

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т.Ф.ГОРБАЧЕВА»

Кафедра электроснабжения горных и промышленных предприятий

Б. В. Соколов

ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–35 кВ

Методические указания к лабораторной работе

Рекомендовано учебно-методической комиссией
направления 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника»
в качестве электронного издания для использования
в учебном процессе

Кемерово 2013

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Е. Г. Медведев – доцент кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий

И. Ю. Семыкина – председатель учебно-методической комиссии направления подготовки 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника»

Соколов Борис Васильевич. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6–35 кВ: методические указания для проведения лабораторных занятий [Электронный ресурс]: для студентов очной формы обучения направления 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника» / Б. В. Соколов. – Электрон. дан. – Кемерово: КузГТУ, 2013. – 36 с. – Электрон. опт. диск (CD-ROM); зв. ; цв. ; 12 см. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 8 Мб; Windows 95; (CD-ROM-дисковод); мышь. - Загл. с экрана.

Составлено в соответствии с программой дисциплины «Специальные вопросы релейной защиты и автоматики в системах электроснабжения» и предназначено для проведения лабораторной работы и самостоятельной подготовки студентов по изучению устройств релейной защиты и автоматики.

Представлены основные теоретические сведения о параметрах сети с изолированной нейтралью в нормальном и аварийном режимах.

Рассмотрены принципы работы и особенности построения защит от замыкания на землю, приведены общие методические указания, необходимые справочные материалы и основные расчетные формулы для расчета защит в сети с изолированной нейтралью.

Лабораторная работа № 7 «ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–35 кВ»

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Уяснение параметров сетей 6–35 кВ при работе в нормальном режиме и при возникновении в них однофазных замыканий на землю.
2. Изучение принципов работы и области применения защит, применяемых в сетях 6–35 кВ.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Общая характеристика электрических сетей 6 (10, 35) кВ

Сети с изолированной нейтралью в зависимости от значения установившегося емкостного тока замыкания на землю, выполняются с изолированной или с компенсированной нейтралью. Находят применение также сети с резистивным заземлением нейтрали.

Преимуществами рассматриваемых сетей является возможность их длительной работы без отключения однофазных замыканий на землю, доля которых достигает (60...90) % общего числа повреждений.

В сетях с глухозаземленной нейтралью (напряжением 110 кВ и выше, а также в сетях 0,23–0,4 кВ) однофазные короткие замыкания (ОКЗ) сопровождаются весьма большими токами. Эти однофазные КЗ должны безусловно отключаться автоматически и как можно быстрее.

В отличие от сетей с глухозаземленной нейтралью в электрических сетях 6–35 кВ, работающих, как правило, с изолированной или компенсированной нейтралью, значения токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) сравнительно малы (порядка 20...30 А), так как емкостные токи замыкаются через достаточно большие сопротивления емкостей фаз сети относительно земли. Поэтому сети

этих классов напряжения называют сетями с малым током замыкания на землю.

Создание универсальной селективной (избирательной) защиты от ОЗЗ с высокой чувствительностью и надежно функционирующей в любых сетях с малыми токами замыкания на землю представляет собой достаточно трудоемкую задачу, которая предполагает сложную (разветвленную) сеть при наличии в ней разных типов электроустановок (воздушные и кабельные линии, генераторы и электродвигатели), работающих с различными режимами заземления нейтральных точек (изолированная, резонансно заземленная или частично заземленная нейтрали).

Особые трудности при выполнении селективных защит от ОЗЗ возникают в сетях 6(10) кВ с резонансно заземленной нейтралью, где ток повреждения промышленной частоты полностью (частично) компенсируется током дугогасящего реактора (ДГР). Дополнительные трудности возникают при необходимости селективного отключения (определения) присоединения с ОЗЗ в электрических сетях сложной конфигурации при отсутствии на присоединении кабельной вставки, необходимой для установки трансформатора тока нулевой последовательности и при часто меняющейся первичной схеме защищаемой сети.

ОЗЗ имеют некоторые особенности, которые затрудняют выявление поврежденного элемента. Они могут быть: металлическими, через переходное (активное) сопротивление, дуговыми (устойчивыми или перемежающимися). Вследствие значительных перенапряжений в этих сетях могут возникать междуфазные КЗ и двойные замыкания на землю. Это характерно прежде всего для сетей с изолированной нейтралью, имеющих значительные емкостные токи. Поэтому в [2] нормируются значения емкостных токов: до 10 А – в сетях напряжением 35 кВ; до 20 А – в сетях напряжением 10 кВ и до 30 А в сетях напряжением 6 кВ. При указанных значениях (уровнях) токов работа в таких сетях считается допустимой. В противном случае следует принимать меры по их компенсации, т. е. уменьшению, например, путем включения в нейтраль дугогасящего реактора.

В настоящее время в системах электроснабжения эксплуатируются различные устройства защиты от ОЗЗ. В них в качестве воздействующих величин обычно используют установившиеся значения тока и напряжения нулевой последовательности (ненаправленные защиты нулевой последовательности). На практике находят применение защиты, реагирующие на высшие гармонические составляющие (содержащиеся в установившемся токе замыкания на землю), направленные защиты (действующие в зависимости от тока и направления мощности переходного процесса) и устройства защиты, использующие при замыканиях на землю искусственно созданные токи определенной частоты (100 или 25 Гц).

1.2. Установившийся (нормальный) режим работы линии

Рассмотрим линию электропередачи с изолированной нейтралью. Для упрощения анализа будем считать, что она работает в режиме холостого хода (токи нагрузки отсутствуют), а падения напряжений на линии от емкостных токов очень малы (активные и реактивные сопротивления линии близки к нулю) и ими можно пренебречь. Емкости фаз источников питания также не будем учитывать в виду их малости.

Можно полагать, что фазы линии (сети) симметричны по отношению к земле (а также между собой) и имеют равномерно распределенные емкости, которые условно можно заменить эквивалентными сосредоточенными емкостями: $C_A = C_B = C_C = C$.

Можно считать, что при принятых ограничениях напряжения фаз относительно земли в любой точке линии (в том числе и в точке подключения эквивалентных конденсаторов) равны соответствующим фазным напряжениям и ЭДС источника питания.

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A, \quad \dot{U}_B = \dot{E}_B, \quad \dot{U}_C = \dot{E}_C. \quad (1)$$

При принятых предположениях фазные напряжения в любой точке линии образуют симметричную звезду векторов, сумма которых равна нулю.

Под воздействием фазных ЭДС E_ϕ во всех фазах линии проходят емкостные токи, опережающие соответствующие ЭДС на 90° :

$$\dot{I}_A = j\omega C \dot{U}_A, \quad \dot{I}_B = j\omega C \dot{U}_B, \quad \dot{I}_C = j\omega C \dot{U}_C. \quad (2)$$

Схема линии и векторная диаграмма в нормальном режиме работы линии показаны на рис. 1.

Система емкостных токов также является симметричной, а ток нулевой последовательности отсутствует:

$$\dot{I}_0 = (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)/3 = 0. \quad (3)$$

Напряжение нулевой последовательности также равно нулю:

$$\dot{U}_0 = (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)/3 = 0. \quad (4)$$

Напряжение нейтрали системы относительно земли U_N с учетом симметрии токов равно потенциалу нулевой точки трех емкостей, т. е. равно потенциалу земли и равно нулю $\dot{U}_N = 0$ (рис. 1).

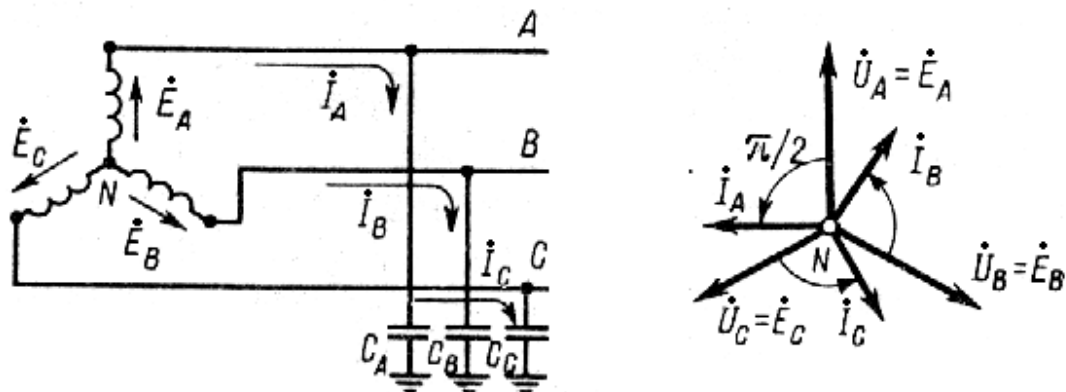


Рис. 1. Схема линии и векторная диаграмма в нормальном режиме работы

Место присоединения конденсаторов на емкостные токи практически не влияет, так как индуктивное и активное сопротивления линии ничтожно малы по сравнению с сопротивлением емкости фазы относительно земли.

