

УДК 621.31

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 КВ И ВЫШЕ ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Н.С. Бурянина¹, К.П.Васильева¹Ю.Ф.Королюк²,
Е.В. Лесных³, К.В. Суслов⁴

¹Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
г. Якутск, Россия

²Чукотский филиал Северо-Восточного федерального университета имени
М.К. Аммосова, г. Анадырь, Россия

³Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия

⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

Резюме: Предлагается двухсторонний способ определения места короткого замыкания на линиях электропередачи, используя мгновенные значения токов и напряжений. При этом интервал дискретизации предлагается равным четверти периода частоты сети. При таком интервале исключаются четные гармоники, а нечетные вычисляются без искажения. Учитывая, что нулевые составляющие в токах и напряжениях можно исключить схемными решениями, фильтры низких частот можно выполнить с частотой среза 250 – 300 Гц. Для определения места повреждения предлагается использовать параметры прямой и обратной последовательностей.

Ключевые слова: способ определения места короткого замыкания, напряжение прямой последовательности, напряжение обратной последовательности, гармоники токов и напряжений.

DEFINITION OF THE PLACE OF SHORT CIRCUITS ON POWER LINES OF 110 KV AND ABOVE ON INSTANTANEOUS VALUES OF CURRENTS AND VOLTAGES

N.S. Burjanina¹, K.P. Vasil'eva¹, J.F. Koroljuk², E.V. Lesnykh³, K.V. Suslov⁴

¹M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

²Chukotka branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher
Education "M. K. Ammosov North-Eastern Federal University", Anadyr, Russia

³Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: It proposed a two-way method of determining the place of the short circuit in the power lines, using the instantaneous values of currents and voltages. This sampling interval is proposed equal to a quarter period of the mains frequency. With this range are excluded even harmonics and odd harmonics are calculated without distortion. Given that zero components in the currents and voltages can be eliminated schematics, low-pass filters can be performed with a cutoff frequency of 250 - 300 Hz. To determine the fault location is proposed to use the parameters of the direct and reverse sequences.

Keywords: *method of determining the fault location, the direct sequence voltage, reverse sequence voltage, harmonic currents and voltages.*

Для обеспечения требуемой надежности работы энергосистемы в настоящее время существуют различные способы. Но, несмотря на высокую надежность силового оборудования и систем управления, возможны сбои в работе, например короткие замыкания в питающих и распределительных сетях, обусловленные непредвиденными обстоятельствами. Сокращение времени поиска места коротких замыканий в линиях – это прямой путь повышения надежности энергосистем. Существует достаточно большое разнообразие методов определения места повреждения воздушных и кабельных линий. Основными способами определения места повреждения являются полевые измерения, предусматривающие отключение линии. Алгоритмы определения места повреждения (ОМП) без отключения линии могут быть классифицированы на нахождении полного сопротивления [1–3], использованием бегущих волн [4–7], методов искусственного интеллекта [8, 9], импульсного метода [10, 11] и основанные на измерении напряжений [12–15].

Но несмотря на многообразие методов, проблема точности определения места коротких замыканий (КЗ) остается актуальной и с появлением цифрового измерения токов, напряжений и их обработки. Причем предпочтение отдается параметрам обратной и нулевой последовательностей [16].

Токи и напряжения нулевой последовательности появляются при КЗ на землю. Недостатком ОМП, основанных на обработке токов и напряжений нулевой последовательности, является их зависимость от сезона и погодных условий. Особенно это влияет при ОМП длинных линий, где вдоль трассы, как правило, разные характеристики почвы (болота, каменистый грунт, близкие грунтовые воды и т.п.). А в условиях вечной мерзлоты сопротивление земли меняется на порядок в зависимости от сезона.

Поэтому в дополнение к ОМП, основанного на обработке параметров нулевой последовательности, используются модели линии в обратной последовательности, где параметры модели линии более стабильны.

На наш взгляд, совершенно незаслуженно исключено ОМП по параметрам прямой последовательности, где также стабильны параметры линий.

Ниже предлагаются алгоритмы ОМП, основанные на двухстороннем измерении токов и напряжений аварийного режима.

Рассмотрим, каким образом определяются комплексные значения токов и напряжений, используемые для определения места короткого замыкания.

