

УДК 621.311

Влияние длительности паузы ОАПВ на пропускную способность электропередачи по условию динамической устойчивости*

Т.Г. КРАСИЛЬНИКОВА¹, С.Г. ДЖОНОАЕВ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: taika552005@ya.ru

² 630005, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: jonoaev.87@mail.ru

В статье обсуждается проблема, связанная с авариями в воздушной линии (ВЛ) сверхвысокого напряжения (СВН) в связи с большой ее длиной. В линиях напряжением 500...1150 кВ подавляющая доля отключений (98 %) вызывается однофазными короткими замыканиями (ОКЗ). При этом значительная часть (70 %) однофазных коротких замыканий представляет неустойчивые дуговые аварии, которые могут быть успешно ликвидированы в цикле быстродействующего автоматического повторного включения (БАПВ) или однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Успешность ОАПВ при ликвидации ОКЗ, с одной стороны, определяется характеристикой вторичной дуги, а с другой стороны, эффективностью применяемых способов для снижения вторичных токов дуги и восстанавливаемых напряжений. Минимальная бестоковая пауза при БАПВ обычно принимается около 0,5 с, при ОАПВ она зависит от величины токов дуги подпитки и находится в пределах 0,5...3,0 с. Поэтому представляет интерес анализ характера динамических переходов при использовании БАПВ и ОАПВ различной продолжительности и оценка уровня пропускной способности дальних электропередач (ДЭП) СВН по условию динамической устойчивости. Особенности динамического перехода при определении аварии можно проследить с помощью угловых характеристик нормального режима, режима ОКЗ и АПВ. В статье показана высокая эффективность использования ОАПВ при ликвидации ОКЗ в одноцепной ВЛ напряжением 500 кВ, предложена зависимость пропускной способности электропередачи по условию сохранения динамической устойчивости от длительности паузы ОАПВ.

Ключевые слова: ликвидация ОКЗ, длительность паузы ОАПВ, динамическая устойчивость, пропускная способность ЭП, угловая характеристика, динамический переход, длительность ОКЗ, площадки ускорения и торможения

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-163-176

* Статья получена 30 марта 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

Возникающие на линии неустойчивые ОКЗ сопровождаются минимальными возмущениями на примыкающие системы, если они ликвидируются в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) [1–9]. В этом случае поврежденную фазу линии отключают с двух сторон, а затем через определенное время так называемую бестоковую паузу автоматически повторно включают.

Основной задачей, возникающей при применении ОАПВ, является установление требуемой для успешности его осуществления длительности бестоковой паузы в каждой конкретной проектируемой или эксплуатируемой воздушной линии сверхвысокого напряжения. Требования к длительности бестоковой паузы ОАПВ обусловлены тем, что после отключения аварийной фазы с двух сторон дуга в месте КЗ продолжает гореть, получая подпитку от неотключенных фаз линии, находящихся на относительно небольшом расстоянии от аварийной фазы. При использовании ОАПВ одной из основных задач является правильный выбор бестоковой паузы. Основной проблемой обеспечения надежного ОАПВ является сокращение времени горения дуги подпитки путем уменьшения тока подпитки и восстанавливающегося напряжения.

Эффективность ОАПВ может быть повышена в значительной мере, если фиксировать определенные факторы или параметры во время бестоковой паузы цикла ОАПВ и по их изменению определять состояние вторичной дуги. Длительность горения вторичной дуги зависит и от других факторов, например, от первичного тока ОКЗ, определяющего предельную длину дуги и степень ионизации ее канала, метеоусловий, влияющих на растягивание и охлаждение дуги, и других факторов, определяющих статистический характер времени горения дуги [4, 7, 9]. Преимуществом ОАПВ является то, что при отключении и включении аварийной фазы линии перенапряжения на ней не возникают, а при успешном повторном включении перенапряжения охватывают только одну эту фазу. При этом нет полного разрыва передачи, так как сохраняется передача мощности по неповрежденным фазам линии, что повышает динамическую устойчивость примыкающих систем.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Преобладающим видом аварий в ВЛ СВН являются однофазные КЗ (ОКЗ), доля которых превышает 98 % [10–12]. При этом значительная часть ОКЗ представляет неустойчивые дуговые аварии, которые могут быть успешно ликвидированы в цикле БАПВ или ОАПВ. В качестве расчетной схемы можно использовать классическую схему, представляющую станцию, работающую через линию на шины бесконечной мощности (рис. 1).



Рис. 1. Расчетная схема

Если минимальная бестоковая пауза при БАПВ обычно принимается порядка 0,5 с, то в случае ОАПВ она зависит от величины токов дуги подпитки

и находится в диапазоне 0,5...3,0 с. Поэтому представляют интерес анализ характера динамических переходов при использовании БАПВ и ОАПВ различной продолжительности и оценка уровня пропускной способности ДЭП СВН по условию динамической устойчивости.

