

УДК 621.361.925.003

Дьяченко М.Д.¹, Кравченко В.Н.², Бублик С.К.³, Бурлака В.В.⁴

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ДЕЙСТВИЯ СЕЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В МНОГОКАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Приведены результаты математического моделирования, разработаны принципы действия защиты от однофазных замыканий на землю в многокабельных линиях в сетях с изолированной нейтралью.

Простое однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в электрических сетях с изолированной нейтралью. По статистике более 70 % от общего числа повреждений в энергосистемах приходится именно на однофазные замыкания. А в сетях с изолированной нейтралью простое замыкание на землю нередко приводит к более серьезным повреждениям, сопровождающихся значительным экономическим ущербом.

Целью данной работы является исследование режима работы многокабельной параллельной линии сети с изолированной нейтралью при простом однофазном замыкании на землю, создание математической модели многокабельной линии и алгоритма выявления признаков ОЗЗ для разработки селективных устройств релейной защиты.

В сетях с изолированной нейтралью емкости фазных проводников между собой и по отношению к земле равномерно распределены. Для упрощения расчетов распределенные емкости заменены сосредоточенными междуфазными емкостями $C_{мф}$ и емкостями замыкания на землю C_0 (рис. 1).

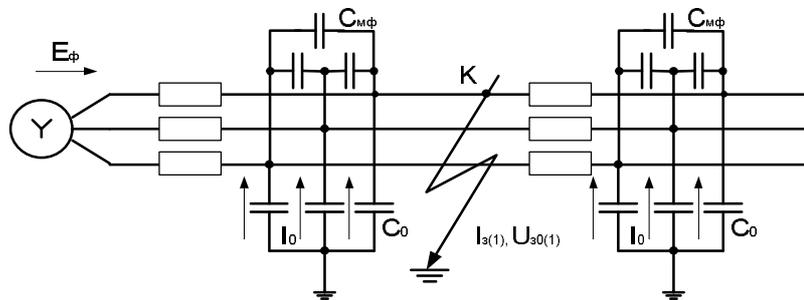


Рис. 1 – Однофазное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью

Под действием фазной ЭДС E_ϕ в фазах линии проходят симметричные емкостные токи, опережающие соответствующие ЭДС на 90° . Так как величина емкостных токов мала, можем пренебречь падением напряжений от них. Считаем, что фазное напряжение U_ϕ равно фазной ЭДС.

$$\dot{U}_\phi = \dot{E}_\phi \tag{1}$$

Тогда напряжение нейтрали U_n относительно земли с учетом полной симметрии схемы будет равным потенциалу земли.

$$\dot{U}_n = \dot{U}_\phi - \dot{E}_\phi = 0 \tag{2}$$

В случае однофазного замыкания на землю (в точке К), напряжение фазы А в месте по-

¹ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

²ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

³ПГТУ, ассистент

⁴ПГТУ, аспирант

вреждения равно 0. Если пренебречь падением напряжения от емкостных токов, можно считать, что напряжение поврежденной фазы и в любой точке равно нулю. Тогда нейтраль сети получает по отношению к земле смещение:

$$\dot{U}_{3,H}^{(1)} = \dot{U}_{3,A}^{(1)} - \dot{E}_A = -\dot{E}_A, \quad (3)$$

где $\dot{U}_{3,H}^{(1)}$ – напряжение смещения нейтрали,

$\dot{U}_{3,A}^{(1)}$ – напряжение фазы А в месте повреждения,

\dot{E}_A – фазная ЭДС (фазы А).

Напряжения неповрежденных фаз возрастают в $\sqrt{3}$ раз. А напряжение нулевой последовательности $\dot{U}_{3,0}^{(1)}$ станет равно напряжению смещения нейтрали $\dot{U}_{3,H}^{(1)}$.

$$\dot{U}_{3,0}^{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_{3,A}^{(1)} + \dot{U}_{3,B}^{(1)} + \dot{U}_{3,C}^{(1)}) = -\dot{E}_A \quad (4)$$

Тогда ток в месте повреждения $\dot{I}_{3,A}^{(1)}$ составит:

$$\dot{I}_{3,A}^{(1)} = 3 \cdot \dot{I}_0 = \frac{3 \cdot (0 - \dot{U}_{3,0}^{(1)})}{-j \frac{1}{\omega C_0}} = j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \dot{E}_A \quad (5)$$

Таким образом, токи $\dot{I}_{3,A}^{(1)}$ и \dot{I}_0 опережают \dot{E}_A на 90° и отстают от $\dot{U}_{3,0}^{(1)}$ на тот же угол.

