

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СЕЛЕКТИВНАЯ ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С КАТУШКОЙ ПЕТЕРСЕНА В НЕЙТРАЛИ

В.Ф. Сивокобыленко, докт.техн.наук, **В.А. Лысенко** канд.техн.наук
Донецкий национальный технический университет,
пл. Шибанкова, 2, Покровск, Донецкая обл., 85300, Украина.
E-mail: svf1934@gmail.com; viktor.lysenko@donntu.edu.ua

Разработана селективная защита от замыканий фазы на землю для компенсированных сетей, в которых традиционные защиты из-за влияния катушки Петерсена не обеспечивают их селективного действия. Используются цифровые узкополосные частотные фильтры, которые из напряжений и токов нулевой последовательности сети выделяют и усиливают составляющие с центральной частотой, выбранной из диапазона 150-300 Гц. Математическим моделированием установлено, что при таких частотах катушка Петерсена практически не уменьшает емкостной ток в поврежденном присоединении при замыкании на землю, как это имеет место при частоте 50 Гц. Передаточные функции фильтров напряжения и тока выбирают такими, чтобы обеспечивался сдвиг по фазе на 90 градусов между их выходными сигналами, а для устранения самовозбуждения фильтров их выполняют управляемыми в функции амплитуды напряжения нулевой последовательности. Выходной орган защиты реагирует на знак реактивной мощности, определяемой как произведение выходных сигналов фильтров тока и напряжения. Для исключения подачи дискретного сигнала на выходной орган защиты её выполняют двухканальной с подключением к каждому входному сигналу по два фильтра разного типа, выходные сигналы которых после перекрестного перемножения и последующего суммирования подают на двуполярный выходной орган, фиксирующий замыкание как в зоне защиты, так и вне её для самодиагностики. Работоспособность разработанной защиты подтверждена результатами математического моделирования, испытаниями на лабораторном стенде и правильностью действия при подаче натуральных сигналов, записанных с помощью цифровых регистраторов при замыканиях на землю в реальных сетях. Библ. 10, рис. 6, табл. 1.

Ключевые слова: компенсированная сеть, замыкания на землю, селективная защита, частотный фильтр, ток, напряжение, нулевая последовательность, реактивная мощность.

Актуальность проблемы и её связь с прикладными задачами. Распределительные электрические сети напряжением 6-35 кВ широко используются в большинстве стран мира для электроснабжения крупных промышленных предприятий (металлургических заводов, шахт, собственных нужд электростанций и др.), городского и сельского хозяйства. Преобладающим видом повреждений в этих сетях является однофазное замыкание фазы на землю (ОЗЗ), которое по данным [1, 2 и др.] составляет порядка 80% от общего числа повреждений изоляции. Для того чтобы при таких повреждениях сохранить электроснабжение потребителей, нейтраль сети выполняют изолированной, компенсированной, т.е. резонансно-заземленной через катушку Петерсена (называемую также «дугогасящий реактор»), заземленной через резистор или комбинированной (с параллельно подключенным к катушке Петерсена резистором). При этом наибольшими преимуществами обладают сети с компенсированной нейтралью, так как за счет компенсации емкостных токов катушкой Петерсена ограничивается величина и длительность протекания тока в месте замыкания, снижается вероятность перехода однофазного замыкания в междуфазное короткое. Для повышения надежности работы указанных сетей они должны быть оснащены защитами от замыканий на землю, чтобы обслуживающий персонал мог своевременно принять необходимые меры по устранению повреждения.

Принципы действия защит распределительных сетей от ОЗЗ основаны на измерении токов и напряжений нулевой последовательности, которые используют для простых токовых защит, направленных токовых или дистанционных. При этом защиты реагируют на параметры установившегося или переходного режима работы. Однако из-за сравнительно небольших измеряемых токов ОЗЗ, а также нестабильности параметров дугового замыкания проблема обеспечения селективного действия и необходимой чувствительности защит остается до настоящего времени в полной мере нерешенной. Особенно это касается компенсированных сетей, в которых знак мощности в поврежденном присоединении при ОЗЗ неоднозначен и зависит от соотношения емкостных токов сети и индуктивного тока катушки Петерсена. В этой связи для повышения надежности работы компенсированных сетей актуальным является разработка новых подходов и принципов действия защит от ОЗЗ, позволяющих

обеспечить их селективное действие при различной степени компенсации катушкой Петерсена емкостных токов сети.