Особенности динамического перехода при расчетной аварии можно проследить с помощью угловых характеристик нормального режима, режима ОКЗ, АПВ (БАПВ или ОАПВ) и послеаварийного режима [13].

$$P_v(\delta) = \operatorname{Re}(\bar{Y}_{11v} E_v^2 - \bar{Y}_{12v} E_v U e^{j\delta}), \quad (1)$$

где $\bar{Y}_{11v}, \bar{Y}_{12v}$ – сопряженные значения собственной и взаимной проводимостей схемы для v -го режима; E_v – ЭДС станции в v -м режиме; U – напряжение на ШБМ.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При анализе динамической устойчивости ОКЗ моделируется в схеме прямой последовательности шунтом, составленным из сопротивлений нулевой и обратной последовательности относительно места повреждения, в качестве которого обычно рассматривается начало линии.

Полезно отметить, что отношение максимумов угловых характеристик при ОКЗ и в нормальном режиме слабо зависит от параметров схемы, а именно от длины линии и сопротивления отправной системы (рис. 2). Поэтому при длинах более 200 км можно принимать

$$P_{\text{ОКЗ}}(\delta) = K_{\text{ОКЗ}} P_{\text{норм}}(\delta), \quad (2)$$

где $K_{\text{ОКЗ}}$ – коэффициент, изменяющийся в узких пределах, величина которого с приемлемой точностью может принята $K_{\text{ОКЗ}} = 0,64$.

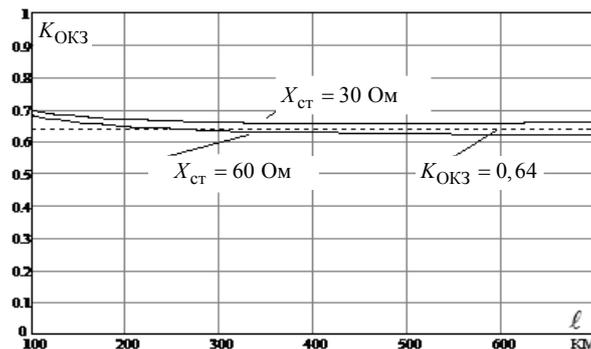


Рис. 2. Отношение максимумов угловых характеристик при ОКЗ в нормальном режиме в зависимости от параметров схемы

Угловая характеристика в паузу БАПВ вырождается в ноль, а в паузу ОАПВ в общем случае необходим учет разрыва фазы с двух концов линии (рис. 3).

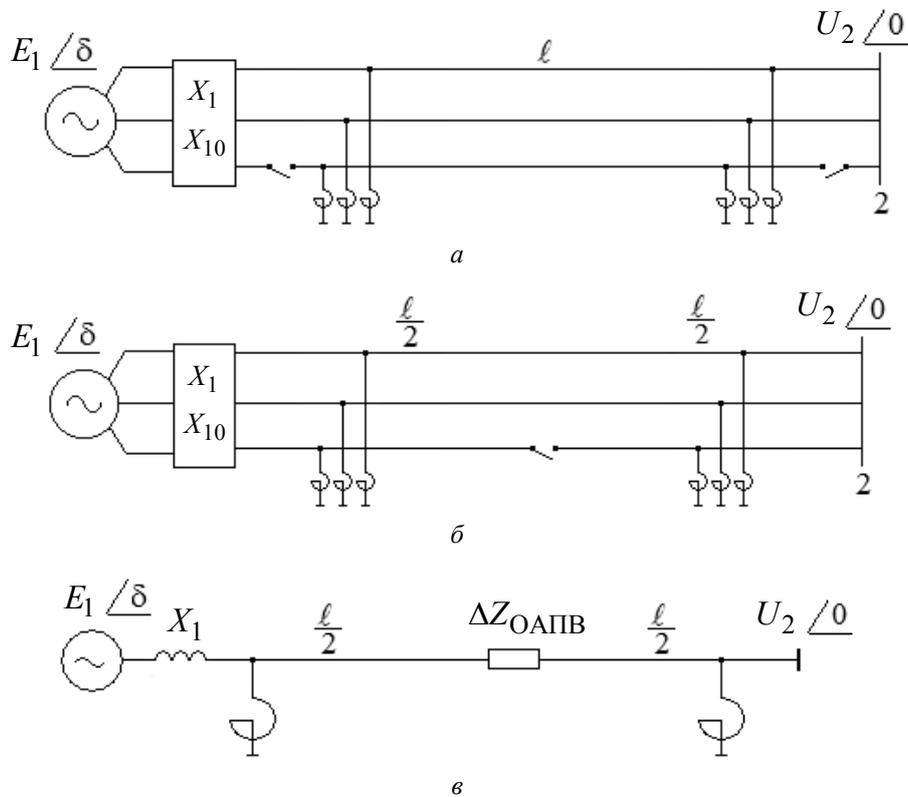


Рис. 3. Расчетная схема в паузу ОАПВ:

a – исходная схема; *б* – схема с разрывом в средней части линии; *в* – схема замещения прямой последовательности

Точный учет двух разрывов усложняет определение угловой характеристики. Однако достаточная точность может быть обеспечена заменой двух разрывов одним разрывом в средней части линии (рис. 3, б). Тогда пауза ОАПВ моделируется в схеме прямой последовательности дополнительным продольным сопротивлением (рис. 3, в). Величина этого сопротивления находится согласно соотношению

$$\Delta Z_{\text{ОАПВ}} = \frac{(Z_{m1} + Z_{m2})(Z_{m10} + Z_{m20})}{Z_{m1} + Z_{m2} + Z_{m10} + Z_{m20}}, \quad (3)$$

где Z_{m1} , Z_{m2} , Z_{m10} , Z_{m20} – входные сопротивления соответственно прямой и нулевой последовательностей слева и справа относительно разрыва в средней части линии.