1.3. Режим металлического ОЗЗ в линии

Пусть в произвольной точке К1 линии происходит металлическое ОЗЗ (на фазе А). В этом случае эта точка приобретает потенциал земли, т. е. напряжение поврежденной фазы становится равным нулю. Нейтраль системы при этом получает (по отношению к земле) смещение $\dot{U}_N^{(1)} = \dot{U}_A^{(1)} - \dot{E}_A = -\dot{E}_A$, т. е. напряжение нейтрали становится равным по значению и обратным по знаку напряжению (ЭДС) заземленной фазы (рис. 2).

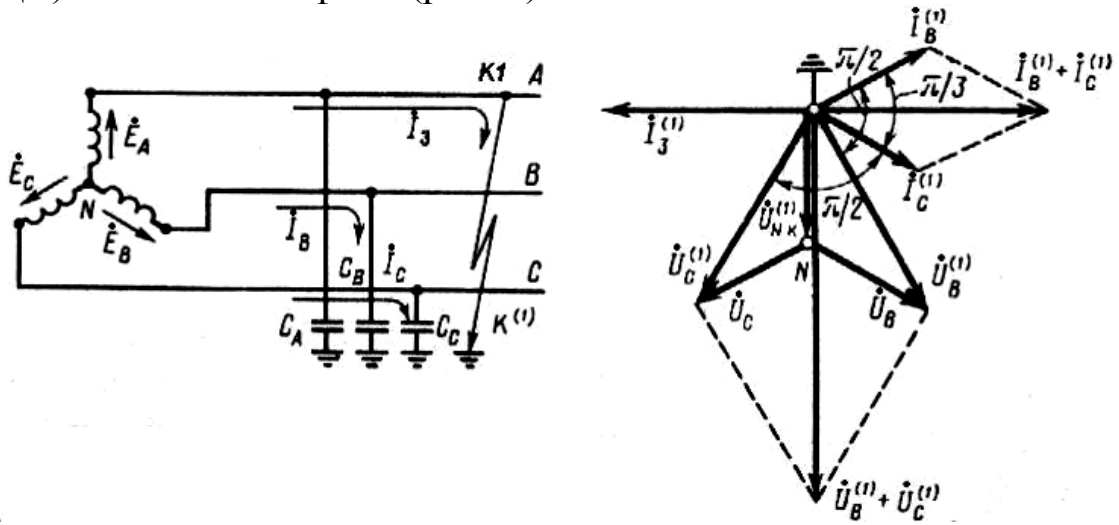


Рис. 2. Схема линии и векторная диаграмма при ОЗЗ на линии

Напряжения неповрежденных фаз (относительно земли за счет полученного при ОЗЗ смещения) становятся напряжениями относительно замкнувшейся фазы на землю и равны:

$$\dot{U}_B^{(1)} = \dot{U}_B + \dot{U}_N^{(1)} = \dot{E}_B - \dot{E}_A = \dot{U}_{BA};$$

$$\dot{U}_C^{(1)} = \dot{U}_C + \dot{U}_N^{(1)} = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \dot{U}_{CA};$$

$$|\dot{U}_B^{(1)}| = \sqrt{3}U_\phi; \quad |\dot{U}_C^{(1)}| = \sqrt{3}U_\phi; \quad \dot{U}_B^{(1)} + \dot{U}_C^{(1)} = 3\dot{U}_N^{(1)} = -3\dot{E}_A.$$

Таким образом, напряжения неповрежденных фаз относительно земли увеличились в $\sqrt{3}$ раз, а междуфазные напряжения остались неизменными (рис. 2). Напряжение нулевой последовательности будет равно:

$$\dot{U}_0^{(1)} = (\dot{U}_A^{(1)} + \dot{U}_B^{(1)} + \dot{U}_C^{(1)})/3 = -\dot{E}_A = \dot{U}_N^{(1)}. \quad (5)$$

Следовательно, появляется напряжение нулевой последовательности, которое по модулю и фазе оказывается равным напряжению нейтрали.

Определим токи в режиме металлического ОЗЗ.

Ток через емкость поврежденной фазы равен нулю, так как напряжение этой фазы относительно земли равно нулю (емкость фазы зашунтирована).

Токи неповрежденных фаз зависят от напряжений этих фаз относительно земли:

$$\dot{I}_B^{(1)} = Y_B \cdot \dot{U}_B^{(1)} = j\omega C \dot{U}_B^{(1)} = \sqrt{3}\omega C \dot{U}_B \exp(j^{\pi/3}); \quad (6)$$

$$\dot{I}_C^{(1)} = Y_C \cdot \dot{U}_C^{(1)} = j\omega C \dot{U}_C^{(1)} = \sqrt{3}\omega C \dot{U}_C \exp(j^{2\pi/3}). \quad (7)$$

Эти токи замыкаются через точку повреждения К1 и поврежденную фазу, образуя в земле ток $\dot{I}_3^{(1)}$.

При принятом условном положительном направлении этих токов (рис. 2), ток в земле с учетом (6, 7) равен:

$$\begin{aligned} \dot{I}_3^{(1)} &= 3\dot{I}_0^{(1)} = -(\dot{I}_B^{(1)} + \dot{I}_C^{(1)}) = -(j\omega C \dot{U}_B^{(1)} + j\omega C \dot{U}_C^{(1)}) = \\ &= -j\omega C (\dot{U}_B^{(1)} + \dot{U}_C^{(1)}) = +j\omega C 3E_A = 3\dot{I}_A. \end{aligned} \quad (8)$$

Этот ток опережает напряжение U_A по фазе на 90° и не зависит от положения точки повреждения на линии.

Таким образом, при возникновении металлического ОЗЗ можно констатировать факторы, которые следует учитывать при построении защиты от этих повреждений:

- напряжение поврежденной фазы становится равным нулю;
- напряжения неповрежденных фаз относительно земли увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, междуфазные напряжения остаются неизменными;
- появляется напряжение нулевой последовательности (6), равное по модулю и фазе напряжения смещения;
- токи через емкости неповрежденных фаз увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз (6, 7);
- возникает ток нулевой последовательности (8);

– токи $I_B^{(1)}$, $I_C^{(1)}$, $I_3^{(1)}$ проходят в фазах поврежденной линии между источником питания и местом присоединения конденсаторов эквивалентной схемы и представляют собой уравновешенную систему трех векторов $\dot{I}_3^{(1)} + \dot{I}_B^{(1)} + \dot{I}_C^{(1)} = 0$;

– на участке между точкой повреждения К1 и местом подключения конденсаторов (рис. 2) проходит только ток $I_3^{(1)}$ по поврежденной фазе (т. е. на этом участке кроме токов прямой и обратной последовательности проходит ток нулевой последовательности).

Распределение токов нулевой последовательности в случае одиночной линии показано на рис. 3.

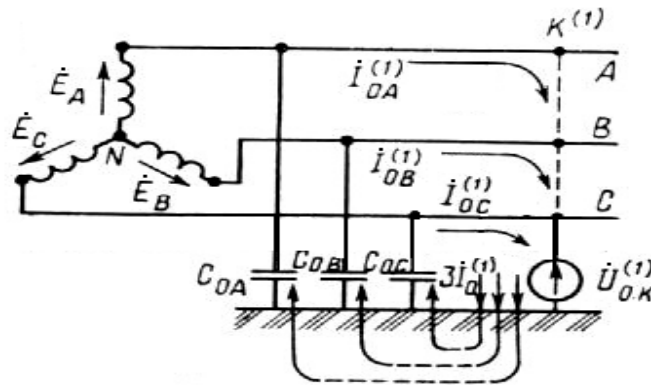


Рис. 3. Распределение токов нулевой последовательности при ОЗЗ на линии

Заметим, что ток нулевой последовательности представляет собой по существу однофазный ток, который разветвляется между тремя проводами (фазами) и возвращается в источник напряжения нулевой последовательности через землю и параллельные ей цепи. Токи нулевой последовательности имеют одинаковую величину и направление во всех фазах, а для циркуляции их в трехфазной цепи требуется дополнительный обратный провод. При ОЗЗ им обычно служит земля (заземляющие проводники, металлические оболочки).