Обзор публикаций и недостатки известных решений. В распределительных некомпенсированных сетях 6-35 кВ Украины используются в основном защиты, реагирующие на составляющие промышленной частоты – это простые токовые, выполненные на реле РТЗ-51, и токовые направленные, выполненные на реле ЗЗП-1М. Из-за трудности выбора уставок срабатывания этих защит и влияния переходных процессов при дугowych ОЗЗ процент их правильного действия, по нашим наблюдениям на нескольких подстанциях, составляет не более 50%. Известны токовые защиты для сетей с любым режимом работы нейтрали [3], дистанционные [4], а также реагирующие на сумму высших гармоник в установившемся токе ОЗЗ, выделенных с помощью частотных фильтров из диапазона частот от 150 до 650 Гц (реле типа УСЗ-2 и др.). Недостаток такого типа реле заключается в том, что они не фиксируют кратковременные пробой изоляции («клевики») и могут неселективно действовать при перемежающихся дугowych замыканиях. Эти же недостатки присущи микропроцессорным устройствам завода РЕЛСИС таким, как АЛ-4 (аналог РТЗ-51) и РЗЛ-04 с двухступенчатой направленной защитой от ОЗЗ и реагирующего, в основном, на составляющие промышленной частоты. В последние годы появились разработки многочисленных фирм: блоки микропроцессорных защит (БМПЗ) НТЦ «Механотроника», терминалы защит SEPAM фирмы Schneider Electric, защиты серии SPACOM производства «АББ Реле-Чебоксары», АБВ REF 541, 615 [5], а также реле фирмы ALSTOM и SIEMENS [6] и др. Эти терминалы обеспечивают защиту от междуфазных коротких замыканий и наряду с этим интегрируют в своем составе систему защиты от ОЗЗ. К их недостаткам относятся сложность устройств, дороговизна, неполная объективность рекламируемых характеристик, а также не в полной мере приспособленность к особенностям электроустановок Украины.

В компенсированных сетях в режимах точной компенсации и перекомпенсации емкостного тока с помощью катушки Петерсена в поврежденном присоединении индуктивная составляющая тока направлена в сторону шин, т.е. в таком же направлении, как и емкостные составляющие токов в неповрежденных присоединениях. По этой причине упомянутые выше направленные токовые защиты, основанные на контроле знака реактивной мощности, в таких сетях не обладают селективностью. Эти защиты при ОЗЗ [7 и др.] по своему принципу действия пригодны для использования, однако, в связи с низкой чувствительностью из-за небольших активных составляющих токов ОЗЗ и необходимостью применения специальных трансформаторов тока, они также не нашли применения. Поэтому для таких сетей некоторыми фирмами (АБВ REF и др.) разработаны защиты, основанные на контроле токов и напряжений в первые 2-2,5 миллисекунды начального участка переходного процесса. Но эти защиты требуют измерений входных величин с очень высокой частотой дискретизации, что усложняет их аппаратную реализацию и, кроме того, возможен отказ их в работе из-за зависимости выходного сигнала от момента возникновения ОЗЗ.

На наш взгляд, особого внимания для компенсированных сетей заслуживает микропроцессорная защита, предложенная французскими авторами и описанная в [7]. В этой защите входные напряжение и ток нулевой последовательности после аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) поступают на рекурсивные полосовые частотные фильтры для выделения составляющих тока и напряжения частоты 220 Гц. Фильтры выбраны с обеспечением углового сдвига по фазе на 90 градусов между их выходными сигналами, благодаря чему произведение последних пропорционально реактивной мощности, знак которой в поврежденном присоединении будет положительным, а в неповрежденном – отрицательным. Однако использование рекурсивных фильтров с положительными обратными связями из-за склонности к самовозбуждению может вызвать ложную работу защиты, например, при кратковременных пробоях изоляции («клевиках»), при исчезновении замыкания и др. Кроме того, выходной импульс защиты является дискретным, что требует его расширения и увеличения времени действия защиты. Таким образом, рассмотренные защиты от ОЗЗ требуют дальнейшего совершенствования.