Токи и напряжения описываются синусоидальными функциями:

$$u = U_{\max} \sin(\omega t + \psi_u), \quad (1)$$

$$i = I_{\max} \sin(\omega t + \psi_i).$$

Возьмем производные от токов и напряжений по углу (ωt):

$$u = U_{\max} \cos(\omega t + \psi_u), \quad (2)$$

$$i = I_{\max} \cos(\omega t + \psi_i).$$

Известно, что комплексное значение синусоидальной величины при начальных фазах можно определить как

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\max} &= U_{\max} \cdot e^{j\psi_u} = U_{\max} \cdot \cos \psi_u + jU_{\max} \cdot \sin \psi_u, \\ \dot{I}_{\max} &= I_{\max} \cdot e^{j\psi_i} = I_{\max} \cdot \cos \psi_i + jI_{\max} \cdot \sin \psi_i.\end{aligned}\quad (3)$$

Начальные фазы токов и напряжений – величины условные и могут принимать любые значения. При этом результаты расчетов мощностей, входных сопротивлений и любых других величин, определяемых через комплексные значения токов и напряжений, будут одинаковыми. Важно только, чтобы разность фаз токов и напряжений была неизменной. Значит уравнения (3) справедливы для любого момента времени t :

$$\begin{aligned}\dot{I}_{\max}(t) &= I_{\max} \times e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_{\max} \times \cos(\omega t + \psi_i) + jI_{\max} \times \sin(\omega t + \psi_i), \\ \dot{U}_{\max}(t) &= U_{\max} \times e^{j(\omega t + \psi_u)} = U_{\max} \times \cos(\omega t + \psi_u) + jU_{\max} \times \sin(\omega t + \psi_u).\end{aligned}\quad (4)$$

Из (1), (2) и (4) следует, что для получения комплексных значений токов и напряжений в момент времени t необходимо иметь мгновенные значения токов и напряжений $u(t)$, $i(t)$ и их производные $u'(t)$ и $i'(t)$.

Производную изменяющейся во времени величины можно получить как отношение разности двух значений величины, разделенных интервалом времени Δt к этому интервалу, выраженному в радианах. Значение производной будет соответствовать моменту времени на середине интервала. Тогда текущее значение величины, соответствующее этому моменту времени, равно полусумме измеренных значений. Интервал времени Δt получил название интервала дискретизации, а вычисленные текущие значения и производные названы вторичными параметрами.

Однако при таком подходе допускаются систематические погрешности в вычислении вторичных параметров, которые можно определить как

$$\begin{aligned}\Delta f(\Delta t) &= \left[\left[\cos\left(\frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \Delta t\right) - 1 \right] \cdot 100\%, \right. \\ \Delta f'(\Delta t) &= \left[\left[\frac{2}{\omega \cdot \Delta t} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \Delta t\right) - 1 \right] \cdot 100\%. \right.\end{aligned}\quad (5)$$

Зависимости погрешностей от величины интервала дискретизации показаны на рис.1.

Очевидно, что для определения места короткого замыкания, где требуемая точность определяется погрешностью трансформаторов тока и напряжения, интервал дискретизации не может быть больше 0,2–0,3 мс.

При коротких замыканиях в напряжениях могут возникнуть гармонические составляющие, которые могут дополнительно усиливаться при определении вторичных параметров. Погрешности при этих условиях можно определить как

$$\begin{aligned}\frac{\Delta f(k)}{\Delta f(1)} &= \frac{\cos\left[\frac{k \times \omega \times \Delta t}{2}\right]}{\cos\left[\frac{\omega \times \Delta t}{2}\right]}, & \frac{\Delta f'(k)}{\Delta f'(1)} &= \frac{\sin\left[\frac{k \cdot \omega \cdot \Delta t}{2}\right]}{\sin\left[\frac{\omega \cdot \Delta t}{2}\right]},\end{aligned}\quad (6)$$

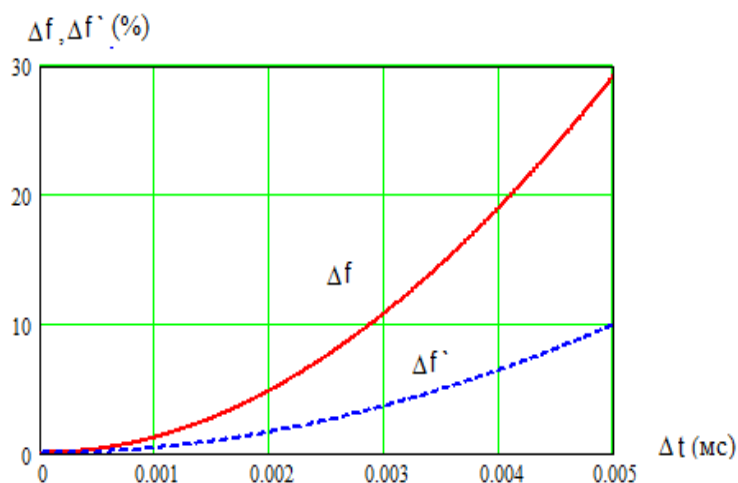


Рис. 1. Зависимости погрешностей текущего значения синусоидальной величины и ее производной от величины интервала дискретизации (частота 50 Гц)

где k – отношение частоты высокочастотной составляющей напряжения к рабочей ω .