На практике ОЗЗ обычно происходят через активные переходные сопротивления ($R_{\text{пер}} \neq 0$). При этом напряжение поврежденной фазы относительно земли снижается не до нуля (как это было

показано выше), а напряжение неповрежденных фаз относительно земли становится больше фазного, но меньше межфазного. Поэтому напряжение смещения нейтрали и напряжение нулевой последовательности оказываются меньше фазного. Это уменьшение оценивают коэффициентом полноты замыкания на землю: $\beta = U_{OK}^{(1)} / U_{\Phi} \leq 1$.

1.4. Распределение токов нулевой последовательности в сети

Рассмотрим сеть, состоящую из трех линий W1, W2, W3, подключенных к шинам генераторного напряжения (рис. 4).

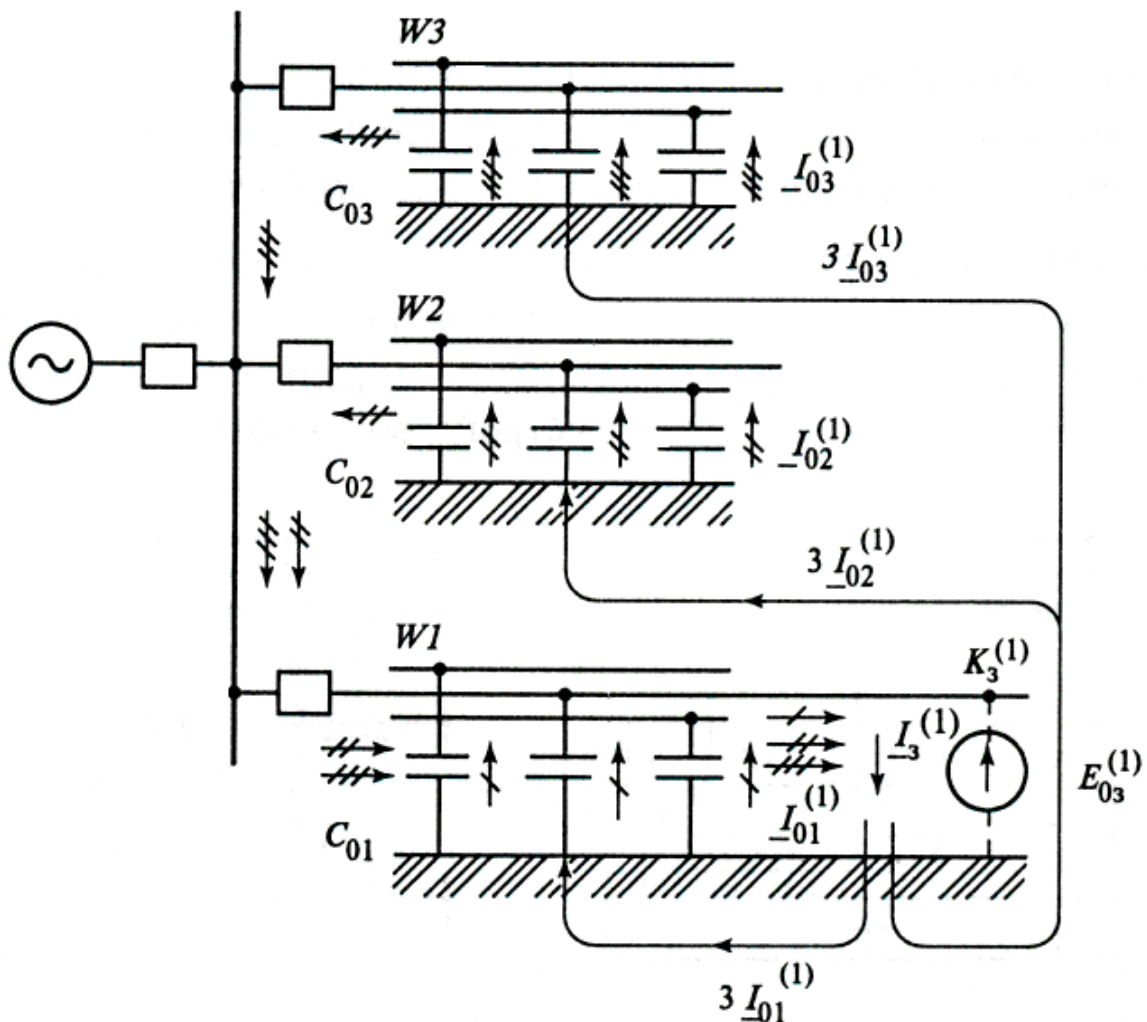


Рис. 4. Распределение токов нулевой последовательности

при ОЗЗ в сети

Пусть на линии W1 в точке K1 произошло ОЗЗ. Через место повреждения проходит ток $\dot{I}_3^{(1)}$. Он обусловлен как емкостью C_{01} поврежденной линии W1, так и емкостями неповрежденных линий C_{02} , C_{03} , и равен сумме токов нулевой последовательности всех трех линий:

$$\dot{I}_3^{(1)} = \sum_{i=1}^N 3\dot{I}_{0i}^{(1)} = 3\dot{I}_{01}^{(1)} + 3\dot{I}_{02}^{(1)} + 3\dot{I}_{03}^{(1)}$$

$$\dot{I}_3^{(1)} = \sum_{i=1}^3 3\dot{I}_{0i}^{(1)} = 3\dot{I}_{01}^{(1)} + 3\dot{I}_{02}^{(1)} + 3\dot{I}_{03}^{(1)},$$

где $\dot{I}_{0i}^{(1)} = j\omega C_{0i} U_\phi$ ($i = 1, 3$). В общем случае количество линий может быть произвольное. Токи нулевой последовательности (НП) распределяются следующим образом (рис. 4). При выбранном условном положительном направлении тока $\dot{I}_3^{(1)}$ (к месту повреждения) токи НП неповрежденных линий $3\dot{I}_{02}^{(1)}$ и $3\dot{I}_{03}^{(1)}$ проходят через емкости C_{02} и C_{03} к шинам подстанции и далее по поврежденной линии W1 от шин (через защиту линии) к месту ОЗЗ (к точке K1).

Ток $3\dot{I}_{01}^{(1)}$, как и в случае одиночной линии проходит только на участке между местом повреждения K1 и точкой присоединения конденсаторов C_{01} .

Следовательно, от шин по поврежденной линии проходит результирующий (эквивалентный) ток, который определяется суммарной емкостью всех неповрежденных линий:

$$\dot{I}_{0эkv}^{(1)} = 3\dot{I}_{02}^{(1)} + 3\dot{I}_{03}^{(1)} = j3\omega \dot{U}_\phi (C_{02} + C_{03}) = j\omega C_{0эkv} \dot{U}_\phi, \quad (9)$$

где $C_{0эkv} = C_{02} + C_{03}$ – эквивалентная емкость трех фаз всей электрически связанной сети (без учета в ней емкостей поврежденной линии).

Если замыкание происходит на другой линии (W2 или W3), то по неповрежденной линии W1 к шинам будет проходить ток $3I_{01}^{(1)}$, т. е. собственный емкостной ток линии. Важно иметь в виду тот факт, что в неповрежденной линии ток нулевой последовательности проходит из линии в шину, а в поврежденной – наоборот (из шины в линию).

1.5. Расчет емкостных токов

Значение емкостного тока линии и, соответственно, суммарного емкостного тока линий всей сети можно ориентировочно определить по эмпирическим формулам:

$I_C = I_3^{(1)} = U\ell/350$ – для воздушных сетей, $I_C = I_3^{(1)} = U\ell/10$ – для кабельных сетей, где U – номинальное напряжение сети 6, 10 кВ, ℓ – длина линий, км.

Для более точной оценки значения емкостного тока линий следует использовать данные табл. 1, 2, в которых приведены удельные значения емкостных токов.

