for reducing dead time for single-phase reclosing in EHV transmissioin. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 1969, vol. PAS-88, pp. 286–292.

9. Khudsen N. *Single phase switching on transmission lines using reactors for extinction of the secondary arc. CIGRE Report*, 310. Paris, 1962. 11 p.

10. Fakhery A.J., Grazan J., Shperling B.R., Ware B.J. *The use of reactor in single phase switching. CIGRE Report*, 13-06, 1980.

11. Johns A.T., Ritchie W.M. Application of an improved technique for assessing the performance of single-pole reclosing schemes. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 1984, vol. PAS-103, no. 12, pp. 3651–3662.

12. Tavares M.C., Portela C.M. Transmission system parameters optimization – sensitivity analysis of secondary arc current and recovery voltage. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2004, vol. 19, no. 3, pp. 1464–1471.

13. Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines – IEEE Committee Report. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1992, vol. 7, no. 1, pp. 182–192.

14. Zil'berman S.M., Krasil'nikov E.N. Kombinirovannaya poperechnaya kompensatsiya linii sverkhvysokogo napryazheniya [The combined shunt compensation of EHV dines]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2012, no. 1, pp. 19–23.

15. Hasibar R.M., Legate A.C., Brunke J.H., Peterson W.G. The application of high-speed grounding switches for single-pole reclosing on 500-kV power system. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 1981, vol. PAS-100, no. 4, pp. 1512–1515.

16. Krasil'nikova T.G., Manusov V.Z. Analiz tokov dugi podpitki v pauzu OAPV v protsesse dinamicheskogo perekhoda [The analysis of arc seed currents in pause Single-Phase Auto-Reclosing in the process of dynamic transition]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – The Scientific Transport Problems of Siberia and the Far East*, 2009, no. 1, pp. 313–316.

17. Krasil'nikova T.G. Ustroistvo dlya povysheniya effektivnosti OAPV v vysokovol'tnykh liniyakh [The device to improve the efficiency Single-Phase Auto-Reclosing in the high-voltage lines]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – The Scientific Transport Problems of Siberia and the Far East*, 2009, no. 1, pp. 232–234.