Для интервала дискретизации в 1 мс зависимости погрешностей рассчитанных параметров от частоты будут выглядеть как изображено на рис. 2, из которого видно, что наличие высокочастотных составляющих может привести к количественным искажениям. Чем выше частота свободных составляющих, тем больше усиливается производная измеряемой величины и уменьшается текущее значение. При меньшем интервале дискретизации производная увеличивается еще больше.

Усиление высокочастотных составляющих при малых интервалах дискретизации является существенным недостатком, исключить который можно либо глубокой фильтрацией первичных параметров, либо применением алгоритмов цифровых фильтров. То и другое, с одной стороны, не снижает полностью погрешность, а с другой – увеличивает время обработки информации за счет больших постоянных времени фильтров.

Анализ уравнений (5) и (6) показывает, что погрешности в определении вторичных параметров на основной частоте можно исключить полностью, если измерения проводить через четверть периода T рабочей частоты. При наличии пяти измерений, разделенных четвертью периода, текущее значение и производная напряжения определяются [17] (аналогично определяются токи):

$$u(t) = \frac{2u(t) - u\left[t + \frac{T}{2}\right] - u\left[t - \frac{T}{2}\right]}{4}, \quad u'(t) = \frac{u\left[t + \frac{T}{4}\right] - u\left[t - \frac{T}{4}\right]}{2}. \quad (7)$$

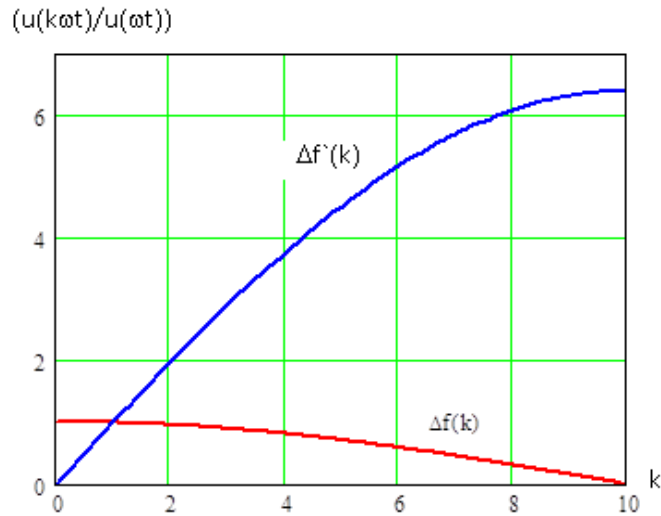


Рис. 2. Зависимости погрешностей текущего значения синусоидальной величины и ее производной от гармоник

Чтобы исключить погрешности при изменении частоты сети, предлагается не фиксированный по времени интервал дискретизации, а формируемый при изменении полярностей напряжений на резисторе и конденсаторе RC -звена. Напряжения на резисторе и конденсаторе всегда сдвинуты относительно друг друга на четверть периода, независимо от частоты приложенного напряжения.

Однако, погрешности, обусловленные наличием высокочастотных составляющих, остаются. Используя (7), получаем:

$$\frac{u(k)}{u(1)} = \sin^2 \left[\frac{k \cdot \pi}{2} \right], \quad u'(k) = \sin \left[\frac{k \cdot \pi}{2} \right]. \quad (8)$$

На рис. 3 показаны зависимости погрешностей в определении вторичных параметров при интервале дискретизации, равном четверти периода рабочей частоты.

Как видно из рисунка, исключены полностью четные гармоники, не усиливаются нечетные гармоники, а промежуточные ослабляются.

Достаточно просто исключаются гармоники, кратные трем и нулевые составляющие рабочей частоты, как разность фазных величин токов и напряжений и их нулевых составляющих. Т.е. ближайшая гармоника к промышленной – пятая. Следует ожидать на линиях 110–220 кВ невысоких значений высокочастотных составляющих напряжений. Поэтому погрешность от их присутствия ожидается небольшой. Если же эта погрешность будет влиять на точность определения места КЗ, необходимо напряжения пропустить через фильтры низких частот с частотой среза 250–350 Гц.