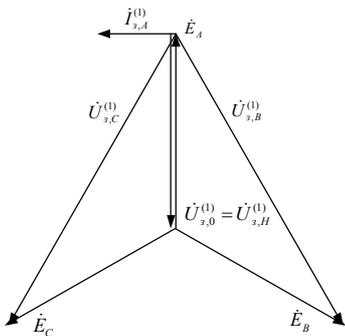


Рис. 2 – Векторная диаграмма токов и напряжений при однофазном замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью

Из векторной диаграммы, представленной на рис. 2, видно, что при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью искажаются фазные напряжения, в то время, как треугольник линейных напряжений остается неизменным. Это является одним из достоинств сети с изолированной нейтралью. При этом к фазам нагрузки продолжают подводиться нормальные напряжения и бесперебойность работы потребителей, включенных на линейные напряжения, не нарушается [1].

В сетях с изолированной нейтралью направление тока на поврежденном и неповрежденном присоединениях противоположны по знаку. Можно считать, что источник напряжения нулевой последовательности расположен непосредственно в месте замыкания.

Ток I_c , обусловленный емкостным сопротивлением неповрежденной сети, протекает в поврежденном элементе по направлению к шинам, а в неповрежденном – по направлению от шин (рис. 3).

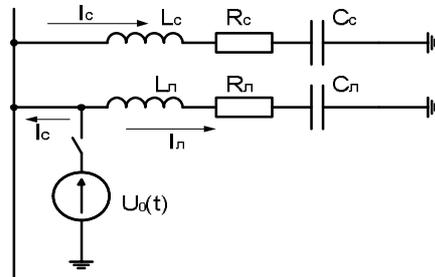


Рис. 3 – Схема замещения нулевой последовательности

Величина и фаза токов замыкания на землю определяются величиной напряжения нулевой последовательности. Наибольшего значения напряжение нулевой последовательности достигает при металлических замыканиях на землю, когда оно равно фазному напряжению сети.

При замыкании через переходное сопротивление величина напряжения нулевой последовательности определяется соотношением между сопротивлением нулевой последовательности сети и переходным сопротивлением [2].

Особую опасность представляют ОЗЗ в сетях напряжением 6 – 35 кВ, которые часто переходят в двойные замыкания или вызывают повреждение электродвигателей.

Существующие принципы защиты от ОЗЗ, описанные в [3 – 5] для защиты многокабельных линий, малоэффективны, так как при протекании тока нулевой последовательности от мес-

та однофазного замыкания на землю к источнику питания по неповрежденной многокабельной линии происходит ложное срабатывание существующих защит.

Актуальным является необходимость создания селективных устройств релейной защиты от однофазных замыканий на землю в многокабельных линиях сети 6 – 35 кВ, которые были бы лишены перечисленных недостатков.

Для разработки принципов работы селективной защиты необходимо определиться с тем, какие величины следует считать входными.

Учитывая особенности однофазного замыкания на землю, присущих только этому режиму, к входным величинам необходимо отнести:

- напряжение нулевой последовательности (появляется при возникновении ОЗЗ в любой точке сети);
- токи нулевой последовательности в начале и в конце каждого из защищаемых кабелей многокабельной линии;
- угол между напряжением и током нулевой последовательности с обеих сторон каждого кабеля многокабельной линии.

Математическая модель многокабельной линии сети с изолированной нейтралью создана в среде Matlab. Она основана на схеме замещения, которая отражает характер источника питания, нагрузки, а также и самих кабельных линий.

В данной модели кабельные линии представляют собой пучок из нескольких кабелей, проложенных параллельно, питающихся от одного источника и питающих одну нагрузку (рис. 4).

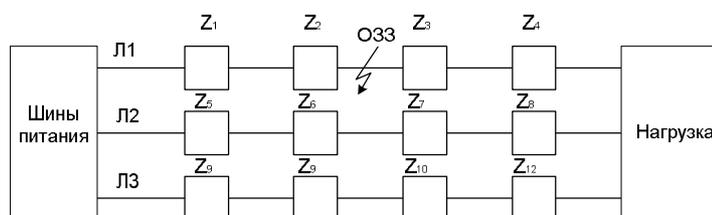


Рис. 4 – Блочная схема замещения многокабельной сети с малыми токами замыкания на землю

Для сети, в которой емкости кабеля относительно емкостей на шинах невелики, различие фаз между началом и концом поврежденного кабеля и началом и концом неповрежденных кабелей – величина относительно постоянная. Однако на практике она зависит в большой степени от влияния трансформаторов тока нулевой последовательности, которые могут ее исказить.

В зависимости от конфигурации сети возможно использование нескольких установленных принципов действия релейной защиты. В соответствии с полученными результатами предложены дифференциально-фазовый и дифференциально-амплитудный принципы выявления места ОЗЗ.