Таблица 1

Удельные средние значения емкостного тока металлического однофазного замыкания на землю для кабельных линий

Сечение жилы кабеля, мм ²	Ток, А/км (при номинальном напряжении сети, кВ)		
	6	10	35
16	0,31	0,43	
25	0,43	0,56	
35	0,49	0,63	
50	0,56	0,73	
70	0,73	0,87	
95	0,89	1,02	3,81
120	1,0	1,16	4,57
150	1,19	1,3	4,95

Таблица 2

Удельные средние значения ёмкостного тока металлического
однофазного замыкания на землю одной фазы ВЛ

Тип линии	Ток, А/км (при номинальном напряжении сети, кВ)		
	6	10	35
Одноцепная линия без троса	0,013	0,025	0,1
с тросом	—	0,032	0,12
Двухцепная линия без троса	0,017	0,035	0,14
с тросом	—	—	0,15

Если в сети имеются крупные электродвигатели напряжением 6 или 10 кВ, то следует учитывать их собственные емкостные токи. Собственный емкостной ток электродвигателя (при внешнем ОЗЗ и соответствующем уровне напряжения) можно ориентировочно определить по эмпирической формулам:

$$I_{с.дв.} \approx 0,017 \cdot S_{н.дв.} - \text{при } U_{н.дв.} = 6 \text{ кВ};$$

$$I_{с.дв.} \approx 0,03 \cdot S_{н.дв.} - \text{при } U_{н.дв.} = 10 \text{ кВ},$$

где $I_{с.дв.} = \frac{P_{н.дв.}}{\cos \varphi \eta}$.

Например, у двигателя мощностью $P = 5$ МВт напряжением 10 кВ собственный емкостной ток примерно равен $I_{с.дв.} = 0,17$ А.

2. ЗАЩИТА ОТ ОЗЗ В СЕТЯХ 6–35 кВ

2.1. Общие положения

Защита от ОЗЗ в сетях 6–35 кВ согласно [3] может выполняться в виде: селективной защиты, действующей на отключение поврежденного присоединения (когда это необходимо по требованиям

безопасности); селективной защиты, действующей на сигнал; устройства контроля изоляции.

В сетях 20–35 кВ защита от однофазных замыканий на землю выполняется, как правило, с действием на сигнал [3].

В сетях с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, рекомендуется применять устройства сигнализации замыканий на землю типов УСЗ-2/2 и УСЗ-3М, реагирующие на сумму высших гармоник в токе замыкания на землю.

В сетях с изолированной нейтралью целесообразно применять защиту на основе реле типа РТЗ-51 (если обеспечивается необходимая чувствительность защиты) в сочетании с устройствами типа УСЗ-3М.

Токовое реле РТЗ-51 рекомендуется устанавливать на одиночных линиях.

Для защиты линий, отходящих от шин РП и ГПП, следует предусматривать направленную токовую защиту нулевой последовательности типа ЗЗП-1М.

ОЗЗ представляют большую опасность для оборудования электрических сетей и находящихся вблизи места их возникновения людей и животных. В связи с этим необходимо либо быстрое автоматическое отключение ОЗЗ, либо незамедлительное определение дежурным персоналом поврежденного присоединения с ОЗЗ с последующим его отключением [3]. В последнем случае (при неселективной защите) выполняется поочередное кратковременное отключение линий (фидеров) и измерение (фиксация) напряжения нулевой последовательности. При наличии селективной защиты определение поврежденного присоединения выполняется по показаниям сигнальных элементов.

При построении защиты (или сигнализации) от ОЗЗ, в зависимости от режима работы нейтрали, используются принципы контроля (измерения) следующих параметров: тока нулевой последовательности (НП) промышленной частоты, напряжения НП, мощности НП промышленной частоты, гармонических составляющих в токе ОЗЗ всех присоединений, переходных токов и напряжений НП при возникновении ОЗЗ. Во всех этих случаях в защитах от ОЗЗ воздей-

ствующий сигнал получается от первичных измерительных преобразователя, в качестве которых выступает фильтр напряжения НП (ФННП) и фильтр тока НП (ФТНП).

2.2. Особенности построения фильтров нулевой последовательности

ФННП обычно выполняется в виде трехфазного пятистержневого трансформатора напряжения, имеющего дополнительные обмотки, включенные по схеме разомкнутого треугольника. ФТНП может выполняться в двух вариантах: классическим способом (в виде трех трансформаторов тока, включенных на фазные токи) или в виде специального трансформатора тока нулевой последовательности типа ТНП (TAZ).

Токовые цепи защит подключаются к сети через ФТНП, а цепи напряжения – через ФННП (для защиты ЗЗП-1М – дополнительно через вспомогательное устройство типа ВУ-І).

ФТНП выделяет действующее значение полного тока нулевой последовательности промышленной частоты ($3I_0$). Принцип его работы заключается в геометрическом суммировании вторичных токов трех фаз защищаемого присоединения. Такой фильтр имеет существенные недостатки. К ним относятся: большой ток небаланса (как следствие наличия токов намагничивания), достигающий значений, соизмеримых с уровнем полезного сигнала в условиях ОЗЗ; сложность выделения малого тока замыкания на землю (так как используемые трансформаторы тока имеют относительно большой коэффициент трансформации). Кроме того, значительная часть вторичного тока поврежденной фазы рассеивается во вторичных обмотках трансформаторов тока неповрежденных фаз. Поэтому ФТНП практически не применяются в сетях с малыми токами замыкания на землю. В этих сетях находят применение в основном трансформаторы тока нулевой последовательности ТНП.

Принцип работы ТНП заключается в геометрическом суммировании магнитных потоков, образованных первичными токами

трех фаз. При этом результирующая магнитодвижущая сила первичной обмотки пропорциональна сумме токов трех фаз.

Первичной обмоткой данных трансформаторов тока являются токопроводы трех фаз защищаемого присоединения (кабеля). Вторичная обмотка их располагается на ферромагнитном сердечнике, имеющем тороидальную (кольцевую), прямоугольную или квадратную формы. Сердечник (ленточный или шихтованный) изготавливается из стали, феррита или пермаллоя.

В нормальном режиме геометрическая сумма первичных токов (и соответствующих магнитных потоков) равна нулю, и ЭДС во вторичной обмотке отсутствует. При ОЗЗ образуется ток НП (5), и в сердечнике ТНП появляется результирующий поток $\Phi_{рез}$, который во вторичной обмотке наводит ЭДС, пропорциональную первичному току $3I_0$. Под воздействием наведенной ЭДС вторичный ток ТНП поступает в измерительный орган защиты.

Вследствие неидеальности конструкции ТНП и неточности его расположения на кабеле во вторичной обмотке реального ТНП может наводиться ЭДС и в нормальных условиях (даже при равенстве первичных токов и при отсутствии $3I_0$).

Неодинаковость потоков рассеяния для разных фаз приводит к появлению несимметрии потоков, замыкающихся по сердечнику и, соответственно, к появлению ЭДС во вторичной обмотке ТНП при отсутствии токов нулевой последовательности в защищаемом кабеле.

При отсутствии тока нулевой последовательности во вторичной цепи ТНП образуется ток небаланса, который зависит в данном режиме от наличия симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей данного присоединения.

ЭДС и токи небаланса во вторичных обмотках ТНП могут появляться также вследствие влияния различных наводок, источниками которых могут быть: внешние магнитные поля (от близко расположенных токоведущих частей), блуждающие и сварочные токи и др. Небаланс может возникать при коммутационных переключениях в сети, при отключениях трехфазных КЗ, связанных с землей,

Таблица 3

Основные технические характеристики ТНП

Параметры	ТЗЛК-05.1	ТЗЛ-1	ТЗЛ-200	ТЗРЛ	ТЗЗ-2	ТЗЗ-4
Номинальная частота, Гц	50	50 (60)	50 (60)	50(60)	50 (60)	
Коэффициент трансформации	25/1	25/1	60/1	30/1	20/1	
Число охватываемых кабелей	1	1	1	1	2	4
Диаметр охватываемых кабелей, мм	до 65	до 65	до 200	до 70	до 50	
Климатическое исполнение	0	0	У2 , Т2	У3	У3	
Масса, кг	2,4	3,3±0,2	9,8	6,8	60	

2.3. Токовая ненаправленная защита нулевой последовательности

Принципы работы и особенности построения защиты от замыкания на землю определяются воздействующей величиной (величинами), на которую она реагирует. Степень сложности и функциональные возможности (свойства) защиты зависят от степени точности определения параметров воздействующих величин и диапазонов их изменения (существования).

Для построения защиты от ОЗЗ линии (в сети) можно использовать токовую ненаправленную защиту нулевой последовательности, если суммарный емкостной ток (при минимальной конфигурации сети) существенно превышает собственный емкостной ток линии (фидера) при внешнем ОЗЗ ($I_{0э\kappa\phi}^{(1)} > I_{01}^{(1)}$). На практике это пре-

вышение принимают равным 8...10. При этом важно учитывать, что эта защита не должна срабатывать при внешнем ОЗЗ (т. е. при повреждении на другом присоединении сети, когда через защищаемую линию проходит ток НП, обусловленный собственной емкостью этой линии $3I_{0L}^{(1)} = 3I_{0L}^{(1)}$). Предполагается выполнять защиту без выдержки времени.