Как и в случае ОКЗ, отношение максимумов угловых характеристик в паузу ОАПВ и в нормальном режиме слабо зависит от параметров схемы (рис. 4).

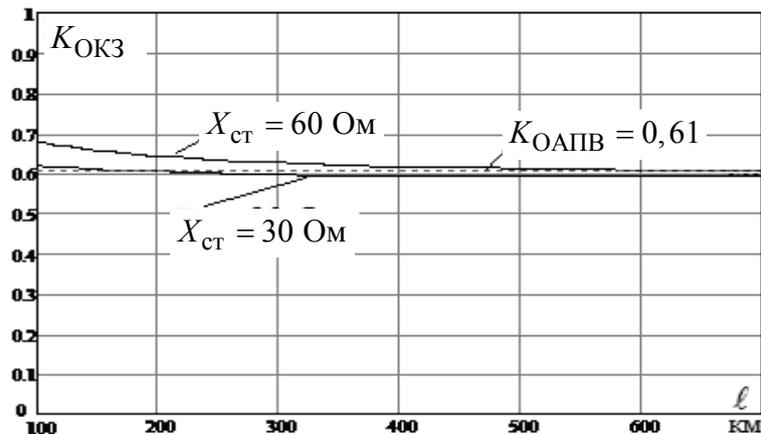


Рис. 4. Отношение максимумов угловых характеристик при ОАПВ в нормальном режиме в зависимости от параметров схемы

Поэтому, как и в случае ОКЗ, можно принять

$$P_{\text{ОАПВ}}(\delta) = K_{\text{ОАПВ}} P_{\text{норм}}(\delta), \quad (4)$$

где $K_{\text{ОАПВ}}$ – коэффициент, изменяющийся в очень узких пределах, величина которого может принята $K_{\text{ОАПВ}} = 0,61$.

Угловые характеристики позволяют проанализировать характер динамического перехода, используя метод площадей. Для определения изменения угла генераторов станции во времени требуется решение уравнения движения [14]

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{18\,000}{T_j S_{\text{ст}}} [P_T(t) - P_{\text{эм}}(\delta, t)], \quad (5)$$

где T_j – постоянная инерции станции; $S_{\text{ст}}$ – номинальная мощность станции; $P_T(t)$ – мощность на валу турбин, которая в общем случае меняется в процессе динамического перехода, например, за счет импульсной разгрузки турбин или отключения генераторов; $P_{\text{эм}}(\delta, t)$ – электромагнитная мощность на валу генераторов.

Электромагнитная мощность зависит от угла движения согласно угловым характеристикам, вид которых меняется в течение динамического перехода в зависимости от режима, что достаточно просто можно отразить с помощью функции Хевисайда $\Phi(t-t_1)$ [15], представляющей ступенчатую функцию (рис. 5), равную единице, если $t_1 \geq 0$, а иначе нулю.

Для фиксирования некоторой функции на интервале $t_1 \dots t_2$ удобно использовать функцию выделения

$$F(t, t_1, t_2) = \Phi(t-t_1) - \Phi(t-t_2),$$

которая представляет импульсную функцию, равную единице, если $t_1 \leq t \leq t_2$, а иначе нулю (рис. 6).