Целью работы является разработка для распределительных компенсированных сетей 6-35 кВ микропроцессорной защиты от ОЗЗ, имеющей необходимую чувствительность и селективность действия независимо от степени компенсации емкостных токов сети катушкой Петерсена. Для решения поставленной задачи авторами предлагается дальнейшее развитие идеи использования полосовых частотных фильтров на основе исследования их характеристик с помощью математических моделей, основанных на [8, 9], и натурных испытаний опытных образцов.

Основной материал и полученные результаты. Так как на большинстве потребительских подстанций Украины установлены трансформаторы мощностью 32–80 МВА, а ёмкостью ток замыкания фазы на землю на стороне 6–10 кВ составляет порядка 40–100 А, то для анализа поведения разрабатываемой защиты при глухих и дуговых ОЗЗ воспользуемся фрагментами типовой компенсированной электрической сети 6 кВ, принципиальная схема которой показана на рис.1 и параметры которой можно изменять в широких пределах. Схема содержит питающий трансформатор (ветви 13, 14, 15), три отходящих фидера (Ф1, Ф2, Ф3) с фазными ёмкостями на землю соответственно равными 3, 8 и 12 мкФ и суммарной межфазной ёмкостью всех фидеров (ветви 10, 11, 12) 10 мкФ, а также катушку Петерсена (ветвь 16) с резонансной индуктивностью 0,1416 Гн. Каждая фаза кабельной линии и трансформатора представлена i -той ветвью ($i=1\dots 16$) с продольно включенными активным сопротивлением R_i и индуктивностью L_i , а также параллельно соединенными и подключенными к заземляющему контуру ёмкостью C_i и активным сопротивлением изоляции R_{ci} .

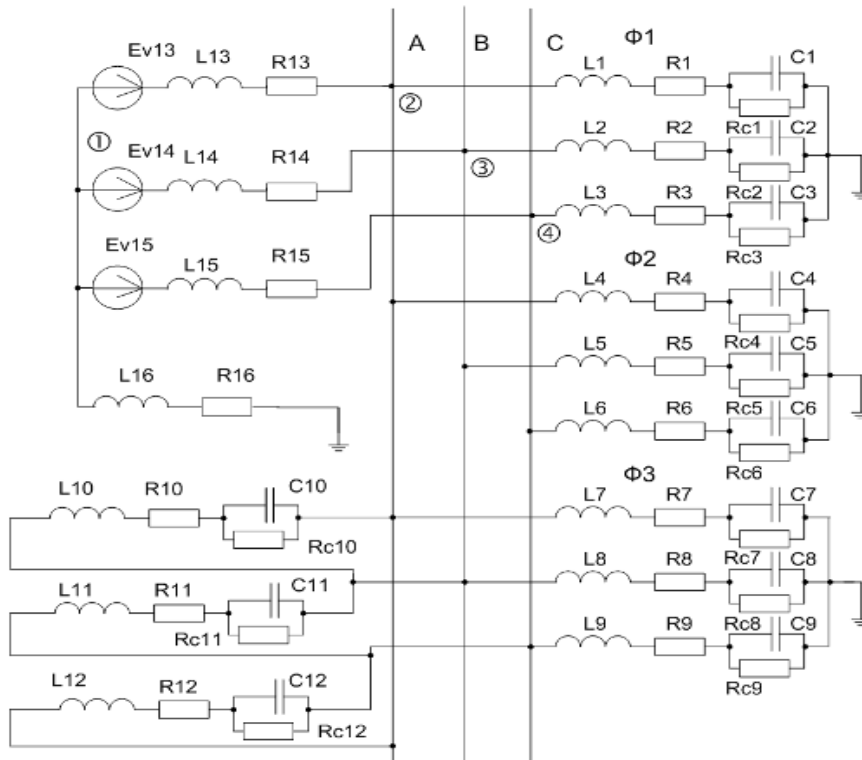


Рис. 1

Емкости фидеров приняты отличающимися в 3-4 раза, что вносит известные трудности с выполнением защиты от ОЗЗ. Сопротивления изоляции ветвей фидеров в доаварийном режиме принимались равными 1 МОм, а при глухом ОЗЗ для поврежденной ветви (1, 4 или 7) принималось 0,1-2 Ом. При дуговом замыкании это сопротивление в зависимости от принятого значения напряже-