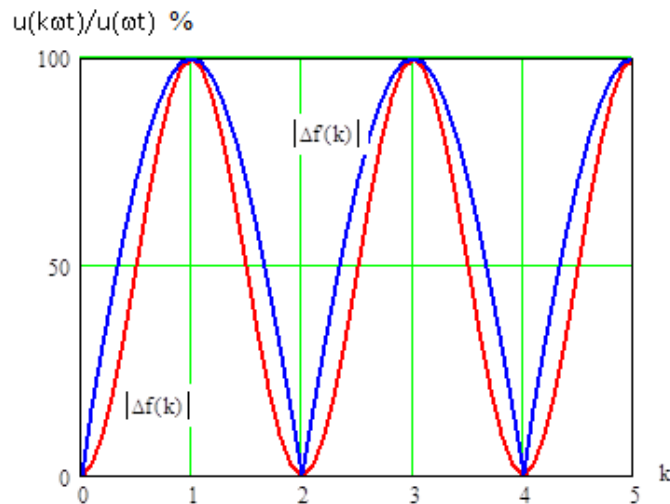


Рис. 3. Зависимость вторичных параметров от частоты свободных составляющих в первичных параметрах

Параметры прямой и обратной последовательности напряжений (аналогично токов) можно определить как

$$u_1(t) = \frac{u_a(t) + \frac{u_b\left(t + \frac{T}{4}\right) - u_c\left(t + \frac{T}{4}\right)}{\sqrt{3}}}{2}, \quad (9)$$

$$u_2(t) = \frac{u_a(t) - \frac{u_b\left(t + \frac{T}{4}\right) - u_c\left(t + \frac{T}{4}\right)}{\sqrt{3}}}{2}.$$

Для любого момента времени можно найти действительную и мнимую составляющие напряжения (аналогично токов) как

$$u(t) = \frac{2u(t) - u\left[t + \frac{T}{2}\right] - u\left[t - \frac{T}{2}\right]}{4}. \quad (10)$$

$$u'(t) = \frac{u\left[t + \frac{T}{4}\right] - u\left[t - \frac{T}{4}\right]}{2}$$

Напряжения, определяемые по (9), отстают от момента времени начала отсчета на половину периода частоты сети, а по (10) – на период.

Апериодическая составляющая в токах в интервале одного – двух периодов может достигать величин до 0,8 от периодической составляющей тока КЗ. Но апериодическая составляющая однополярна, поэтому во вторичных токах, согласно (7), она снижается. Наибольшая величина апериодической составляющей во вторичном токе при постоянных времени в интервале 0,007–0,01 с не превышает 7% через 0,015 с от момента возникновения КЗ, и 2,23% – через 0,025 с. При этом погрешность в определении мгновенных значений токов прямой и обратной последовательностей составляет 0,55%. Это очень важное преимущество вычисления параметров токов и напряжений, фиксируемых через четверть периода рабочей частоты сети.

Это подтверждает рис. 4, где в относительных единицах приведены мгновенные значения: тока фазы А без нулевой составляющей, производная разности токов фаз В и С, токи прямой и обратной последовательностей. Первичные токи выражены уравнениями:

$$i_a(t) = 0,5 \sin(\omega t) + \exp\left(-\frac{1}{0,03}\right),$$

$$i_b(t) = \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - 0,5 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - 0,5 \exp\left(-\frac{1}{0,03}\right),$$

$$i_c(t) = \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - 0,5 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - 0,5 \exp\left(-\frac{1}{0,03}\right).$$

