

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Колесников Геннадий Юрьевич,

Ставропольский государственный аграрный университет,
Ставрополь, Российская Федерация, kolesnikovkmvi@yandex.ru

Аннотация. На основе анализа экспериментальных исследований переходных режимов построенной модели протяженной воздушной линии электропередач 500 кВ с помощью программно-аппаратного комплекса ПАК RSCAD был определен временной промежуток гашения дуги после отключения режима короткого замыкания, которая составляет не менее 200 мс. После этого времени можно считать, что дуга, характерная для колебаний собственной частоты воздушной линии в режиме паузы повторного включения, погашена.

Определение факта устранения короткого замыкания в отключенной фазе возможно по величине наводимого напряжения, которое возникает от емкостных связей на провод со стороны двух фаз под напряжением. Наводимое напряжение должно иметь величину, характерную для успешного однофазного автоматического повторного включения.

Ключевые слова: автоматическое повторное включение, деионизация, наведённое напряжение линии, самоустранение замыкания, восстановление напряжения

IMPROVING THE EFFICIENCY OF AUTOMATIC RE-ACTIVATION SYSTEMS ON ULTRAHIGH VOLTAGE POWER LINES

Kolesnikov Gennady Yuryevich,

Stavropol State Agrarian University,
Stavropol, Russian Federation, E-mail: kolesnikovkmvi@yandex.ru

Abstract. Based on the analysis of experimental studies of transient modes of the constructed model of an extended 500 kV overhead power line using the RSCAD software and hardware package, the time interval of arc extinguishing after switching off the short circuit mode was determined, which is at least 200 ms. After this time, it can be assumed that the arc characteristic of fluctuations in the natural frequency of the overhead line in pause mode re-enabling, extinguished.

The determination of the fact of eliminating a short circuit in the disconnected phase is possible by the magnitude of the induced voltage, which arises from capacitive connections to the wire from the two phases under voltage. The induced voltage must have a value characteristic of a successful single-phase automatic re-activation.

Keywords: automatic re-activation, deionization, induced line voltage, self-closing, voltage recovery

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть коротких замыканий на воздушных линиях напряжением 330–750 кВ являются однофазными, поэтому на таких линиях в большинстве случаев используется однофазное автоматическое повторное включение (ОАПВ) после срабатывания релейной защиты, при этом трехфазное повторное включение (ТАПВ) применяется при многофазных повреждениях или неуспешном однофазном АПВ. Срабатывание однофазного АПВ не позволяет гарантированно восстановить питание отключенной фазы. Это может

происходить из-за горения электрической дуги, которая, получая подпитку от соседних неотключенных фаз воздушной линии, не завершает процесс самопогасания. Среди внешних факторов, влияющих на процесс успешного однофазного АПВ, можно выделить малый ток подпитки, отсутствие повторных коротких замыканий, атмосферных явлений в виде ветра и тумана [1, 2].

Напряжение на отключенной фазе при срабатывании однофазного повторного включения в режиме наводки зависит, в основном, от продольной ЭДС, наводимой токами от неповрежденных фаз, которые зависят от угла передачи мощности

δ и расстояния до места короткого замыкания. После устранения короткого замыкания аварийная фаза подвергается влиянию через емкостные связи со стороны двух оставшихся в работе фаз. Это приводит к появлению наводимого напряжения на отключённой фазе [6–8].

Достаточно полная, с минимумом допущений, несложная математическая модель линий электропередач для моделирования и анализа процессов была реализована с помощью ма-

тричных многополюсников, в основе которых лежат уравнения длинной линии [3–5].

В то же время наводимое напряжение подпитки после гашения дуги в поперечно компенсированной электропередаче в случае резонансных параметров ЛЭП достигнет фазных значений напряжения (рисунок 1). Большая разность напряжений позволяет упростить алгоритм выявления самоустранения короткого замыкания [9–11, 16].