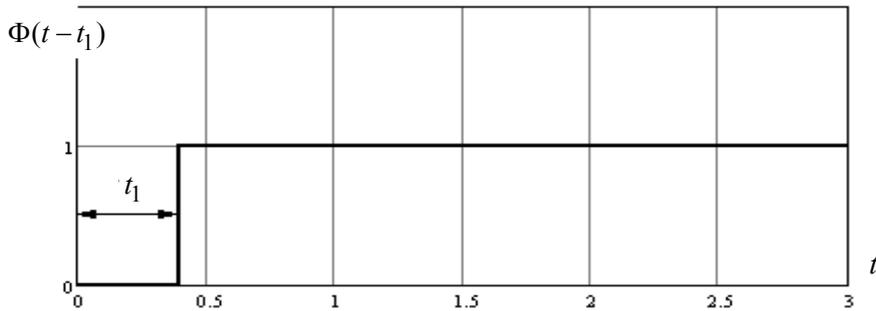


Рис. 5. Функция Хевисайда

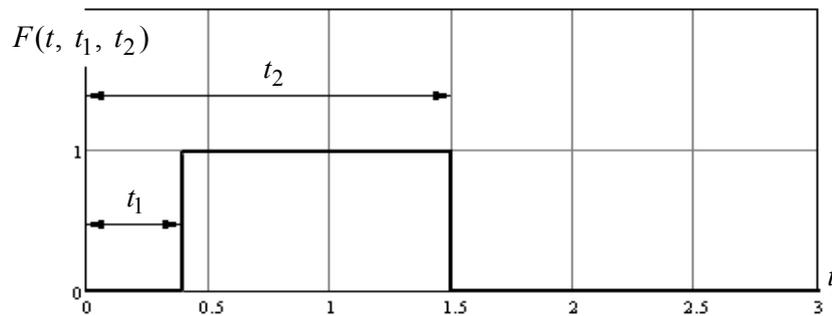


Рис. 6. Функция выделения

На рис. 7 приведены функции выделения угловых характеристик в процессе динамического перехода.

Таким образом, электромагнитная мощность, зависящая от угла движения согласно угловым характеристикам, вид которых меняется в течение динамического перехода в зависимости от режима, достаточно просто отражается с помощью функций выделения (на последнем этапе функция выделения совпадает с функцией Хевисайда):

$$P_{эм}(\delta, t) = F(t, 0, t_{ОКЗ})P_{ОКЗ}(\delta) + F(t, t_{ОКЗ}, t_{АПВ})P_{АПВ}(\delta) + \Phi(t - t_{АПВ})P_{n/a}(\delta), \quad (6)$$

где $P_{ОКЗ}(\delta)$, $P_{АПВ}(\delta)$, $P_{n/a}(\delta)$ – угловые характеристики соответственно в режимах ОКЗ, АПВ (БАПВ или ОАПВ) и послеаварийном режиме.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Сопоставим эффективность использования БАПВ и ОАПВ при ликвидации ОКЗ в одноцепной ВЛ напряжением 500 кВ. Анализ проведем применительно к схеме, в которой при передаче 1000 МВт удовлетворяются требования по статической устойчивости (коэффициент запаса составляет 0,25).

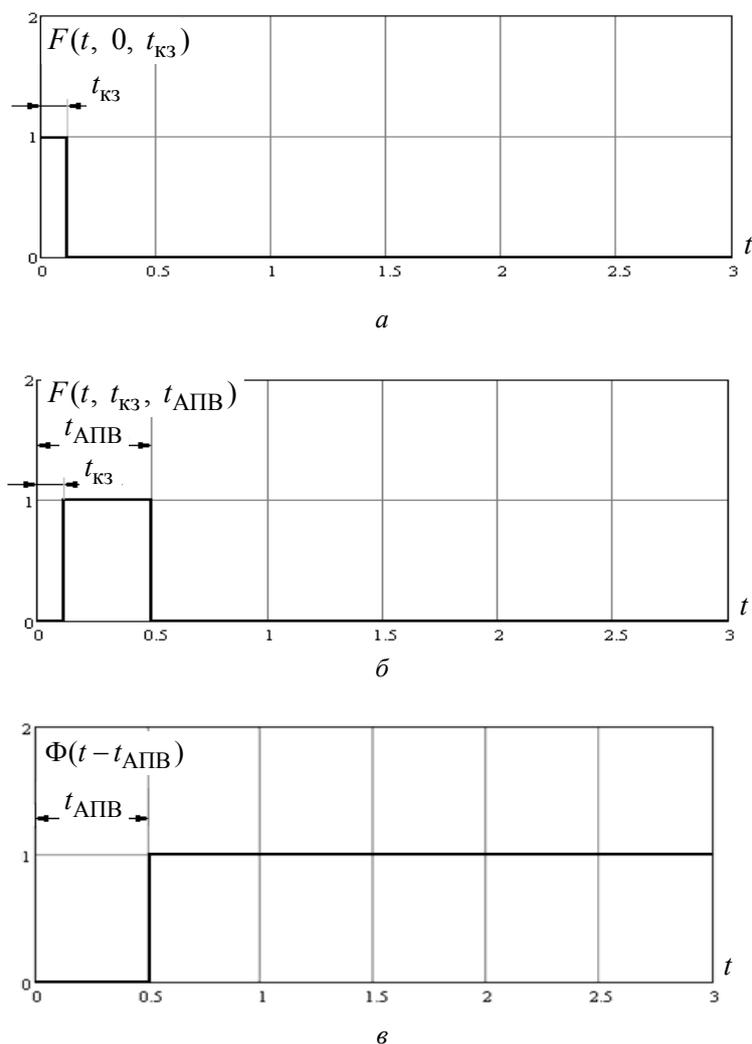


Рис. 7. Функции выделения угловых характеристик:
 а – режим КЗ; б – режим АПВ; в – послеаварийный режим

Использование БАПВ. Как показывает анализ, в случае передачи такой мощности динамическая устойчивость нарушается, т. е. ограничивающим фактором на пропускную способность ЭП является динамика. Таким образом, по условию динамики требуется снижение максимальной передаваемой мощности в нормальном режиме, т. е. пропускной способности ЭП, так чтобы при ликвидации аварии сохранялась динамическая устойчивость. Решение уравнения движения генератора (5) при длительности ОКЗ 0,1 с и паузы БАПВ 0,5 с показало, что динамическая устойчивость сохраняется лишь при передаче мощности не более 420 МВт (рис. 8). Отклонение угла к концу паузы БАПВ, когда происходит переход на угловую характеристику послеаварийного режима, составляет $\delta_{БАПВ} = 98^\circ$.