С этой целью первичный ток срабатывания защиты выбирают из условия несрабатывания защиты от броска собственного емкостного тока линии при внешнем перемежающемся замыкании на землю по выражению:

$$I_{CЗ} = K_{отс} K_{бр} 3I_{0L}^{(1)} = K_{отс} K_{бр} I_{сфид}, \quad (10)$$

где $K_{отс} = 1,1...1,2$ – коэффициент отстройки; $I_{0L}^{(1)}$ – собственный емкостной ток фидера; $K_{бр}$ – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ (принимается равным: 3...5 – для реле РТ-40; 2...3 – для реле РТЗ-51; 1...1,5 – для современных цифровых реле (терминалов) серии SPACOM); $I_{сфид}$ – емкостной ток фидера (см. табл. 1, 2).

Основные параметры реле РТЗ-51: номинальное напряжение питания постоянного тока – 220 В, переменного тока – 100 В; номинальный ток – 0,1 А; номинальная частота – 50 или 60 Гц; пределы регулирования тока срабатывания 0,02...0,12 А, шаг уставки – 6 мА.

В воздушных сетях 6–10 кВ токовые ненаправленные защиты нулевой последовательности используются сравнительно редко, т. к. для включения измерительного органа защиты требуется кабельная «вставка» для включения кабельного ТНП (Ферранти). В этом случае следует учитывать, что в воздушных сетях емкостные токи (и, следовательно, токи НП) при ОЗЗ сравнительно малы, но значительно большее значение имеет ток небаланса фильтра тока нулевой последовательности ТТНП.

Для защит воздушных ЛЭП ток срабатывания следует выбирать по формуле:

$$I_{сз} \geq K_{отс} \cdot (K_{бр} \cdot I_{сфид.макс} + I_{нб}), \quad (11)$$

где $I_{нб}$ – ток небаланса ФТНП.

Чувствительность защиты от ОЗЗ оценивают коэффициентом чувствительности

$$K_{\text{ч}} = 3I_{0\text{экв}}^{(1)} / I_{\text{сз}}, \quad (12)$$

где $K_{\text{ч}} \geq 1,5$ – для воздушной линии; $K_{\text{ч}} \geq 1,25$ – для кабельной линии. Следует иметь в виду, что ток $I_{0\text{экв}}^{(1)}$ определяется по режиму с минимально возможным числом присоединений в сети.

2.4. Направленная защита нулевой последовательности

Токовая направленная защита нулевой последовательности применяется в сетях с изолированной нейтралью в тех случаях, когда в установившемся режиме собственный емкостный ток линии соизмерим с полным током замыкания на землю, т. е. когда ненаправленная токовая защита (реагирующая на установившееся значение емкостного тока) не работает в принципе.

Из анализа векторных диаграмм напряжения и тока нулевой последовательности (см. рис. 3) следует, что максимальной чувствительностью обладает реле направления мощности с внутренним углом $\alpha = \pi/2$. Поэтому для выполнения защиты требуется реле, подключаемое к фильтрам напряжения и тока нулевой последовательности.

Такую защиту можно применять в сетях с нейтральями, заземленными через дугогасящие реакторы. В этом случае для ее действия (при возникновении ОЗЗ) необходимо автоматически отключать дугогасящие реакторы или изменять на них ответвления так, чтобы емкостный ток, проходящий по поврежденной линии, оказался достаточным для срабатывания защиты.

Отключение дугогасящих реакторов не требуется, если для действия защиты используется не емкостный ток, а активная составляющая тока замыкания на землю, обусловленная потерями в дугогасящем реакторе и активной проводимостью фаз сети.

В схемах направленных защит можно использовать индукционные реле направления мощности, имеющие высокую чувствительность. Однако такие реле потребляют очень большую мощ-

ность, а защита в целом, как показывает опыт эксплуатации, работает ненадежно.

В настоящее время широкое применение находят следующие типы направленной защиты нулевой последовательности от замыкания на землю: ЗЗП-1, ЗЗП-1М, ЗЗН.

Рассмотрим защиту ЗЗП-1. Она выполнена на полупроводниковой элементной базе и предназначена для селективного отключения защищаемого присоединения при однофазных замыканиях на землю (в сетях торфяных разработок, карьеров, шахтных и тяговых сетях электрифицированного транспорта напряжением 2–10 кВ) с током замыкания на землю от 0,2 до 20 А.

Чувствительность этой защиты определяется минимальным первичным током замыкания на землю. Защита имеет малую потребляемую мощность, реагирует на первичный ток замыкания, находящийся в пределах 0,07...2 А и имеет три уставки первичного тока срабатывания: 1 – 0,07 А; 2 – 0,5 А; 3 – 2,0 А. Для выполнения требования по чувствительности ($K_{\text{ч}} \geq 2$) первичный ток срабатывания определяют по условию: $I_{\text{сз}} \leq 3I_{0\text{экв}}^{(1)} / K_{\text{ч}}$.

Защита выполнена в виде реле, подключаемого к защищаемому присоединению через фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. Она не имеет измерительного органа тока, а для исключения ее неправильного срабатывания входящее в нее реле направления мощности отстраивается от мощности небаланса, обусловленной погрешностями фильтров.

Принципиальная схема защиты представлена на рис. 6.

Она включает в себя: вторичный измерительный преобразователь тока нулевой последовательности (промежуточный трансформатор TAL), нагрузкой которого является согласующее устройство (конденсатор $C6$); двухкаскадный избирательный усилитель переменного тока (транзисторы $VT1$ и $VT2$); схему сравнения фаз (транзисторы $VT3$ и $VT4$), в которой производится сравнение двух электрических величин (пропорциональных току $3I_0$ и напряжению нулевой последовательности $3U_0$) и реагирующего (исполнительного) элемента EA .

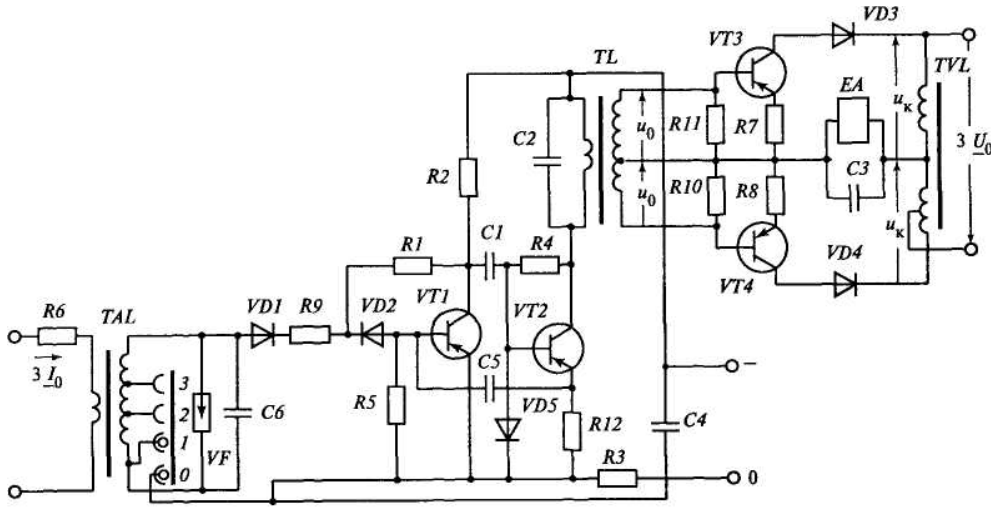


Рис. 6. Схема принципиальная защиты ЗЗП-1М

Согласующее устройство преобразует ток $3I_0$ в напряжение (на конденсаторе C_6), смещенное по фазе на угол $\pi/2$ относительно тока нулевой последовательности. Оно позволяет изменять ток срабатывания защиты (переключением количества витков обмотки трансформатора) и обеспечивает термическую стойкость защиты при двойных замыканиях на землю (разрядник VF).

Двухкаскадный усилитель переменного тока выделяет и усиливает составляющую промышленной частоты выходного напряжения согласующего устройства. Для этой цели на выходе усилителя включен резонансный контур C_2 - TL , настроенный на частоту $f_0 = 50$ Гц.