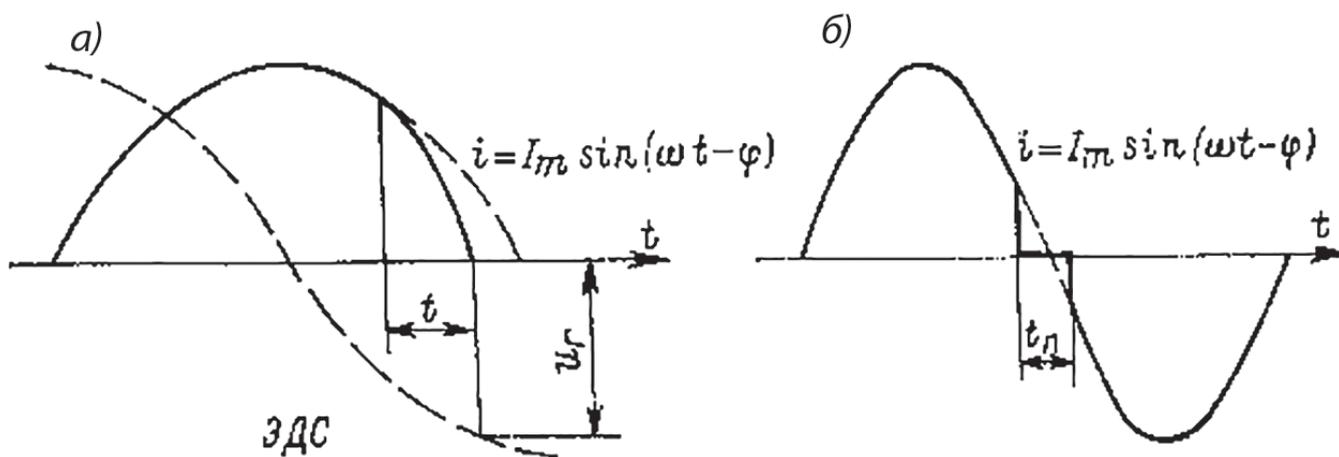


Рисунок 1 – Самоустранение замыкания по фазе напряжения:

а) график без погасания дуги из-за наводимого напряжения подпитки; б) график с условиями погасания дуги во время перехода напряжения через нулевое значение

Анализ стационарных и переходных режимов в паузе однофазного автоматического повторного включения позволяет выделить цель, которая состоит в определении факта самоустранения замыкания для успешного однофазного АПВ.

Для достижения цели необходимо выделить следующие задачи:

- определение факта устранения короткого замыкания по величине наводимого напряжения в поврежденной фазе, характерной для успешного однофазного автоматического повторного включения;
- определение временного промежутка характерных колебаний собственной частоты воздушной линии в режиме паузы повторного включения, достаточного для гашения дуги.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Повысить эффективность адаптивного однофазного повторного включения можно, контролируя значение наведенного напряжения в режимах горения и погасания дуги. Моделирование режимов проводилось в виде модели электроэнергетического объекта на примере реальной

воздушной линии электропередач с номинальным напряжением 500 кВ с шунтирующими реакторами при общей длине линии 430 км. Создание параметров воздушной линии с коротким замыканием на одной фазе и контроль работы однофазного АПВ производились с помощью программно-аппаратного комплекса ПАК RSCAD. Также программное обеспечение позволяло определять значения времени гашения дуги и последующие параметры модели линии.

По мере поступления измерительных данных в систему АОАПВ на скользящем временном отрезке (во временном окне), равном периоду промышленной частоты, непрерывно вычисляют среднее значение напряжения (U_{cp}) на отключённом проводе. Вычисление напряжений U_k и U_{cp} выполняют посредством применения прямого дискретного преобразования Фурье [12].

При этом, если после отключения линии короткое замыкание сохраняется в конце длинных линий, продольная ЭДС становится соизмеримой с напряжением наводки (U_δ), на фазе без замыкания основное влияние оказывает электростатическая составляющая [13, 14]. После самоустранения аварии емкости представляют собой делитель напряжения, зависящий, в основном, от степени компенсации рабочей емкости линии (рисунок 2).

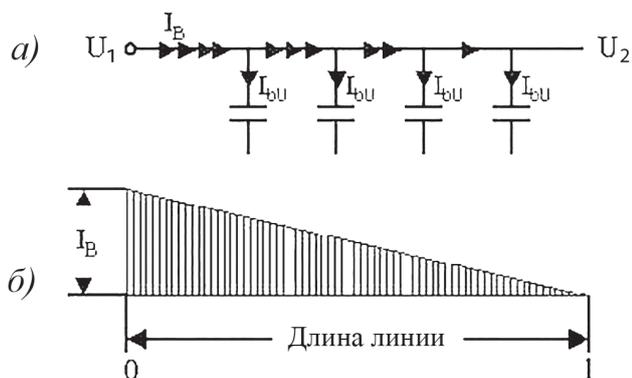


Рисунок 2 – Емкости линии электропередач, представляющие делители напряжения:
 а) схема замещения линии электропередач;
 б) график изменения величины напряжения наводки вдоль линии электропередач

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Переходные процессы, сопровождающие отключение аварийной фазы, горение дуги подпитывающим напряжением, погасание дуги, последующее введение отключенной фазы в работу

накладывают свои ограничения на порядок осуществления контроля за погасанием дуги. При моделировании переходных процессов коротких замыканий, параметров синусоиды при горении и затухании электрической дуги, а также снижения напряжения подпитки была применена встроенная в ПАК RSCAD модель протяженной линии.