Условие сохранения динамической устойчивости иллюстрируется с использованием угловых характеристик на рис. 9, где показано равенство площадоk ускорения и торможения.

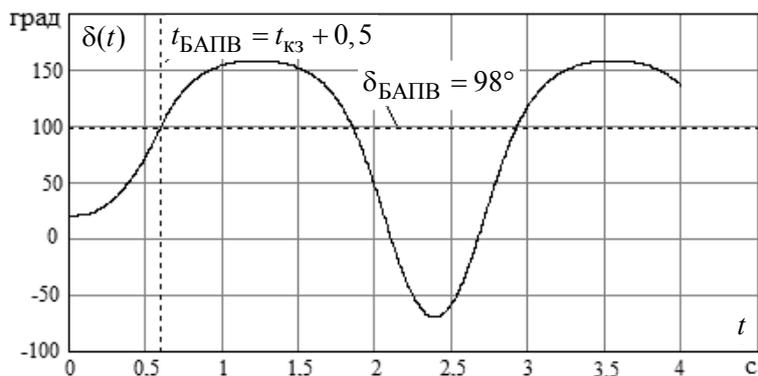


Рис. 8. Изменение угла в процессе динамического перехода

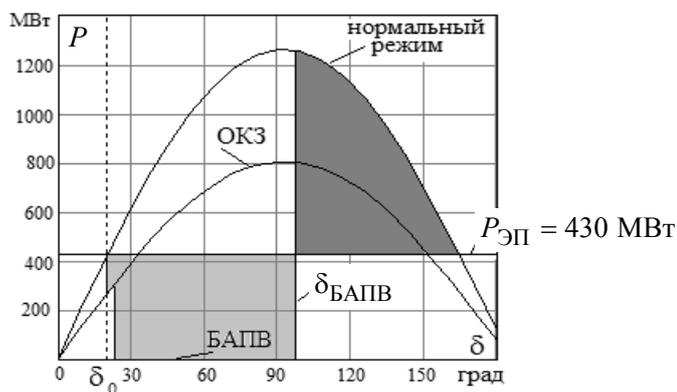


Рис. 9. Угловые характеристики и площадки ускорения и торможения при использовании БАПВ

Использование ОАПВ. Решение уравнения (5) при длительности ОКЗ 0,1 с и пауз ОАПВ 0,5; 1,0 и 2,0 с показано на рис. 10.

Характерные параметры динамического перехода при ОАПВ

Длительность паузы ОАПВ, с	Пропускная способность, МВт	Отклонение угла к концу паузы ОАПВ, град
0,5	863	100
1,0	724	126
2,0	679	135

