

УДК 621.316.1

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКА ЗАМЫКАНИЯ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ СЕТЯХ СЕВЕРА

Сальников Василий Герасимович¹, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»

e-mail: kese@nsawt.ru

Иванова Елена Васильевна¹, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»

e-mail: kese@nsawt.ru

Дворцов Павел Павлович¹, аспирант

e-mail: mackarow.aleks2013@yandex.ru

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается необходимость развития транспортной и электрической инфраструктуры на территории крайнего Севера России, что является важным аспектом для успешного освоения этой стратегически значимой области. Основная мысль статьи заключается в том, что для обеспечения надежности и качества электроснабжения в суровых климатических условиях необходимо учитывать специфические особенности эксплуатации прибрежных электроэнергетических сетей с изолированной нейтралью.

Ключевые слова: изолированная нейтраль, сети среднего напряжения, ток замыкания на землю, показатели качества электрической энергии.

OPTIMIZATION OF PHASE-TO-EARTH FAULT CURRENT IN MEDIUM-VOLTAGE ELECTRIC NETWORKS IN THE COASTAL NETWORKS OF THE NORTH

Vasily G. Salnikov¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering

e-mail: kese@nsawt.ru

Elena V. Ivanova¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering

e-mail: kese@nsawt.ru

Pavel P. Dvortsov¹, Doctoral student

e-mail: mackarow.aleks2013@yandex.ru

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. The article discusses the need to develop transport and electrical infrastructure in the Russian Far North, which is an important aspect for the successful development of this strategically important area. The main idea of the article is that in order to ensure the reliability

and quality of electricity supply in harsh climatic conditions, it is necessary to take into account the specific features of the operation of coastal electric power networks with isolated neutral.

Keywords: isolated neutral, medium voltage networks, the current of the earth, indicators of electrical energy quality.

Освоение Севера России является актуальной и стратегически важной задачей государства на протяжении последних десятилетий. Для успешного освоения территории крайнего Севера богатыми полезными ископаемыми и улучшения общего качества жизни проживающего населения необходимо всестороннее развитие транспортной инфраструктуры, в том числе развитие прибрежных электрических сетей среднего напряжения.

Электрические сети среднего напряжения 6-35 кВ прибрежных территорий крайнего Севера работают с изолированной нейтралью [1]. Если при нормальных режимах работа ток замыкания в электрических сетях с изолированной 6-20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры воздушных линий, и во всех сетях 35 кВ – менее 10 А; в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях, при напряжении 6 кВ – менее 30 А, при 10 кВ – менее 20 А, при 15-20 кВ – менее 15 А, то их работа допускается [2].

По оценке Института систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, показатели качества электрической энергии в сетях Мурманской области (МО), Республики Карелия (РК) и Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) не соответствуют в полной мере требованиям ГОСТ 32144-2013 [4]. На рисунке 1 и рисунке 2 представлены карты показателей качества электрической энергии данных субъектов Российской Федерации. Выделяется несинусоидальность напряжения в системах электроснабжения отдельных объектов региона (МО, ЯНАО), несинусоидальность напряжения на большинстве объектов региона (РК) и отклонение напряжения на отдельных объектах региона (ЯНАО).

Электрические сети среднего напряжения прибрежных территорий играют ключевую роль в функционировании портов, портового оборудования, прилегающих объектов инфраструктуры и систем питания судов с берега. Суровый климат прибрежных территорий крайнего Севера порождает серьёзную проблему для функционирования линий электропередачи (ЛЭП) – обледенение. Образование наледи на проводах и кабелях может достигать 60-70 миллиметров, что существенно увеличивает их массу и нагрузку на опоры. Обледенение может привести к возникновению отказа ЛЭП или их опор, а также повлиять на изменение величины емкостного тока замыкания фазы на землю.

Величина тока замыкания на землю является интегральной характеристикой электрической сети. Характер тока замыкания на землю обусловлен зависимостью этого тока от общей длины линий электропередачи электрической сети, класса рабочего напряжения сети, типа исполнения конструкций опор линий электропередач и особенности ландшафта вдоль трассы. Обледенение может внести значительный вклад в характер тока замыкания.