Схема сравнения осуществляет сравнение фаз двух синусоидальных величин: напряжения U_6 вторичной обмотки трансформатора TL , пропорционального току нулевой последовательности $3I_0$ и смещенного по фазе относительно него на угол $\pi/2$, и напряжения U_K автотрансформатора TVL , пропорционального напряжению нулевой последовательности $3U_0$. В ней производится сравнение времени совпадения t_c их мгновенных значений по знаку с установленным временем t_v . Реагирующий элемент EA срабатывает при $t_c > t_v$.

Из векторных диаграмм для тока $3I_0$ и напряжения $3U_0$ (рис. 7, а) следует, что при замыкании на защищаемой линии (через

защиту к точке замыкания) проходит ток $3I_{0экв}$, обусловленный емкостями неповрежденных линий, а сравниваемые напряжения U_6 и U_K совпадают по фазе (рис. 7, б). На неповрежденной линии ток $3I_{0л}$, обусловленный собственной емкостью линии, направлен к шинам, а сравниваемые ее защитой напряжения смещены по фазе на угол π (рис. 7, б). Из этого следует, что защита срабатывает, имея максимальную чувствительность, если угол сдвига фаз между U_6 и U_K равен нулю, и не действует при $\varphi = \pi$. Таким образом, зона срабатывания защиты определяется углом сдвига фаз $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$. На рис. 7, а, б она ограничена линией нулевой чувствительности, совпадающей с вещественной осью.

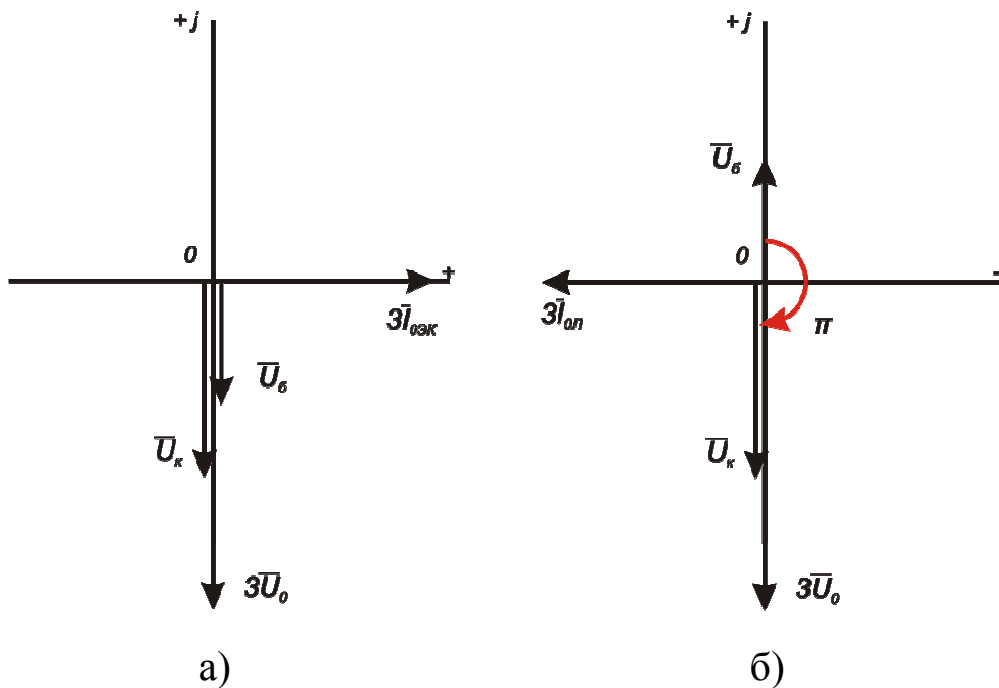


Рис. 7. Векторные диаграммы токов и напряжений в нормальном режиме (а) и при замыкании на землю (б)

При ОЗЗ на защищаемом присоединении первая гармоника основной частоты токового сигнала на выходе усилителя переменного тока совпадает по фазе с сигналом на выходе автотрансформатора $TV2$, соответствующем напряжению нулевой последовательности. В этом случае транзисторы $VT3$ и $VT4$ фазочувствительного усилителя работают попеременно в режиме усиления, обеспечивая

срабатывание исполнительного реле KL . При внешних замыканиях напряжение на выходе усилителя переменного тока находится в противофазе с напряжением нулевой последовательности, и транзисторы $VT3$ и $VT4$ находятся в закрытом состоянии, реле не срабатывает.

Ток срабатывания направленных защит от ОЗЗ следует определять по выражению:

$$I_{сз} \geq k_n(I_{н.б.расч.} + I_{н.б.нес.} + I_{н.б.смещ.}), \quad (13)$$

где $I_{н.б.расч.}$ – ток небаланса фильтра токов нулевой последовательности; $I_{н.б.нес.}$ – ток небаланса, вызванный несимметрией сопротивлений фаз относительно земли; $I_{н.б.смещ.}$ – ток, условно названный током небаланса из-за смещения нейтрали, вызванного влиянием параллельных линий.

Для защиты элементов ЗЗП-1М от высших гармоник, имеющих в напряжении $3U_0$, устройство следует подключать к ФННП через фильтр с резонансной частотой 50 Гц. Он подавляет высшие гармонические составляющие с частотой выше 50 Гц и выполняется в виде вспомогательного устройства ВУ-1, в которое входят дроссель с регулируемым воздушным зазором и последовательно включенный конденсатор. На одно устройство ВУ-1 может быть включено до 10 устройств ЗЗП-1М.

Для исключения опасного воздействия на устройства ЗЗП-1М перенапряжений, возникающих в первый момент замыкания на землю в сети 10 кВ, предусматривают небольшую задержку в подаче напряжения $3U_0$ на устройство ЗЗП-1М (с помощью максимального реле напряжения типа РН-53/60Д с уставкой 15 В).

Учитывая, что среднее удельное значение емкостного тока для воздушных сетей 10 кВ составляет на 1 км примерно 0,028 А, то для надежного срабатывания защиты ЗЗП-1(ЗЗП-1М) при минимальной ее уставке 0,2 А (первичных) необходимо, чтобы суммарная протяженность всех неповрежденных линий 10 кВ этой сети была бы не менее 20...25 км и, соответственно, суммарный емкостный ток $I_{сз} \geq 0,5...0,6$ А.

Вместо защиты ЗЗП-1М Чебоксарский электроаппаратный завод (ЧЭАЗ) выпускает усовершенствованную направленную защиту нулевой последовательности ЗЗН.

Эта защита предназначена для селективного отключения защищаемого присоединения при ОЗЗ в некомпенсированных сетях 3–10 кВ с первичным током замыкания на землю от 0,2 А (что соответствует минимальной суммарной длине неповрежденных кабельных линий сети 10 кВ – 0,2 км или воздушных линий – 7 км), при использовании кабельных ТНП.

Защита ЗЗН имеет два пусковых органа (ПО) (по току и напряжению) и фазочувствительный орган, которые работают по схеме "И". Она имеет три уставки по току (0,07 А; 0,25 А; 2,5 А) и три уставки по напряжению (10 В; 15 В; 20 В), встроенный блок питания, встроенное устройство экспресс-контроля и устройство сигнализации, указывающее на недопустимые небалансы в цепях тока и напряжения защиты, на наличие ОЗЗ в зоне действия защиты и на срабатывание выходного реле.

Защита ЗЗН имеет более широкую область применения, чем ЗЗП-1 (ЗЗП-1М) и не обладает ее недостатками.

2.6. Устройства сигнализации замыканий на землю

Устройства сигнализации замыканий на землю работают на принципе измерения (и, соответственно, реагирования) высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ [3]. Эти составляющие имеются и в токах нормального режима. Они обусловлены несинусоидальным характером ЭДС генераторов, токами намагничивания силовых трансформаторов и нагрузки. При ОЗЗ их содержание в сети резко увеличивается (и особенно в токе нулевой последовательности поврежденной линии). Это справедливо как для сети с изолированной, так и для сети с нейтралью, заземленной через ДГР.

В принципе устройства сигнализации могут реагировать либо на одну (определенную) гармонику, либо на все гармонические составляющие в токе ОЗЗ. На практике находят применение следующие устройства сигнализации замыканий на землю: УСЗ-2/2,

УСЗ-3М (УСЗ-3), предназначенные для селективной сигнализации ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР.

УСЗ-2/2 – индивидуальное устройство, которое включается через ТНП кабельного типа (Ферранти), основанное на принципе абсолютного замера.

УСЗ-3М – групповое устройство, состоящее из прибора, который поочередно подключается к ТНП каждого из кабелей (присоединений). Это дает возможность персоналу однозначно определить фидер с ОЗЗ по относительно большому показанию прибора (принцип относительного замера).