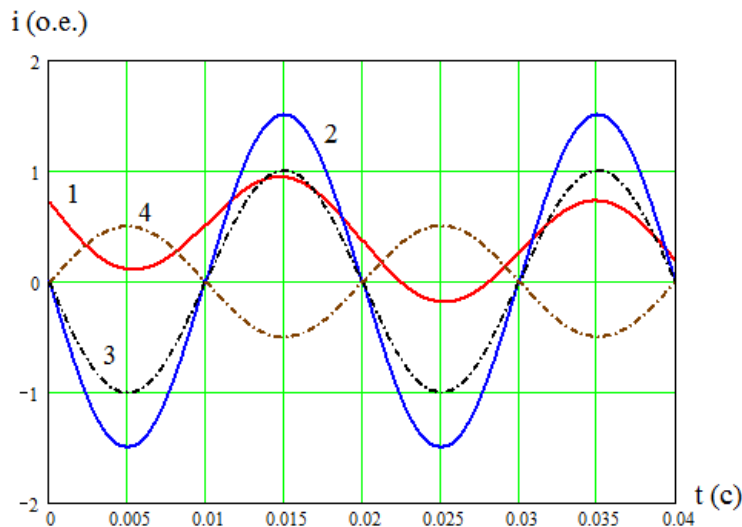


Рис. 4. Мгновенные значения токов при двухфазном на землю КЗ:
1 – первичный ток фазы А; 2 – производная разности токов фаз В и С;
3 – вторичный ток прямой последовательности; 4 – вторичный ток обратной последовательности

Определение места повреждения производится по параметрам переходного режима КЗ. Алгоритм определения места повреждения сводится к следующим операциям:

– через четверть периода фиксируются фазные токи и напряжения без нулевых

составляющих;

- согласно (7) вычисляются их вторичные параметры;
- на каждом интервале согласно (9) определяются вторичные токи и напряжения прямой и обратной последовательностей;
- определяются, согласно (10), действительные и мнимые части вторичных комплексов токов и напряжений прямой и обратной последовательностей;
- по рассчитанным токам и напряжениям каждого конца линии, используя гиперболические уравнения, производится расчет напряжений прямой и обратной последовательностей симметричных составляющих. С этой целью изменяют длину линии с заданным шагом (например, через один километр) от нуля до реальной, выполняя расчет с обеих сторон воздушной линии по выражениям:

$$\begin{aligned} U_1^{(i)} &= \operatorname{ch} \left(\gamma l_1 \right) \dot{U}_H + Z_C \operatorname{sh} \left(\gamma l_1 \right) \dot{I}_H, \\ U_2^{(i)} &= \operatorname{ch} \left(\gamma l_2 \right) \dot{U}_K + Z_C \operatorname{sh} \left(\gamma l_2 \right) \dot{I}_K, \end{aligned} \quad (11)$$

где верхний индекс может принимать значения 1 (прямая последовательность) и 2 (обратная последовательность); l_1 и l_2 – расстояния от начала (нижний индекс «н») и конца

(нижний индекс «к») линии до расчетных точек; $\dot{\gamma} = \sqrt{(r^{(i)} + jx^{(i)}) \cdot (g^{(i)} + jb^{(i)})}$ – постоянная

распространения; $\dot{Z}_C = \sqrt{\frac{(r^{(i)} + jx^{(i)})}{(g^{(i)} + jb^{(i)})}}$ – волновое сопротивление.

– для каждой пары напряжений в результате расчетов получаются два графика изменения модулей напряжения вдоль линии: один при расчете со стороны передающего конца, второй – со стороны приемного. Наложение этих графиков дает точку пересечения, которая является местом КЗ. При этом переходное сопротивление в месте КЗ не влияет на точность ОМП. При очень большом переходном сопротивлении на точность ОМП оказывают влияние погрешности измерения токов и напряжений.

Найденное место повреждения определяется точно, если принятые при расчете параметры линии совпадают с реальными, а линия описывается гиперболическими уравнениями. Такая модель линии позволяет определять место повреждения и при отключении ее с одного конца. Чем длиннее линия, тем точнее определяется место повреждения.

В качестве примера рассматривается линия электропередачи 110 кВ длиной 150 км, включенная между двумя генераторами через трехобмоточные трансформаторы. Параметры линии по прямой последовательности: $r_1 = 0,33$ Ом/км, $x_1 = 0,36$ Ом/км; $g_1 = 0$, $b_1 = 2,6 \cdot 10^{-6}$ См/км; по нулевой последовательности: $r_0 = 0,35$ Ом/км, $x_0 = 1,1$ Ом/км, $g_0 = 0$, $b_0 = 1,6 \cdot 10^{-6}$ См/км.

Параметры генераторов: $U_H = 1,08 \cdot 6$ кВ, $P_H = 42$ МВт, $\cos \varphi = 0,8$, $x_d'' = 0,272$ о.е., $x_2 = 0,30$ о.е. ЭДС генераторов совпадают по фазе.

Параметры трансформаторов: $SH = 16$ МВА, $U_{HB} = 110$ кВ, $U_{HC} = 35$ кВ, $U_{HH} = 6$ кВ, $U_{КЗвн} = 10\%$, $U_{КЗвн} = 24\%$, $U_{КЗсн} = 12\%$, потерями в трансформаторах и током намагничивания пренебрегаем.