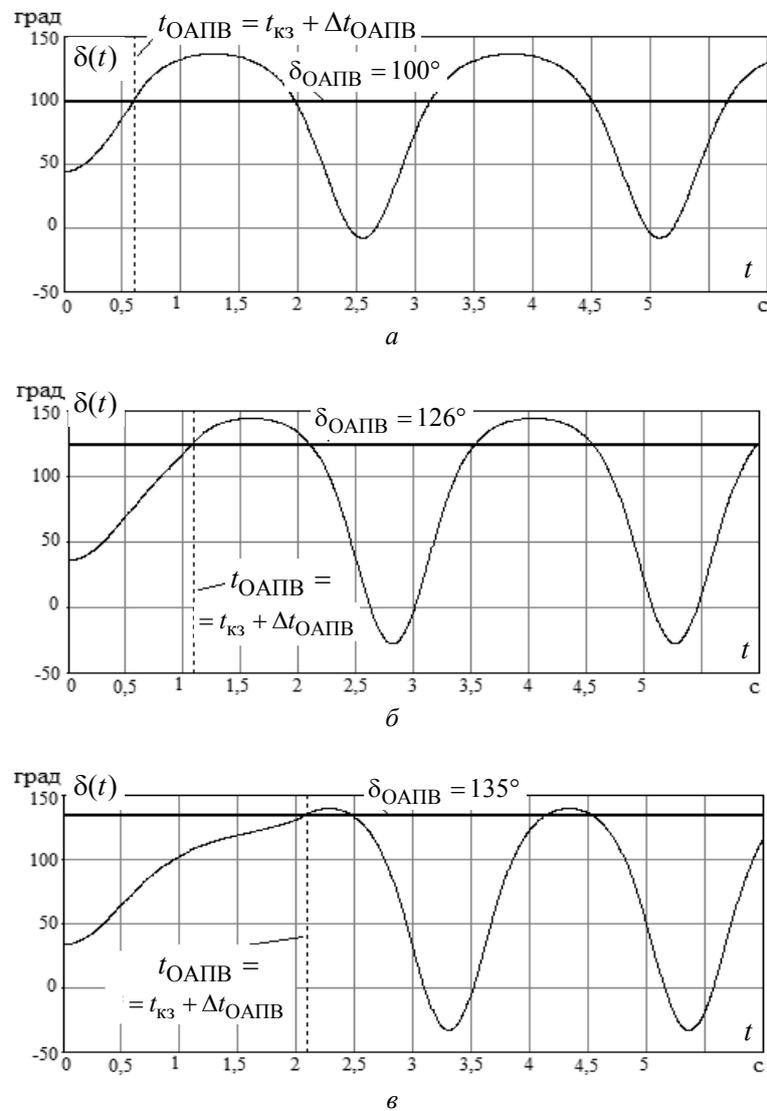


Рис. 10. Изменение угла в процессе динамического перехода:

$$а - \Delta t_{\text{ОАПВ}} = 0,5 \text{ с}; \quad б - \Delta t_{\text{ОАПВ}} = 1,0 \text{ с}; \quad в - \Delta t_{\text{ОАПВ}} = 2,0 \text{ с}$$

Условия сохранения динамической устойчивости при различных паузах ОАПВ иллюстрируются с использованием угловых характеристик на рис. 11, где показано равенство соответствующих площадок ускорения и торможения.

Используя угловые характеристики на рис. 12, найдем пропускную способность электропередачи, при которой длительность паузы ОАПВ по условию динамики может быть сколь угодно большой.

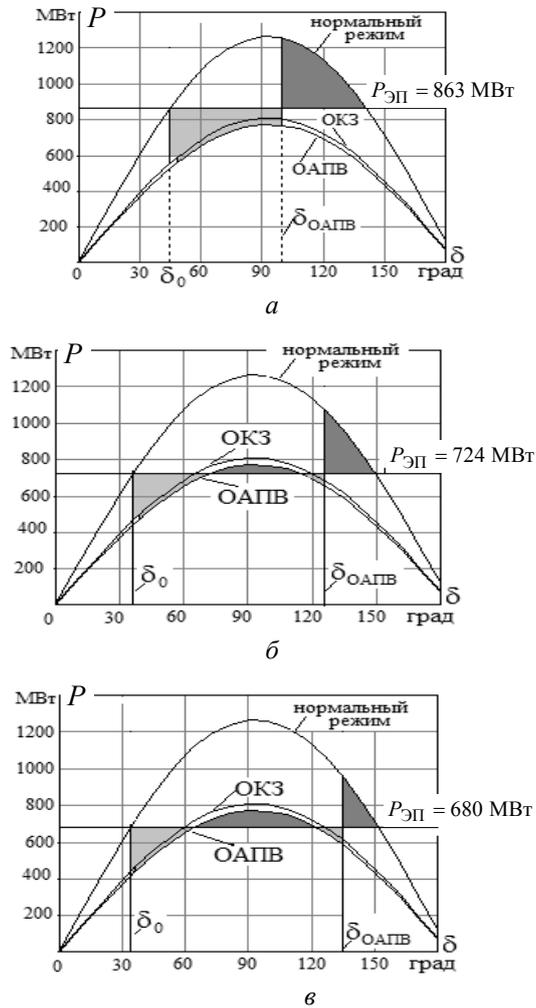


Рис. 11. Угловые характеристики и площадки ускорения и торможения при использовании ОАПВ:

а – $\Delta t_{\text{ОАПВ}} = 0,5 \text{ с}$; б – $\Delta t_{\text{ОАПВ}} = 1,0 \text{ с}$; в – $\Delta t_{\text{ОАПВ}} = 2,0 \text{ с}$

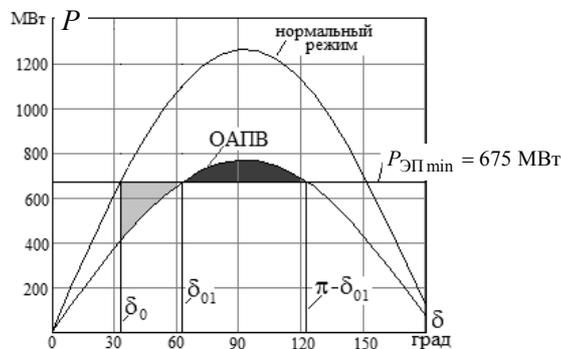


Рис. 12. Определение пропускной способности при неограниченной паузе ОАПВ

Такая пропускная способность находится из условия равенства площадей ускорения и торможения в режиме ОАПВ (угловая характеристика при ОКЗ мало отличается от угловой характеристики при ОАПВ, и поэтому их можно принять совпадающими)

$$\int_{\delta_0}^{\pi - \delta_{o1}} (P_{\text{ЭП min}} - P_{\text{ОАПВ max}} \sin \delta) d\delta = 0. \quad (7)$$