Ток замыкания на землю имеет следующее влияние в электрической сети:

1 Увеличивается ёмкостной ток. Ёмкостной ток возникает в электрических сетях из-за емкости между проводами и землей. В случае повреждения происходит замыкания на землю. В месте повреждения начнёт протекать ёмкостной ток, зависящий от ёмкостей неповреждённых фаз.





Рисунок 1 – Карта качества электрической энергии в Мурманской области и Республики Карелия [3]: ▨ – Несинусоидальность напряжения в системах электроснабжения отдельных объектов региона; ■ – Несинусоидальность напряжения на большинстве объектов региона

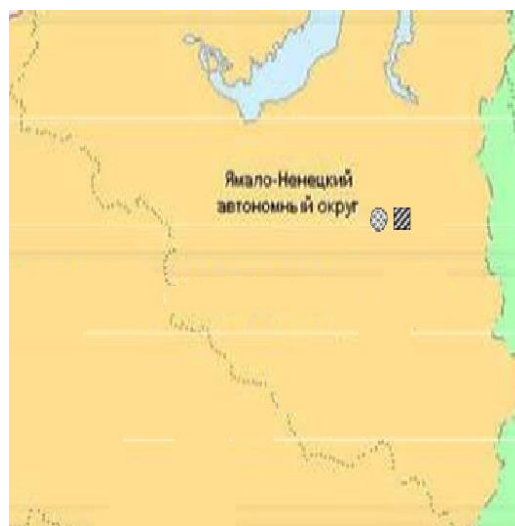


Рисунок 2 – Карта качества электрической энергии в Ямало-Ненецком автономном округе [3]
▨ – Отклонение напряжения на отдельных объектах региона

2 Возникает повышение уровня напряжения на неповреждённых фазах. В случае однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью ток ОЗЗ замыкается через ёмкости неповреждённых фаз. Так как этот ток невелик, электрическую сеть можно продолжать эксплуатировать, не выводя повреждённую фазу из работы незамедлительно. В неповрежденных фазах резко возрастает значение величины напряжение. Рост уровня напряжения может привести к нарушению изоляции оборудования на других участках, пробоем изоляции оборудования и может вызвать выход из строя трансформаторов на подстанциях или вызвать новые замыкания ёмкостные или гальванические.

3 Увеличивается содержание высших гармонических в сети. Высшие гармоники содержатся в токе нулевой последовательности повреждённой линии, который во много раз превышает величину тока токах нулевой последовательности неповреждённых линий.

«Несинусоидальность формы кривой напряжения в части высших гармоник напряжения оценивается коэффициентами гармонических составляющих, которые регламентируются стандартом ГОСТ 32144-2013 [4, пп 4.1, 4.2]. Для корректных заключений требуется

выполнять анализ целого ряда показателей качества электроэнергии в течение одной недели на каждом участке электрической сети. Традиционными мерами подавления высших гармоник в питающем напряжении в штатных эксплуатационных режимах являются устройства компенсации реактивной мощности, узкополосные резонансные фильтры, настроенные обычно на подавление 5, 7, 11, 13, 23 и 25-й гармоник, фильтро-компенсирующие устройства, активные фильтры гармоник и их комбинации» [9, 10, 11].

В определённых случаях токи высших гармоник при замыкании фазы на землю и несинусоидальном напряжении могут составлять значительную долю от общего тока ОЗЗ при нормальном режиме работы. Осциллограмма тока ОЗЗ в электрической сети 6 кВ [11] представлена на рисунке 3.

Для ограничения тока высших гармонических составляющих рекомендуется использовать следующее положение, основанное на математическом моделировании процесса замыкания на землю.