Работу линии электропередач при адаптивном однофазном повторном включении можно разбить на несколько характерных зон (рисунок 3):

- 1) нормальный режим линии передачи электроэнергии;
- 2) возникает короткое замыкание с горением дуги на поврежденной фазе;
- 3) отключение линейных выключателей нагрузки, горение дуги подпитки на фазе;
- 4) погасание дуги подпитки и появление напряжения наводки;
- 5) определение автоматикой факта самореставрации повреждения, включение выключателей, возникновение коммутационных перенапряжений и восстановление нормального режима работы.

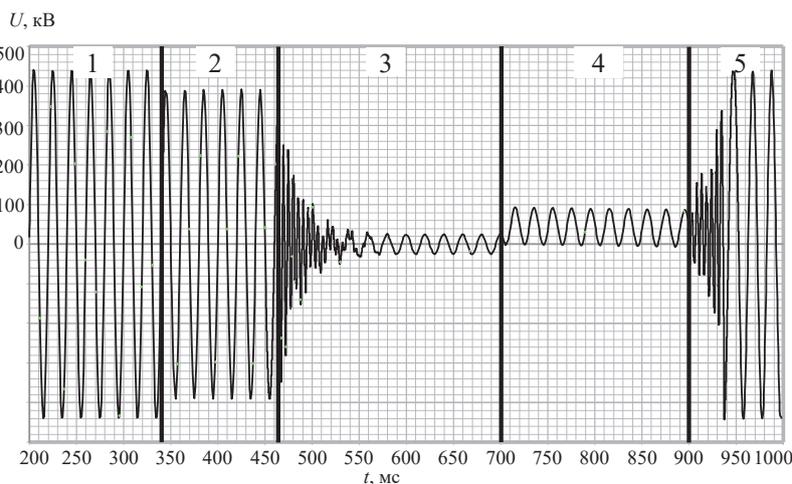


Рисунок 3 – Осциллограмма работы автоматического повторного включения линии электропередач

После гашения, согласно источнику [1], дуги от наведенного напряжения на отключенной фазе происходит процесс восстановления диэлектрической прочности дугового промежутка. Этот процесс характеризуется колебаниями с собственной частотой воздушной линии в режиме паузы повторного включения и вынужденными колебаниями про-

мышленной частоты. Процесс колебания с вполне достаточной точностью может рассматриваться как процесс, зависящий, в основном, от степени компенсации рабочей емкости линии [15, 16].

Характер возникновения импульса в бестоковую паузу представлен на рисунке 4, где видно создание импульса и снижение его до нуля через 0,169 с.

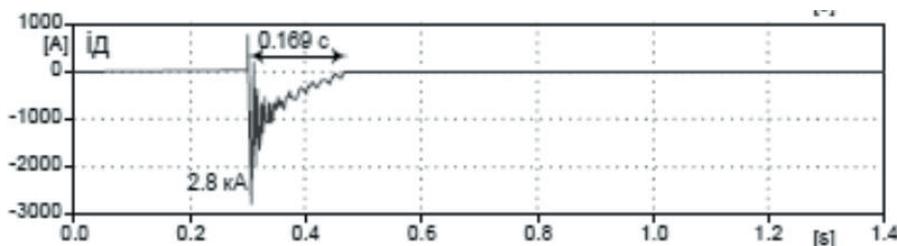


Рисунок 4 – Осциллограмма возникновения импульса на фазе с коротким замыканием

В линиях электропередач факт погасания дуги устанавливается на основе значения напряжения аварийной фазы в режиме восстановления по отношению к значению напряжения в режиме горения дуги (1).

$$U_H = E \cdot \exp(-TAPB / \tau) \quad (1)$$

При определении факта устранения короткого замыкания и возможности успешного автоматического повторного включения, проводя анализ Фурье (т. е. перейдя из временного пространства в частотное [7]), можно выделить собственную частоту колебаний наводимого напряжения. В паузе однофазного автоматического повторного включения после снятия питания с поврежденного проводника производится анализ в данном проводе. Возникновение частоты, отличной от промышленной, свидетельствует о гашении дуги подпитки. Анализ Фурье проводится с интервалом 300 мс после отключения линейных выключателей нагрузки. Команду на повторное включение для повышения надежности электроснабжения рекомендуется подавать после повторного выделения свободной частоты (рисунок 3 участок 4) [8, 9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основе анализа экспериментальных исследований переходных режимов построенной модели протяженной воздушной линии электропередач с помощью программно-аппаратного комплекса ПАК RSCAD был определен временной промежуток после отключения режима короткого замыкания в пределах бестоковой паузы до повторного включения, которая составляет не менее 200 мс, согласно рисунку 4. На котором видно возрастание импульса и через 169 мс снижение его до нуля. После этого времени можно считать, что дуга, характерная для колебаний собственной частоты воздушной линии в режиме паузы повторного включения, погашена.