Дифференциально-фазовый принцип заключается в том, что при определенной конфигурации сети, фазы токов нулевой последовательности в начале и конце поврежденного кабеля будут отличаться на величину, близкую к 180° , в то время как в неповрежденных кабелях фазы токов нулевой последовательности будут примерно равны.

На примере сети с ОЗЗ, изображенной на рис. 4, эти соотношения выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi_{1н} - \varphi_{1к} &\approx 180^\circ, \quad \varphi_{2н} - \varphi_{2к} \approx 0^\circ, \quad \varphi_{3н} - \varphi_{3к} \approx 0^\circ, \\ \varphi_{1н} &\neq \varphi_{2н} = \varphi_{3н}, \quad \varphi_{1к} &\neq \varphi_{2к} = \varphi_{3к}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\varphi_{1н}, \varphi_{1к}, \varphi_{2н}, \varphi_{2к}, \varphi_{3н}, \varphi_{3к}$ – фазы токов нулевой последовательности в начале и в конце каждого из кабелей многокабельной линии.

Однако, недостатком данного принципа является необходимость использования идеальных трансформаторов тока нулевой последовательности, что практически неосуществимо в условиях действующего производства. Кроме того, для реализации данного принципа необходимо обеспечить физический канал связи между полуккомплектами защиты, устанавливаемыми на концах кабельной линии. В случае отсутствия физического канала связи между полуккомплектами возможно использование телефонной связи и сравнения величин фаз тока нулевой последовательности в режиме on-line. Однако, при такой реализации связи между полуккомплектами значительно снижается быстродействие защиты. В качестве главного принципа, заложенного в

алгоритм действия селективной защиты от ОЗЗ, должен быть использован тот факт, что в поврежденном кабеле фаза тока нулевой последовательности будет заметно отличаться от остальных.

Дифференциально-амплитудный принцип основан на том, что токи нулевой последовательности в поврежденном и в неповрежденных кабелях по амплитуде будут значительно отличаться между собой. При этом разница между током поврежденного и неповрежденных кабелей в начале и в конце кабельной линии будет величиной примерно постоянной.

$$\begin{aligned} I_{1н} &\gg I_{2н}, I_{1н} \gg I_{3н}, \\ I_{1к} &\gg I_{2к}, I_{1к} \gg I_{3к}, \\ I_{1н} - I_{2н} - I_{3н} &\approx I_{1к} - I_{2к} - I_{3к} \approx const, \end{aligned} \quad (7)$$

где $I_{1н}, I_{2н}, I_{3н}, I_{1к}, I_{2к}, I_{3к}$ – токи нулевой последовательности, протекающие по каждому из кабелей многокабельной линии в начале и конце.

В простейшем случае, при отсутствии физического канала связи между установленными полуккомплектами защиты, место замыкания можно определить исходя из того, что ток нулевой последовательности поврежденного кабеля больше суммы токов нулевой последовательности неповрежденных кабелей.

$$I_{1н} \geq I_{2н} + I_{3н} \approx const \quad (8)$$

Предложенные принципы действия релейной защиты позволили разработать методику, на основании которой с высокой степенью вероятности производится определение места ОЗЗ. Она сводится к тому, что при одновременном использовании дифференциально-амплитудного и дифференциально-фазового принципов при заранее известных конфигурации и параметрах сети определение места замыкания производится с высокой точностью и высокой степенью вероятности.

Данная методика положена в основу работы устройства защиты многокабельных линий Signnet S55, которое успешно прошло тестовые проверки в условиях ОАО «ММК им. Ильича».

Выводы

1. Создана математическая модель, позволяющая исследовать процессы, протекающие при данном аварийном режиме работы электрических сетей, по результатам предложены дифференциально-фазовый и дифференциально-амплитудный принципы действия релейной защиты от однофазных замыканий на землю.
2. На основании предложенных принципов разработана методика, позволяющая с высокой степенью вероятности определить место повреждения при возникновении однофазного замыкания на землю в многокабельной линии сети с изолированной нейтралью.
3. Разработана селективная защита от однофазных замыканий на землю в многокабельной линии, в основу работы которой положена методика определения места ОЗЗ.

Перечень ссылок

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: Учеб. пособие для вузов / А.М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 486 с.
2. Гельфанд Я.С. Релейная защита распределительных сетей / Я.С. Гельфанд. – М.: Энергия, 1975. – 356 с.
3. Шалин А.И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6 – 35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит / А.И. Шалин // Новости электротехники. – 2005. – № 3 (33) – С. 7 – 12.
4. Шалин А.И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6 – 35 кВ. Направленные защиты. Особенности применения / А.И. Шалин // Новости электротехники. – 2005. – № 6 (36). – С. 19 – 25.
5. Попов И.Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов / И.Н. Попов, В.Ф. Лачугин, Г.В. Соколова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

Рецензент: С.В. Гулаков
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 06.03.2008