Устройство УСЗ-2/2 не нашло широкого применения из-за относительно большой стоимости, трудности выбора уставок, возможности неселективного срабатывания при дуговых ОЗЗ и других существенных недостатков.

Групповое устройство УСЗ-3М основано на измерении высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ (от 150 до 650 Гц). Оно нашло широкое применение в основном в кабельных сетях городов и промышленных предприятий.

Устройство УСЗ-3М (рис. 8) позволяет обнаружить только устойчивое замыкание на землю, но это не считается недостатком и не препятствует широкому применению этих устройств.

В настоящее время имеются устройства для одновременного измерения сумм высших гармоник на всех отходящих линиях, сравнения этих значений между собой и выявления поврежденной линии. Например, в цифровом терминале защиты линии для сетей с резонансно заземленной нейтралью SPAC 801.013 имеется токовая ненарушенная защита от замыканий на землю – аналог УСЗ, измеряющая высшие гармоники тока.

Следует иметь в виду, что эти устройства сигнализации не имеют элемента направления мощности. Поэтому на подстанциях с малым числом линий (причем, неидентичных) затруднительно обеспечить их селективную работу при ОЗЗ на какой-то из линий.

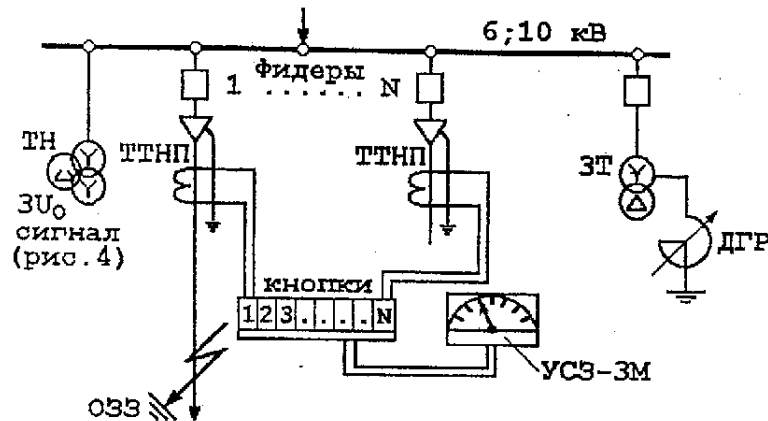


Рис. 8. Схема включения прибора УСЗ-3М. Кнопки с переключением без разрыва цепей

2.7. Общая неселективная сигнализация о замыкании на землю (устройство контроля изоляции)

Неселективная сигнализация о замыкании на землю обычно представляет собой устройство контроля изоляции. Она является простейшей (ненаправленной) защитой, которая не позволяет точно определить поврежденный участок (элемент СЭС) и действует, как правило, на сигнал (рис. 9).

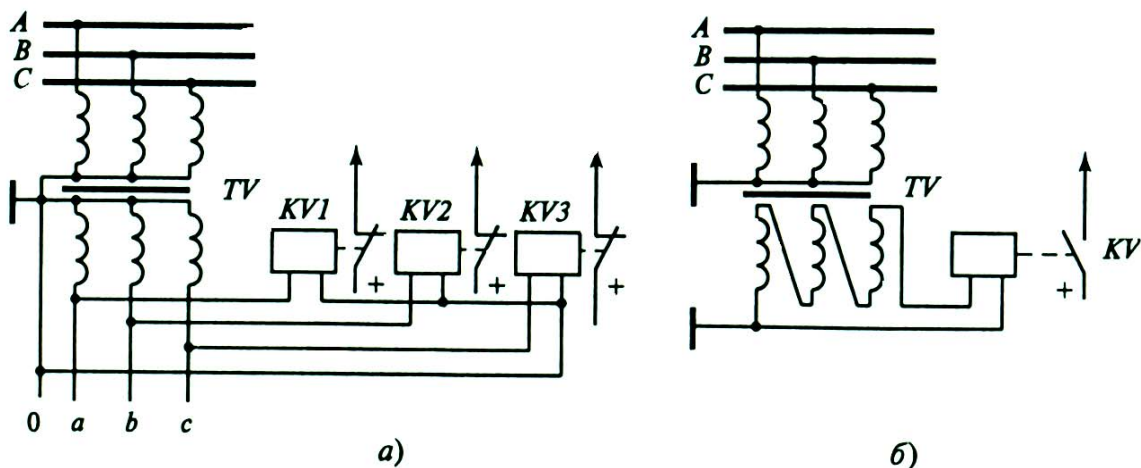


Рис. 9. Схемы устройств контроля изоляции: а – на основе трех минимальных реле напряжения; б – на основе напряжения нулевой последовательности (одно максимальное реле напряжения)

Защита этого класса реагирует на изменения напряжения фаз относительно земли. Работа их основана на том факте, что во всех точках электрически связанной сети при замыкании одной из фаз на землю напряжение фаз относительно земли будет изменяться примерно одинаково во всех точках сети. Поэтому в них отсутствует возможность определения поврежденного объекта, и они действуют неселективно (на сигнал).

Фактически в таких защитах осуществляется контроль состояния изоляции в системе. Появление «земли» на фазе приводит к резкому увеличению проводимости изоляции, что приводит, соответственно, к увеличению тока проводимости. При этом появляется напряжение нейтрали относительно земли и уменьшается (до нуля при металлическом замыкании) напряжение поврежденной фазы.

Для определения места повреждения при срабатывании такой защиты дежурный персонал производит поочередное отключение присоединений до пропадания «земли» на фазе и восстановления величины напряжения до нормального значения. Такой способ определения повреждения.

Устройство контроля изоляции фиксирует факт возникновения ОЗЗ по напряжению нулевой последовательности. Практически все устройства контроля изоляции выполняются с использованием трансформаторов напряжения (либо трехфазных пятистержневых, либо – трех однофазных, соединенных по схеме «разомкнутого треугольника»).

Устройство контроля изоляции может быть выполнено несколькими способами. Например, с помощью трех вольтметров, включенных на фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора напряжения, или трех реле напряжения минимального действия (рис. 9, а). В нормальном симметричном режиме все три вольтметра показывают одинаковые фазные напряжения. При замыкании одной фазы на землю показания вольтметра этой фазы резко понизятся вплоть до нуля при металлическом замыкании. Показания вольтметров других фаз увеличатся, вплоть до 1,73 фазного (при металлическом замыкании). Для получения звукового сигнала

при замыкании на землю в схему устройства может быть включено сигнальное реле.

Другим распространенным способом выполнения сигнализации замыканий на землю является использование дополнительной (третьей) обмотки трансформатора напряжения, соединенной по схеме разомкнутого треугольника, которая является фильтром напряжения нулевой последовательности $3U_0$ (рис. 9, б). В нормальном режиме сети при симметричных напряжениях фаз на выводах этой обмотки и на реле KV напряжение практически отсутствует (имеется только напряжение небаланса, значение которого обычно не превышает 1 В). Наличие этого напряжения свидетельствует об исправности трансформатора напряжения, отсутствии обрывов и замыканий в его вторичных цепях.

При однофазном металлическом замыкании на землю, например, провода фазы А напряжение этой фазы относительно земли становится равным нулю, напряжения неповрежденных фаз В и С увеличиваются в 1,73 раза, а их геометрическая сумма становится равной утроенному значению фазного напряжения. Для того, чтобы напряжение на реле KV в этих случаях не превышало стандартного номинального значения 100 В, трансформаторы напряжения с обмотками, соединенными по схеме «разомкнутый треугольник», имеют повышенный в 3 раза коэффициент трансформации.

Под воздействием напряжения нулевой последовательности, которое при металлическом замыкании достигает 100 В, максимальное реле напряжения KV срабатывает на сигнал или на отключение. Последнее выполняется на подстанциях, откуда питаются линии, отключаемые при замыканиях на землю по условиям техники безопасности. Защита по напряжению нулевой последовательности обычно является резервной по отношению к основным селективным защитам присоединений и действует на отключение подстанции или секции с выдержкой времени 0,5...0,7 с для отстройки от основной защиты.

В устройстве применяется реле KV , например, типа РН-53/60Д с минимальной уставкой 15 В.

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ

3.1. Векторная диаграмма токов и напряжений для линии в нормальном режиме работы.

3.2. Векторная диаграмма токов и напряжений для линии в режиме ОЗЗ.