После преобразований получим следующее уравнение для определения минимальной пропускной способности, которая может быть обеспечена при неограниченной паузе ОАПВ

$$P_{\text{ЭП min}} \left(\pi - \arcsin \frac{P_{\text{ЭП min}}}{P_{\text{н max}}} - \arcsin \frac{P_{\text{ЭП min}}}{P_{\text{ОАПВ max}}} \right) - \frac{P_{\text{ОАПВ max}}}{P_{\text{н max}}} \sqrt{P_{\text{н max}}^2 - P_{\text{ЭП min}}^2} - \sqrt{P_{\text{ОАПВ max}}^2 - P_{\text{ЭП min}}^2} = 0. \quad (8)$$

Решение этого уравнения при принятых данных дает $P_{\text{ЭП min}} = 675 \text{ МВт}$.

Теперь может быть построена зависимость пропускной способности электропередачи по условию сохранения динамической устойчивости от длительности паузы ОАПВ (рис. 13). На рис. 13 также показана величина пропускной способности электропередачи по условию динамики при использовании БАПВ с длительностью паузы 0,5 с.

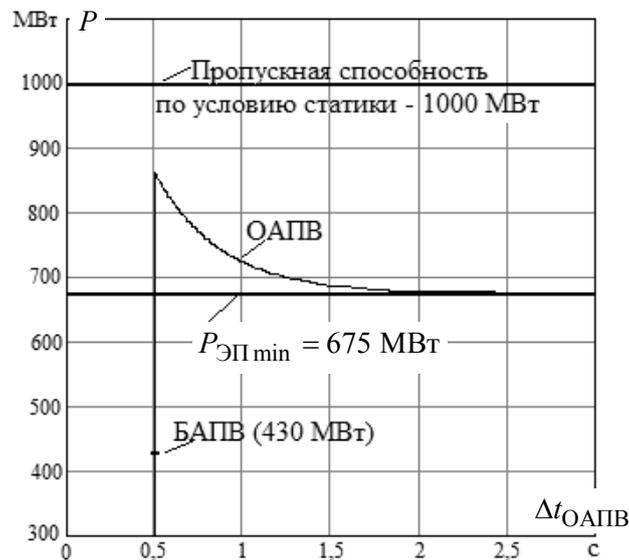


Рис. 13. Зависимость пропускной способности электропередачи по условию динамической устойчивости от длительности паузы ОАПВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование ОАПВ в сравнении с БАПВ позволяет повысить пропускную способность дальней электропередачи по условию динамической устойчивости в полтора-два раза. Наибольший эффект дает применение ОАПВ, если длительность паузы ОАПВ находится в диапазоне 0,5...1,0 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kimbark W.* Suppression of ground-fault arcs on single-pole switched EHV lines by shunt reactors // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. – 1964. – Vol. 83. – P. 285–290.
2. *Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г.* Способы ликвидации однофазных коротких замыканий в воздушных линиях сверхвысокого напряжения // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (84). – С. 116–130.
3. *Штолянский О.Г.* Параметры сближенных линий 750 кВ и характеристики их входного сопротивления в паузе однофазного автоматического повторного включения // Труды Института электродинамики НАН Украины. – 2015. – № 40. – С. 39–43.
4. *Рашикес В.С.* Обобщение эксплуатационных данных эффективности ОАПВ ВЛ СВН и опытных данных времени гашения дуги подпитки // Электрические станции. – 1989. – № 3. – С. 65–72.
5. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / под ред. М.Л. Левинштейна. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
6. *Альмендеева Е.В.* Особенности выбора параметров срабатывания ОАПВ на примере МП терминала производства «ЭКРА» // Электроэнергетика глазами молодежи: труды 6 международной молодежной научно-технической конференции, Иваново, 9–13 ноября 2015 г.: в 2 т. – Иваново, 2015. – Т. 1. – С. 39–42.
7. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1993. – 560 с.
8. *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.
9. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России: теоретические и практические основы. В 3 т. Т. 1 / под общ. ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергопрогресс, 2012. – 696 с.
10. *Зеличенко А.С., Смирнов Б.И.* Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 336 с.
11. *Барг И.Г., Эдельман В.И.* Воздушные линии электропередачи: вопросы эксплуатации и надежности. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
12. 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.
13. Режимы дальних электропередач в примерах / Г.К. Зарудский, Е.В. Путятин, И.С. Рокотян и др.; под ред. Ю.П. Рыжова. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 88 с.
14. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
15. *Левинштейн М.Л.* Операционное исчисление в задачах электротехники. – Изд. 2-е, доп. – Л.: Энергия, 1972. – 360 с.