«Ёмкостной тока замыкания на землю I_c (А) при синусоидальном напряжении определяется по формуле» [2]:

$$I_c = 3\omega C_\phi U_\phi, \quad (1)$$

где U_ϕ – фазное напряжение, В;

ω – угловая частота напряжения, $\omega = 2\pi f$, с⁻¹;

f – частота сети, Гц;

C_ϕ – ёмкость фазы сети, Ф [2].

«В случае искажения формы кривой фазного напряжения ёмкостной ток на землю рекомендуется определять по формуле» [2]

$$I_{CH} = 3\omega C_\phi U_1 + \sum_{n=2}^{\infty} U_n 3C_\phi n\omega, \quad (2)$$

где « U_1 , U_n – действующие значения 1-й и n-й гармоник фазного напряжения соответственно, В; n – номер гармонической составляющей напряжения» [2].

«Математическая модель зависимости тока замыкания на землю от коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения $\delta K_{U(n)}$ имеет вид» [12]

$$I_n = I_c \delta K_{U(n)} \left(n - \frac{1}{n}\right). \quad (3)$$

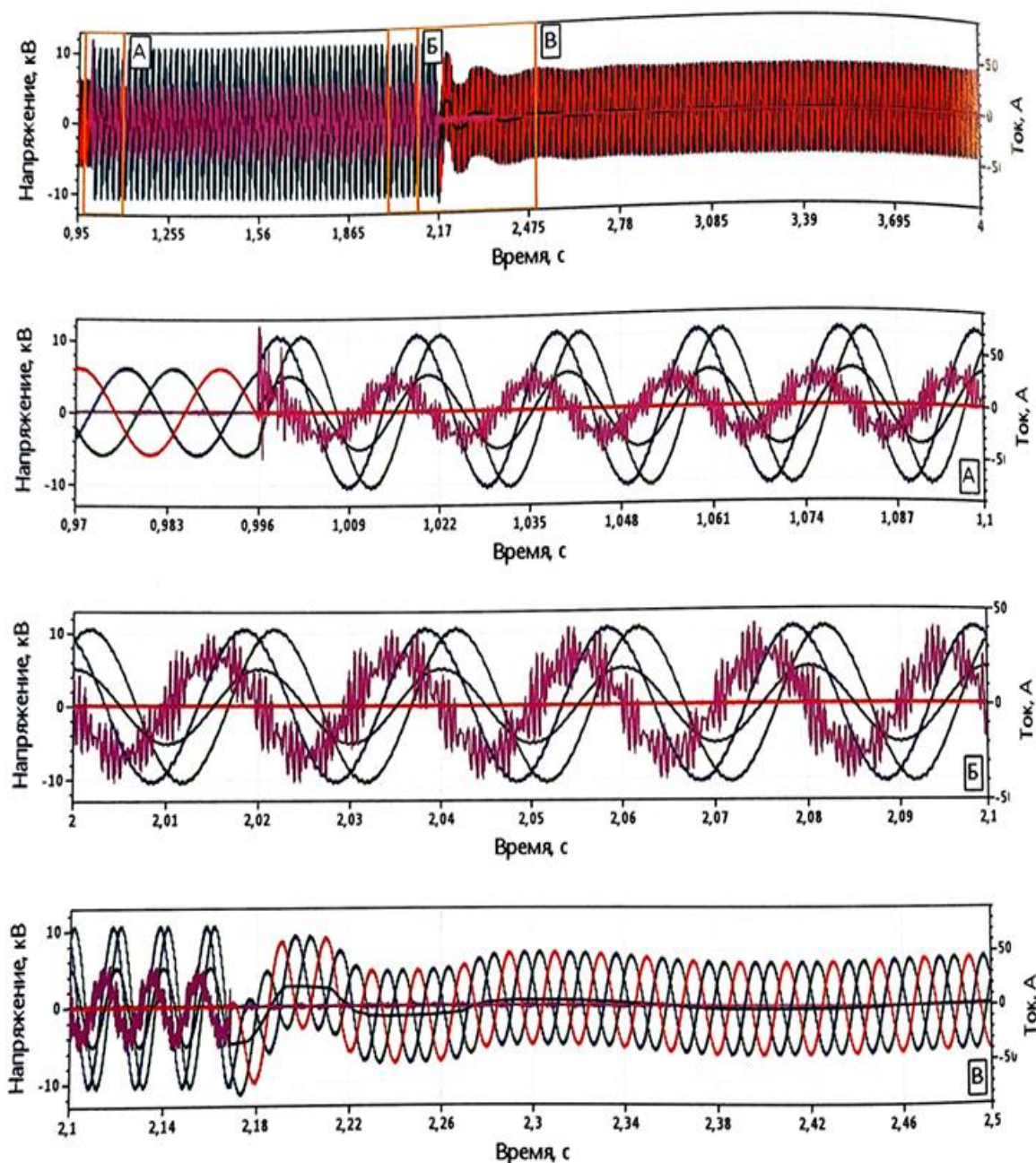


Рисунок 2 – Осциллограмма тока однофазного замыкания на землю и фазных напряжений 6 кВ на шинах КРУ. (ОЗЗ – сиреневый цвет; фаза А – синий цвет; фаза В – зелёный цвет; фаза С – красный цвет; напряжение в нейтрали – черный цвет) [11]

Заключение

Освоение Севера России требует развития транспортной инфраструктуры, включая прибрежные электрические сети среднего напряжения. Суровый климат, в частности обледенение, создает дополнительные проблемы для ЛЭП, увеличивая нагрузку на опоры и влияя на величину емкостного тока замыкания фазы на землю. Для решения этих проблем необходимо применять меры по подавлению высших гармоник. Также, для ограничения тока высших гармонических составляющих рекомендуется использовать математическое моделирование процесса замыкания на землю.

Список литературы:

- 1 Коверников, Л.И. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Коверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с. – ISBN 978-5-02-038705-8.
- 2 Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / [Текст] / Е.В. Иванова/ под ред. В.П.Горелова, Н.Н.Лизалека. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2006. – 432 с. – ISBN 5-8119-0201-0.