На рис. 5 показаны рассчитанные напряжения с обоих концов линии электропередачи 110 кВ длиной 150 километров с КЗ на расстоянии 130 км от начала линии, (сплошными линиями обозначены напряжения, рассчитанные по параметрам режима начала, пунктирными – конца линии).

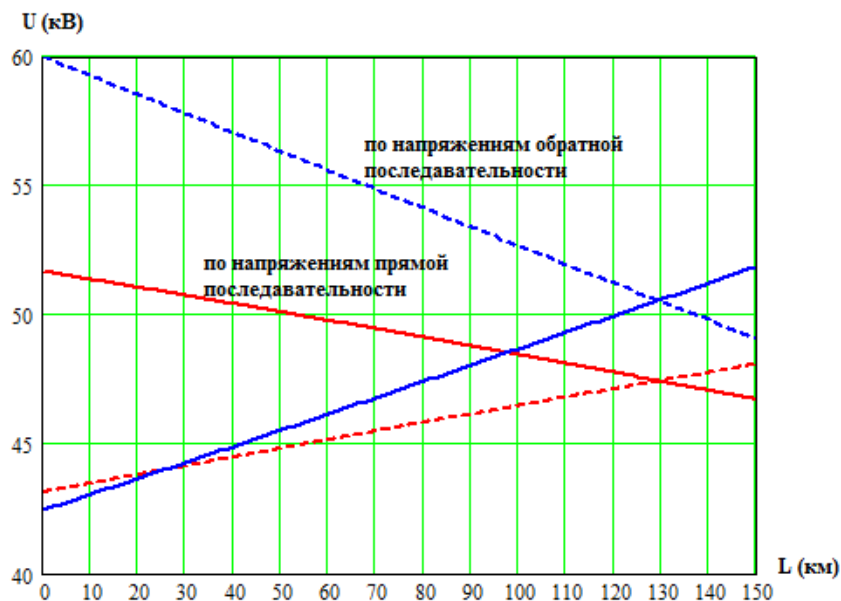


Рис. 5. Рассчитанные модули напряжений вдоль линии по параметрам аварийного режима

Изменение параметров линии, которое можно учесть, это зависимость активного сопротивления от температуры. Температурный коэффициент для сталь-алюминиевых проводов равен $3,7 \cdot 10^{-3}$ Ом/град. В условиях Севера разность зимнего и паспортного активных сопротивлений может составлять 26%. Погрешность при неучете этого фактора может составлять 2,0 – 2,5 километра на линии длиной 150 км. В программе ОМП нетрудно учесть температуру окружающей среды.

Следует отметить, что приведенный метод съема цифровой информации может быть применен для контроля нормальных и аварийных режимов в электроэнергетике.

Выводы

1. Интервал дискретизации, равный четверти периода частоты, позволяет определять параметры как нормального, так и аварийного режимов.
2. В аварийном режиме цифровая обработка токов и напряжений с интервалом дискретизации, равном четверти периода частоты сети, отфильтровывает четные гармоники токов и напряжений, снижает аperiodическую составляющую до долей процентов. Учитывая, что гармоники, кратные трем, можно исключить схемно, ближайшая гармоника к первой – пятая. Это позволяет применить быстродействующие частотные фильтры.
3. Достаточно просто определяются токи и напряжения прямой и обратной последовательностей как в мгновенных значениях, так и в комплексных.
4. Определение места КЗ сводится к расчету модулей напряжений прямой и обратной последовательностей вдоль линии с каждого конца через гиперболические уравнения в предположении, что повреждения нет. С этой целью изменяют длину линии с заданным мелким шагом и строят графики изменения этих напряжений. Наложение графиков отдельно прямой и отдельно обратной последовательностей с двух сторон дает точку пересечения, которая является местом КЗ.
5. Определение места повреждения достигается с высокой точностью за счет использования модели линии, описываемой гиперболическими уравнениями с учетом изменения температуры окружающей среды.