Определение факта устранения короткого замыкания в отключенной фазе возможно по величине наводимого напряжения, которое возникает от емкостных связей на провод со стороны двух фаз под напряжением. Наводимое напряжение имеет величину, характерную для успешного однофазного автоматического повторного включения (рисунок 3).

Все описанные способы могут быть реализованы в одном устройстве и вводиться в работу независимо от реальной степени компенсации рабочей емкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титов, И. Т. Учёт влияния открытой электрической дуги на параметры срабатывания дистанционной защиты / И. Т. Титов, А. В. Бычков, Н. А. Дони // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2020. – № 2 (129) – С. 85–93.
2. Ширковец, А. И. Факторы снижения электрической прочности кабельной изоляции из сшитого полиэтилена и причины ее повреждения в эксплуатации / А. И. Ширковец, А. Г. Лиске // Промышленная энергетика. – 2015. – № 11.
3. Prospects for Further Improvement of Filter-Compensating Devices for Agro-Industrial Complex Consumers / A. T. Rostova, E. V. Lubentsova, G. V. Masyutina, A. A. Shunina, G. Y. Kolesnikov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 852. – 012098.
4. Волохов, Н. А. Исследование влияния на работу устройств АЛАР возмущений, возникающих после начала асинхронного режима / Н. А. Волохов // Электроэнергетика глазами молодежи–2019 : материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, Иркутск, 16–20 сентября 2019 г. – Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 243–246.
5. Дмитриев, М. В. АПВ на воздушно-кабельных линиях класса 110–500 кВ / М. В. Дмитриев // Электроэнергия: передача и распределение. – 2015. – № 1. – С. 68–73.
6. Ильин, Д. В. Повышение надёжности определения факта погасания дуги в цикле ОАПВ / Д. В. Ильин, А. В. Бычков, Н. А. Дони // Энергетик. – 2019. – № 11. – С. 9–13.
7. Кошелько, С. П. Адаптивное ОАПВ на основе алгоритма обработки параметров переходного процесса / С. П. Кошелько, В. Е. Качесов // Электроэнергетика глазами молодежи : 4-я Международ. науч.-техн. конф., Новочеркасск, 14–18 окт. 2013 г. : науч. тр. – Новочеркасск : Лик, 2014. – Т. 2. – С. 91–95.
8. Колобанов, П. А. Повышение точности одностороннего определения места повреждения в электрической сети произвольной конфигурации / П. А. Колобанов, А. Л. Куликов, М. Д. Обалин // Электричество. – 2019. – № 4. – С. 19–31.

9. Krause, Ch. Building Reliable AC and DC UHV Power Transformers-Dielectric Design Principles, Suitable Pressboard Insulation and Issues Related to HVDC Testing / Ch. Krause, U. Piovan, D. Tschudi // Proceedings of International Conference on UHV Transmission. – Beijing, China, 2009. – P. 28–34.
10. Transient Electromagnetic-Thermal FE-Model of a SPICE-Coupled Transformer Including Eddy Currents with COMSOL Multiphysics / H. Neubert, T. Bödrich, R. Disselnkötter // Excerpt from the proceedings of the 2011 COMSOL conference in Stuttgart. – Stuttgart, 2011.
11. Development and results of a worldwide transformer reliability survey / S. Tenbohlen, J. Jagers, G. Bastos et al. // In Proceedings of the CIGRE SC A2 Colloquium, Shanghai, China, 20–25 September 2015.
12. Базавлук, А. А. Результаты исследований переходных процессов при коммутациях вакуумных выключателей / А. А. Базавлук, Л. И. Сарин, И. Е. Наумкин // Энергетик. – 2011. – № 10. – С. 27–32.
13. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.: ил. 6.
14. Патент РФ № 2695890 С1. Способ включения трехфазной линии электропередачи / Александр Ильич Левиуш, Валерий Михайлович Стрелков, Герман Георгиевич Фокин, Николай Анатольевич Дони, Алексей Александрович Шурупов. – Опубл. 2009-06-10. Бюл. № 22.
15. Кадомская, К. П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них : учебник / К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. А. Рейхердт. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.
16. Стандарт организации. Методические указания по технико-экономическому обоснованию электросетевых объектов. [Электронный ресурс]: СТО 56947007- 29.240.01.271. – Введ. 2019 – 07 – 24. – ПАО «ФСК ЕЭС», 2019. – 33 с.