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 более 50 публикаций. E-mail: tatka552005@ya.ru

Джононаев Сайёд Гулмуродович, аспирант второго года обучения кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – способы ликвидации повреждений в ВЛ СВН. Имеет 3 публикаций. E-mail: jononaev.87@mail.ru

The effect of Single-Phase Auto-Reclosing pause duration on the power transmission throughput under dynamic stability*

T.G. KRASIL'NIKOVA¹, S.G. JONONAEV²

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

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

This article discusses the problem of accidents in the ultra high voltage (UHV) aerial line (AL) due to its great length. In 500-1150 kV lines the overwhelming proportion of trips (98%) is caused by single-phase short circuits (SPSC). A substantial portion (70%) of single-phase short circuits is erratic arc accidents which can be successfully eliminated by high-speed auto-reclosing (HSAR) or single-phase auto-reclosing (SPAR). An efficiency of single-phase auto-reclosing (SPAR) in eliminating erratic arc accidents by single-phase short circuits (SPSC), on the one hand, is determined by the characteristics of the secondary arc current, and on the other hand by the effectiveness of ways to reduce secondary arc currents and recovery voltages. A minimum dead time in HSAR is usually 0.5 s. while in SPAR it depends on the value of the arc inflow currents and is in the range of 0.5-3.0 s. Therefore, it is of interest to analyze the nature of dynamic transitions when using HSAR and SPAR of various lengths and to assess the level of long power transmission (LPT) and ultra high voltage (UHV) throughput under conditions of dynamic stability. The dynamic transition features in revealing an accident can be traced using angular characteristics of the normal mode, the SPSC and auto-reclosing (AR) modes. The article shows a high efficiency of single-phase auto reclosing (SPAR) when eliminating SPSC in a single-circuit 500 kV line. Also, the dependence of the transmission throughput on the length of the SPAR pause under maintaining dynamic stability is revealed.

Keywords: elimination by single-phase short circuit (SPSC), length of single-phase auto-reclosing (SPAR) pause, dynamic stability, transmission throughput, power-angle curve, dynamic transition, single-phase short circuit (SPSC) duration, acceleration and slowdown area

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-163-176

REFERENCES

1. Kimbark W. Suppression of ground-fault arcs on single-pole switched EHV lines by shunt reactors. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 1964, vol. 83, pp. 285–290.
2. Krasil'nikova T.G., Dzhononae S.G. Sposoby likvidatsii odnofaznykh korotkikh замыканий v vozdushnykh liniyakh sverkhvysokogo napryazheniya [The methods of liquidation single-phase short circuit in the aerial lines of extra-high voltage]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (84), pp. 116–130.
3. Shpolianskyi O.G. Parametry sblizhennykh linii 750 kv i kharakteristiki ikh vkhodnogo so-protivleniya v pauze odnofaznogo avtomaticheskogo povtornogo vklyucheniya [Parameters of 750 kV coupled overhead transmission lines and characteristics of their input impedance during the pause of one phase automated repeated switching]. *Trudy Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy* –

* Received 30 March 2017.

Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2015, no. 40, pp. 39–43.

4. 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. (In Russian).

5. Levinshtein M.L., ed. *Protsessy pri odnofaznom avtomaticheskome povtornom vklyuchenii linii vysokikh napryazhenii* [The processes of high voltage lines at single-phase auto-reclosing]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 256 p.

6. Al'mendeeva E.V. [The features choice of parameters response Single-Phase Auto-Reclosing for example of the MP terminal production "EKRA"]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy 6 mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii: v 2 t.* [The electric power industry through the impression of youth: the proceedings of the 6 international scientific-technical conference: in 2 vol.], Ivanovo, 9–13 November 2015, vol. 1, pp. 39–42. (In Russian).

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

8. 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 – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2009, no. 1, pp. 313–316.

9. D'yakov A.F., ed. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii: teoreticheskie i prakticheskie osnovy. V 3 t. T. 1* [The electric networks of super- and ultra-high voltage UES of Russia: theoretical and practical basis. In 3 vol. Vol. 1]. Moscow, Energoprogress Publ., 2012. 696 p.

10. Zelichenko A.S., Smirnov B.I. *Proektirovanie mekhanicheskoi chasti vozdukhnykh linii sverkhvysokogo napryazheniya* [The planning of mechanical part of overhead lines of extra high voltage]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 336 p.

11. Barg I.G., Edel'man V.I. *Vozdushnye linii elektroperedachi: voprosy ekspluatatsii i nadezhnosti* [The overhead transmission lines: Issues of operation and reliability]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p.

12. Belyakov N.N., Rashkes V.S., Levinshtein M.L., Khoroshev M.I. Perspektivy primeneniya OAPV v elektroperedache 1150 kV [The prospects of application of the Single-Phase Auto-Reclosing in power transmission 1150 kV]. *Elektroperedachi 1150 kV* [1150 kV transmission]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, bk. 1, pp. 129–158.

13. Ryzhov Iu.P., ed. *Rezhimy dal'nikh elektroperedach v primerakh* [The modes of long-distance transmission in the examples]. Moscow, MPEI Publ., 1994. 88 p.

14. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [The transient electromechanical processes in electrical systems]. 4th ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.

15. Levinshtein M.L. Operatsionnoe ischislenie v zadachakh elektrotehniki [The operational calculus in electrical engineering problems]. Leningrad, Energiya Publ., 1972. 360 p.