ния пробоя изоляции дискретно изменялось от 0,1 до 1 МОм. Для анализа переходных процессов при ОЗЗ и поведения защиты отходящих фидеров в схеме сети на рис. 1 воспользуемся математической моделью, подробное описание которой дано в [8].

Для заданной схемы формируют векторы-столбцы параметров ветвей: активных сопротивлений R , индуктивностей L , ёмкостей C , сопротивлений изоляции на землю Rc , фазных ЭДС источника питания $e(t)$, токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$ ветвей, узлов $Uuz(t)$, напряжений на ёмкостях $uc(t)$ и эквивалентных противо-ЭДС ветвей – $Eekv(t)$, а также матрицы соединения ветвей с узлами P и сопротивлений ветвей Zp . Защита от ОЗЗ моделируется согласно разработанному и рассматриваемому далее алгоритму, включенному в состав модели.

Матрично-векторные уравнения математической модели, используемые для расчета процессов ОЗЗ методом узловых напряжений, имеют вид

$$Zp = \text{diag} \left[R + \frac{a_0}{h} L + \frac{h \cdot Rc}{a_0 \cdot C \cdot Rc + h} \right]; \quad Yuz = P \cdot Zp^{-1} \cdot P^T; \quad (1)$$

$$Uuz = Yuz^{-1} \cdot P \cdot Zp^{-1} \cdot (e(t) - Eekv); \quad Uv = P^T \cdot Uuz; \quad (2)$$

$$i(t) = Zp^{-1} (e(t) - Eekv - P^T \cdot Uuz); \quad (3)$$

$$uc(t) = \frac{h \cdot Rc \cdot i(t)}{a_0 \cdot Rc \cdot C + h} - \frac{Rc \cdot C}{a_0 \cdot Rc \cdot C + h} \sum_{s=1}^p a_s \cdot uc^{(n+1-s)}; \quad (4)$$

$$Eekv = \frac{L}{h} \sum_{s=1}^p a_s \cdot i^{(n+1-s)} - \frac{Rc \cdot C}{a_0 \cdot Rc \cdot C + h} \sum_{s=1}^p a_s \cdot uc^{(n+1-s)}. \quad (5)$$

Для повышения численной устойчивости математической модели решение дифференциальных уравнений для токов и напряжений ветвей проводилось неявным методом второго порядка ($p = 2$) при шаге расчета $h = 0,0005$ с и коэффициентах полиномов, аппроксимирующих производные, равных, согласно [8], $a_0 = 1,5$; $a_1 = -2$; $a_2 = 0,5$.

По уравнениям (1) – (5) были выполнены расчеты эффективных значений мнимых составляющих токов нулевой последовательности в ветвях сети при ОЗЗ с различной степенью компенсации емкостного тока с помощью катушки Петерсена и при различных значениях частоты питающего напряжения в диапазоне от 50 до 300 Гц. При вещественных положительных значениях напряжения U_0 найденные токи определяют направление реактивной мощности. Результаты расчетов приведены в таблице.