- 3 Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Коверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с. – ISBN 978-5-02-038705-8.
- 4 ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- 5 Романов, М.Н. Обеспечение качественного функционирования Электрических сетей среднего напряжения с распределённой Генерацией как рецепторов в регионах с суровым климатом: дис. ... канд. техн. наук: 2.4.3 / Романов Марк Николаевич – Новосибирск, 2024. – 205 с.
- 6 Токарев, И.С. Моделирование и исследование параллельной работы энергоагрегатов электростанций собственных нужд газоконденсаторных станций: дис. канд. тех. наук: 05.14.02 / Токарев Иван Сергеевич. – Томск. – 2016. – 155 с
- 7 Выбор схем электроснабжения автономных объектов от электростанций собственных нужд. СТО Газпром 2 – 6.2 – 208 – 2008. М.: Газпром ВНИИГАЗ. – 2008. – 35 с.
- 8 Голубовский, А.В. Оптимизация режимов работы СД в узлах нагрузки систем электроснабжения КС магистральных газопроводов: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.14.02 / Голубовский А.В.// Самара. – 2008. – 28 с.
- 9 Данник, Т. А. Эффективность различных мероприятий по повышению качества электрической энергии / Т. А. Данник, В. А. Дубровская // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2022. — № S1 (24). — С. 42 – 48.
- 10 Замула, К. В. Активный фильтр гармоник как средство повышения качества электрической энергии / К. В. Замула, Ю. В. Соколов, А. В. Карманов // Энергия единой сети. — 2018. — № 2 (37). — С. 22 – 32.
- 11 Ширковец, А. И. Гармонические искажения сигналов тока и напряжения при замыканиях на землю в электрической сети 6 - 10 кВ / А. И. Ширковец // Промышленная энергетика. – 2023. – № 10. – С. 34-44. – DOI 10.34831/EP.2023.50.44.005. – EDN DMICIP.
- 12 Данилов, Г.А. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников ; под. ред. В.П. Горелов, В.Г. Сальников. Новосибирск : Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2013 – 559 с. – ISBN 978-8119-0539-0.