3.3. Распределение токов нулевой последовательности в одиночной линии при ОЗЗ.

3.4. Составляющие токов на землю и путь их прохождения.

3.5. Распределение токов нулевой последовательности в сети при ОЗЗ.

3.6. Особенности построения и монтажа кабельного фильтра тока нулевой последовательности.

3.7. Принцип работы ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности. Ток срабатывания и коэффициент чувствительности защиты.

3.8. Принцип работы направленной защиты нулевой последовательности. Назначение функциональных узлов защиты ЗЗП-1М.

3.9. Принцип работы устройства сигнализации замыкания на землю.

3.10. Принцип работы устройства общей сигнализации о замыкании на землю.

3.11. Определение величины емкостного тока линии.

3.12. Назначение заземляющего провода при монтаже кабельного трансформатора нулевой последовательности.

4. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

4.1. Уяснить основные теоретические положения и кратко за-конспектировать их.

4.2. Ознакомиться со стендом, на котором проводится лабораторная работа.

4.3. Произвести расчет собственного и эквивалентного емкостных токов для заданной конфигурации сети (заполнить табл. 4).

4.4. Произвести расчет тока срабатывания реле РТЗ-51 и коэффициента чувствительности.

4.5. Произвести проверку срабатывания реле РТЗ-51 на заданной уставке.

4.6. Выполнить принципиальную схему защиты присоединения.

Таблица 4

Исходные и расчетные данные

Линия	Длина линии L , км	Сечение жилы кабеля, мм^2	Удельный емкостной ток $I_{уд}$, А/км	Собственный емкостной ток линии I_c , А	Эквивалентный емкостной ток сети I_c , А	Ток срабатывания защиты $I_{сз}$, А	Коэф. чувствительности K_χ
W1							
W2							
W3							
W4							
W5							
W6							
W7							
W8							
W9							

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторная работа проводится на специальном лабораторном стенде, который содержит (рис. 10):

- схему (модель) электроснабжения, изображенную на лицевой панели стенда с указанием номеров линий, мест установки защит и контуров циркуляции токов нулевой последовательностей;
- измерительные приборы и устройства защиты;
- панель для проверки тока срабатывания реле РТЗ-51;
- фрагмент СЭС с использованием защиты ЗЗП-1М.

Рис. 10. Схема лабораторного стенда

Перед проведением работы необходимо подготовить исходные данные (табл. 4).

Для проверки срабатывания реле РТЗ-51 (на заданной уставке) следует:

- включить питание реле (тумблером РТЗ-51 на панели);
- установить оцифрованную уставку (набором тумблеров);
- по амперметру РА установить требуемую величину тока ручкой «РЕГУЛИРОВКА ТОКА $3 I_0$ ».

Факт срабатывания реле подтверждается загоранием лампы «СРАБАТЫВАНИЕ РЕЛЕ».

В отчете по лабораторной работе следует представить:

- краткое описание основных теоретических положений, принципы действия защит и их схемы;
- исходные и расчетные данные в виде таблиц;
- результаты измерения параметров реле РТЗ-51;
- выводы по результатам работы.

6. ТЕСТОВЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ

1. Значение коэффициента $K_{бр}$, учитывающего бросок емкостного тока в момент возникновения ОЗЗ и принимаемого при расчете тока срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю: а – 2...3; б – 1; в – 5...6; г – < 1.

2. Величина броска емкостного тока определяется:

а – емкостью присоединения и индуктивностью источника; б – наличием дугогасящего реактора; в – наличием резистора, включенного в нейтраль маломощного трансформатора; г – потерями напряжения в сети.

3. Однофазное замыкание на землю приводит к появлению токов: а – прямой последовательности; б – обратной последовательности; г – нулевой последовательности; в – сверхтоков.

4. Чувствительность защиты ВЛ является достаточной при коэффициенте чувствительности K_η : а – $\geq 1,5$; б – 1,25...1,5; в – 1,1...1,25; г – < 1.

5. Чувствительность защиты характеризует: а – устойчивость срабатывания защиты при аварийном режиме в защищаемой зоне; б – надежность срабатывания защиты; в – возможность отключения выключателя; г – быстроту срабатывания защиты.

6. Защита линии от однофазных замыканий на землю устанавливается: а – в начале линии; б – в конце линии; в – в начале и в конце линии; г – на каждой опоре.

7. Направленная защита нулевой последовательности от замыкания на землю: а – ЗЗП; б – УСЗ; в – ОЗЗ; г – УЗО.

8. Направленная защита от замыканий на землю отличается от токовой защиты наличием: а – реле направления мощности; б – реле времени; в – трансформатора тока нулевой последовательности; г – промежуточного реле.

9. Ток срабатывания защиты – это: а – минимальный первичный ток в фазах линии, при котором защита срабатывает; б – расчетное значение тока однофазного замыкания на землю; в – максимальный первичный ток в фазах линии, при котором защита срабатывает; г – ток, равный значению уставки реле защиты.

10. Значение однофазного тока замыкания на землю $I_3^{(1)}$, при котором работа в сетях с изолированной нейтралью является допустимой: а – 20 А; б – 30 А; в – 10 А; г – < 5 А.

11. Достоинства специального (кабельного) трансформатора тока нулевой последовательности по сравнению с классическим фильтром тока нулевой последовательности: а – большие габариты; б – малые токи небаланса; в – отсутствие электромагнитных излучений; г – высокий коэффициент трансформации.

12. Принцип работы трехтрансформаторного фильтра тока нулевой последовательности: а – геометрическое суммирование вторичных токов трех фаз; б – разделение вторичных токов на симметричные составляющие; в – суммирование первичных токов трех фаз; г – сравнение первичных и вторичных токов.

13. Параметр, определяющий техническое совершенство защиты: а – габариты и вес; б – селективность защиты; в – периодич-

ность срабатывания; г – непрерывное сохранение работоспособного состояния.

14. Ток нулевой последовательности, протекающий от шин подстанции по поврежденной линии, определяется емкостью: а – поврежденной линии; б – всех неповрежденных линий; в – наиболее удаленной от места повреждения линии; г – отключенных линий.

15. При возникновении однофазных замыканий на землю содержание высших гармоник в сети: а – увеличивается; б – уменьшается; в – остается неизменным; г – увеличивается только в поврежденной линии.

16. Токовая защита, срабатывающая от гармонических составляющих тока нулевой последовательности, называется: а – ЗЗП; б – ЗЗГШ; в – УСЗ; г – УЗО.

17. Высшие гармоники, возникающие в токе при однофазном замыкании на землю, обусловлены: а – срабатыванием защиты от однофазных замыканий на землю; б – емкостным сопротивлением линии; в – токами намагничивания силовых трансформаторов; г – потерями напряжения в сети.

18. Первая уставка защиты ЗЗП-1М находится в диапазоне: а – $< 0,7$ А; б – $0,07 \dots 2$ А; в – $4,3$ А.

19. Защита УСЗ используется в сетях с нейтралью: а – заземленной через дугогасящий реактор; б – изолированной; в – глухозаземленной; г – эффективно заземленной.

20. Чувствительность защиты определяется: а – минимальным первичным током замыкания на землю; б – максимальным током замыкания на землю; в – током нулевой последовательности, проходящим по поврежденному участку; г – током утечки через ТТНП.

21. Зона срабатывания ЗЗП-1 определяется углом сдвига фаз: а – $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$; б – $0 \leq \varphi \leq \pi$; в – $\pi/2 \leq \varphi \leq \pi$; г – $-\pi/2 \leq \varphi \leq 0$.

22. Чувствительность защиты от однофазных замыканий на землю для кабельной линии является достаточной при K_q :

а – $\geq 1,25$; б – $1,15 \dots 1,25$; в – $1,1 \dots 1,15$; г – $1 \dots 1,1$.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев, А. В. Релейная защита в распределительных сетях [Электронный ресурс]: пособие для практических расчетов / А. В. Булычев, А. А. Наволочный. – М.: ЭНАС, 2011. – 206 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/58493>.
2. Юндин, М. А. Токовая защита электроустановок [Электронный ресурс]: учеб. пособие / М. А. Юндин. – СПб.: Лань, 2011. – 288 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1802.
3. Плащанский, Л. А. Основы электроснабжения. Раздел «Релейная защита электроустановок» [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Л. А. Плащанский. – М.: Московский государственный горный университет, 2008. – 143с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/99348>.
4. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учеб. для вузов / В. А. Андреев. – М.: Высш. шк., 2007. – 639 с.
6. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем: учеб. для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.