Литература

1. Mora-Flòrez, J. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems / J.Mora-Flòrez, J.Meléndez, G.Carrillo-Caicedo// Electric power systems research.-2008. - Vol.78.- P.657-666.
2. Seung-Jae, L. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems / L.Seung-Jae, C.Myeon-Song, K. Sang-Hee, J. Bo-Gun, L.Duck-Su, A. Bok-Shin, et // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2004. - vol.19. - P.524-532.
3. Nouri, H. Comprehensive distribution network fault location using the distributed parameter model / H.Nouri, M.M.Alamuti// IEEE Transactions on Power Delivery.- 2011.- Vol.26.- P.2154-2162.
4. Borghetti A, Corsi S., Nucci C.A., Paolone M., Peretto L, Tinarelli R. On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems /A.Borghetti, S.Corsi,C.A.Nucci, M.Paolone, L.Peretto, R.Tinarelli// International journal electrical power energy systems.- 2006.-Vol. 28.- P.608-617.
5. Goudarzi, M. Improved fault location algorithm for radial distribution systems with discrete and continuous wavelet analysis / M. Goudarzi, B. Vahidi, R.A. Naghizadeh, S.H. Hosseini // International Journal of Electrical Power & Energy Systems.- 2015.- Vol.67.- P.423-430.
6. Gururajapathy, S.S.Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation / S.S.Gururajapathy, H.Mokhlis, H.A.Illias // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2017.-Vol.74.- P. 949-958.
7. Bellis, E.J. Apparatus for locating faults in electric cables / E.J.Bellis, P.F.Gale// U.S. Patent No. 4,491,782; 1985.
8. Thukaram, D. Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems /D.Thukaram, H.P.Khincha, H.P.Vijaynarasimha// IEEE Transactions on Power Delivery.- 2005.- Vol 20. - P.710-721.
9. Oliveira,J.C.M. Fault Detection and Diagnosis in dynamic systems using Weightless Neural Networks / J.C.M. Oliveira, K.V.Pontes, I.Sartori, M.Embiruçu // Expert Systems with Applications. - 2017.- Vol.84. -P.200-219.
10. Suslov, K.V. Smart Grid: A new way of receiving primary information on electric power system state / K.V.Suslov, N.N.Solonina,A.S.Smirnov// 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe conference.
11. Suslov, K.V. Improving the reliability of operation Microgrids / K.V.Suslov, N.N.Solonina,A.S.Smirnov // 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition ENERGYCON.
12. Pereira, R.A.F., Improved fault location on distribution feeders based on matching during-fault voltage sags /R.A.F.Pereira, L.G.W.da Silva, M.Kezunovic, J.R.S.Mantovani// IEEE Transactions on Power Delivery.- 2009.- Vol. 24. -P.852-862.
13. Lotfifard, S. Voltage sag data utilization for distribution fault location / S.Lotfifard, M.Kezunovic, M.J.Mousavi// IEEE Transactions on Power Delivery.- 2011. - Vol. 26. - P.1239-1246.
14. Brahma, S.M. Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation / S.M. Brahma // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2011.-Vol. 26. - P.1545-1553.
15. Dong, Y. Enhancing accuracy while reducing computation complexity for voltage-sag-based distribution fault location/ Y.Dong, C.Zheng, M.Kezunovic// IEEE Transactions on Power Delivery.- 2013.- Vol. 28. - P. 1202-1212.
16. Аржанников Е.А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи: под ред. В. А. Шуина. / Е.А. Аржанников, В.Ю. Лукьянов, М.Ш. Мисриханов М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.
17. Грешнов Е.Б. О выборе интервала дискретизации вводимых в ЭВМ аналоговых параметров для программируемых защит/ Е.Б. Грешнов, Ю.Ф. Королюк// Электронное моделирование. 1982. № 5. С.71 – 74.

Авторы публикации

Бурянина Надежда Сергеевна – докт. техн. наук, профессор, кафедры «Электроснабжение» Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Якутск. E-mail: bns2005_56@mail.ru.

Васильева Кунзэй Прокопьевна – аспирант кафедры «Электроснабжение» Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Ямского. E-mail: neski08@mail.ru.

Королюк Юрий Федорович – канд. техн. наук, профессор кафедры «Общие дисциплины» Чукотского филиала Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Анадырь. E-mail: kuf2005_41@mail.ru.

Лесных Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация» Сибирского государственного университета путей сообщения, г. Новосибирск. E-mail: abbiel@mail.ru.

Суслов Константин Витальевич – канд.техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета. E-mail: dr.souslov@yandex.ru.