REFERENCES

1. Titov, I. T. Taking into account the influence of an open electric arc on the parameters of remote protection operation / I. T. Titov, A. V. Bychkov, N. A. Doni // Proceedings of the R. E. Alekseev NSTU. – 2020. – № 2 (129) – P. 85–93.
2. Shirkovets, A. I. Factors of reducing the electrical strength of cable insulation made of cross-linked polyethylene and the causes of its damage in operation / A. I. Shirkovets, A. G. Liske // Industrial power engineering. – 2015. – № 11.
3. Prospects for Further Improvement of Filter-Compensating Devices for Agro-Industrial Complex Consumers / A. T. Rostova, E. V. Lubentsova, G. V. Masyutina, A. A. Shunina, G. Y. Kolesnikov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 852. – 012098.
4. Volokhov, N. A. Investigation of the influence of disturbances arising after the start of asynchronous mode on the operation of ALAR devices / N. A. Volokhov // Electric power industry through the eyes of youth – 2019: materials of the jubilee X International Scientific and Technical Conference, Irkutsk, September 16–20, 2019. – Irkutsk : Irkutsk National Research Technical University, 2019. – P. 243–246.
5. Ilyin, D. V. Improving the reliability of determining the fact of arc extinction in the OAPV cycle / D. V. Ilyin, A. V. Bychkov, N. A. Doni // Energetik. – 2019. – № 11. – P. 9–13.
6. Gorshkov, A. V. Determination of the number of influencing lines for calculating the induced voltage on a disconnected overhead power line / A. V. Gorshkov. – Electricity. – 2018. – № 6. – P. 4–15.
7. Kolobanov, P. A. Improving the accuracy of one-sided determination of the location of damage in the electrical network of arbitrary configuration / P. A. Kolobanov, A. L. Kulikov, M. D. Obalin // Electricity. – 2019. – № 4. – P. 19–31.
8. Chernykh, I. V. Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink / I. V. Chernykh. – Moscow : DMK Press ; St. Petersburg : Peter, 2008. – 288 p.: ill. 6.
9. Krause, Ch. Building Reliable AC and DC UHV Power Transformers-Dielectric Design Principles, Suitable Pressboard Insulation and Issues Related to HVDC Testing / Ch. Krause, U. Piovan, D. Tschudi // Proceedings of International Conference on UHV Transmission. – Beijing, China, 2009. – P. 28–34.
10. Transient Electromagnetic-Thermal FE-Model of a SPICE-Coupled Transformer Including Eddy Currents with COMSOL Multiphysics / H. Neubert, T. Bödrich, R. Disselnkötter // Excerpt from the proceedings of the 2011 COMSOL conference in Stuttgart. – Stuttgart, 2011.
11. Development and results of a worldwide transformer reliability survey / S. Tenbohlen, J. Jagers, G. Bastos, et al. // In Proceedings of the CIGRE SC A2 Colloquium, Shanghai, China, 20–25 September 2015.

12. Bazavluk, A. A. Results of studies of transient processes in switching vacuum circuit breakers / A. A. Bazavluk, L. I. Sarin, I. E. Naumkin // Energetik. – 2011. – № 10. – P. 27–32.
13. Chernykh, I. V. Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink / I. V. Chernykh. – M. : DMK Press ; St. Petersburg : Peter, 2008. – 288 p.: il. 6.
14. RF Patent № 2695890 C1. The method of switching on a three-phase power transmission line // Alexander Ilyich Leviush, Valery Mikhailovich Strelkov, German Georgievich Fokin, Nikolai Anatolyevich Doni, Alexey Alexandrovich Shurupov. – Publ. 2009-06-10. Byul. № 22.
15. Kadomskaya, K. P. Overvoltages in electrical networks for various purposes and protection against them : textbook / K. P. Kadomskaya, Yu. A. Lavrov, A. A. Reicherdt. – Novosibirsk : NSTU Publishing House, 2004. – 368 p.
16. Organization standard. Methodological guidelines for the feasibility study of electric grid facilities. [Electronic resource]: STO 56947007- 29.240.01.271. – Introduction. 2019 – 07 – 24. – PJSC FGC UES, 2019. – 33 p.