References

1. Mora-Flòrez, J. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems / J.Mora-Flòrez, J.Meléndez, G.Carrillo-Caicedo // Electric power systems research.-2008. - Vol.78.- P.657-666.
2. Seung-Jae, L. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems / L.Seung-Jae, C.Myeon-Song, K. Sang-Hee, J. Bo-Gun, L.Duck-Su, A. Bok-Shin, et // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2004. - vol.19. - P.524-532.
3. Nouri, H. Comprehensive distribution network fault location using the distributed parameter model / H.Nouri, M.M.Alamuti // IEEE Transactions on Power Delivery.- 2011.- Vol.26.- P.2154-2162.
4. Borghetti A, Corsi S., Nucci C.A., Paolone M., Peretto L, Tinarelli R. On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems /A.Borghetti, S.Corsi,C.A.Nucci, M.Paolone, L.Peretto, R.Tinarelli // International journal electrical power energy systems.- 2006.-Vol. 28.- P.608-617.
5. Goudarzi, M. Improved fault location algorithm for radial distribution systems with discrete and continuous wavelet analysis / M. Goudarzi, B. Vahidi, R.A. Naghizadeh, S.H. Hosseini // International Journal of Electrical Power & Energy Systems.- 2015.- Vol.67.- P.423-430.
6. Gururajapathy, S.S. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation / S.S.Gururajapathy, H.Mokhlis, H.A.Illias // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2017.-Vol.74.- P. 949-958.
7. Bellis, E.J. Apparatus for locating faults in electric cables / E.J.Bellis, P.F.Gale// U.S. Patent No. 4,491,782; 1985.
8. Thukaram, D. Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems /D.Thukaram, H.P.Khincha, H.P.Vijaynarasimha// IEEE Transactions on Power Delivery.- 2005.- Vol 20. - P.710-721.
9. Oliveira,J.C.M. Fault Detection and Diagnosis in dynamic systems using Weightless Neural Networks / J.C.M. Oliveira, K.V.Pontes, I.Sartori, M.Embiriçu // Expert Systems with Applications. - 2017.- Vol.84. -P.200-219.
10. Suslov, K.V. Smart Grid: A new way of receiving primary information on electric power system state / K.V.Suslov, N.N.Solonina,A.S.Smirnov // 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe conference.
11. Suslov, K.V. Improving the reliability of operation Microgrids / K.V.Suslov,

N.N.Solonina, A.S.Smirnov // 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition ENERGYCON.

12. Pereira, R.A.F., Improved fault location on distribution feeders based on matching during-fault voltage sags /R.A.F.Pereira, L.G.W. da Silva, M.Kezunovic, J.R.S.Mantovani// IEEE Transactions on Power Delivery.- 2009.- Vol. 24. - P.852-862.

13. Lotfifard, S. Voltage sag data utilization for distribution fault location / S.Lotfifard, M.Kezunovic, M.J.Mousavi // IEEE Transactions on Power Delivery.- 2011. - Vol. 26. - P.1239-1246.

14. Brahma, S.M. Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation / S.M. Brahma // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2011.-Vol. 26. - P.1545-1553.

15. Dong, Y. Enhancing accuracy while reducing computation complexity for voltage-sag-based distribution fault location / Y.Dong, C.Zheng, M.Kezunovic // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2013.-Vol. 28. - P. 1202-1212.

16. Arzhannikov, E.A. Opređenje mesta kratkogoza-mykanij ana vysokovol'tnyhlinijahjelektroperedachi: pod red. V. A. Shuina / E.A.Arzhannikov, V.Ju.Lukojanov, M.Sh.Misrihanov - M.:Jenergoatomizdat, 2003.- 272 s.

17. Greshnov, E.B.O vyborein tervaladiskreti zaciivvodimyh v JeVManalogovy hparametrovdlij aprogrammiruem yhzashhit /E.B.Greshnov, Ju.F.Koroljuk// Jelektronnoemo delirovanie. - 1982.-№ 5.- P.71-74.

Authors of the publication

BurjaninaNadezhdaSergeevna- Dr. Sci. (Techn.),Prof. of department Electricity of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "M. K. Ammosov North-Eastern Federal University", NEFU

Vasil'evaKunnjejProkop'evna- graduate student of Department Electricity of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "M. K. Ammosov North-Eastern Federal University", NEFU

KoroljukJurijFedorovich- Cand. Sci. (Techn.), Prof. of department General discipline Chukotka branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "M. K. Ammosov North-Eastern Federal University", NEFU

Lesnykh Elena Vladimirovna- Cand. Sci. (Techn.),Assoc. Prof. of department Electrical Engineering, diagnosis and certification of Siberian Transport University, STU.

Suslov Konstantin Vital'evich-Cand. Sci. (Techn.),Prof. of department Electricity and Electronics Irkutsk of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education (Irkutsk National Research Technical University).

Поступила в редакцию

12 апреля 2017 г.