Lreak, Гн	2*Lrez=0,2832				Lrez=0,1416				0,5*Lrez=0,0708			
Частота, Гц	50	85	150	300	50	85	150	300	50	85	150	300
Inpv2, А	-41,6	-72,9	-145	-563	-41,3	-72,5	-144	-557	-40,8	-71,6	-142	-546
Inpv1, А	-27,6	-48,3	-94,8	-346	-27,5	-48,0	-94,2	-342	-27,2	-47,4	-93,0	-335
Irv, А	29,38	97,22	224,9	896	-10,3	72,74	208,5	873,7	-88,2	24,75	176,3	830,1
Ireak, А	39,84	24,05	15,1	13	79,14	47,77	29,9	26,5	156,2	94,26	59,0	52,0

Из полученных данных следует, что во всех режимах токи неповрежденных присоединений Inpv1 (фидер 2) и Inpv2 (фидер 3) имеют емкостной характер и направлены в сторону шин, тогда как направления токов поврежденного присоединения Irv (фидер 1) зависят от значения индуктивности катушки Петерсена и частоты напряжения. Так, при резонансной настройке катушки Петерсена и при перекомпенсации только при частоте выше 85 Гц обеспечивается требуемый знак реактивной мощности. Согласно расчетным данным, для селективного действия защиты любого поврежденного присоединения центральная частота полосовых фильтров должна быть выбрана при двукратном запасе не ниже 150 Гц – для исключения влияния катушки Петерсена и не выше 300 Гц – для упрощения аппаратной реализации защиты за счет снижения требований к АЦП. Тогда частота дискретности измерения входных сигналов, согласно теореме Котельникова-Шенона, должна быть не ниже 600-1000 Гц, а шаг расчета h – не более 0,001 с.

В частности, авторы [7] для выделения и усиления выбрали составляющие напряжения и тока частоты 220 Гц и использовали полосовые фильтры соответственно для напряжения и тока со следующими передаточными функциями:

$$H1(z) = \frac{(1-z) \cdot (1-z_0 z^{-1}) \cdot (1-\bar{z}_0 z^{-1})}{(1-z_1 z^{-1}) \cdot (1-\bar{z}_1 z^{-1})}; \quad H2(z) = \frac{(1+z) \cdot (1-z_0 z^{-1}) \cdot (1-\bar{z}_0 z^{-1})}{(1-z_1 z^{-1}) \cdot (1-\bar{z}_1 z^{-1})}, \quad (6)$$

$$\text{где } z_0 = \exp(-w_0 \cdot T), \quad z_1 = \exp(-w_1 \cdot T), \quad \bar{z}_0 = \exp(w_0 \cdot T), \quad \bar{z}_1 = \exp(w_1 \cdot T). \quad (7)$$

При этом сопряженные комплексы z_0 и \bar{z}_0 являются нулевыми точками для компонентов круговой частоты $w_0 = 2\pi \cdot 50$ с⁻¹, а z_1 и \bar{z}_1 – точками полюсов для компонентов круговой частоты $w_1 = 2\pi \cdot 220$ с⁻¹, T – период дискретизации, который принимается равным шагу расчета h .

Результатами моделирования этой защиты при ОЗЗ выявлено ряд недостатков. Один из них состоит в том, что для усиления выходных сигналов использованы рекурсивные фильтры с положительными обратными связями. В этих фильтрах после исчезновения входного сигнала возникает самогенерация выходного сигнала, что приводит к ложной работе защиты при наличии «клевков» на землю в сети. Нарушение устойчивой работы фильтров вызвано тем, что модуль полюса $|z_1| = 1$ и точка полюса находится на единичной окружности z -плоскости. Известные способы устранения этого недостатка путем изменения коэффициентов фильтра приводят к уменьшению коэффициента усиления и необходимости учета времени затухания выходного сигнала. Поэтому предложено фильтры выполнять управляемыми, а в качестве управляющего сигнала использовать дискретное значение (ус-

тавку) амплитуды (модуля) напряжения нулевой последовательности Um . Мгновенное значение Um определяется по (8) с использованием двух выборок мгновенных значений напряжений и её величина является признаком наличия ОЗЗ. Если амплитуда напряжения ниже заданной уставки, то происходит обнуление выходного сигнала фильтра, если выше, то работа фильтра разрешается. Уставка Um выбирается из условия отстройки от напряжения небаланса в нормальном режиме и составляет порядка 12-15% от номинального напряжения

$$Um = \sqrt{u_n^2 + \left[\frac{u_n - u_{n-1} \cdot \cos(\omega_0 T)}{\sin(\omega_0 T)} \right]^2} \quad (8)$$

На рис. 2 показаны результаты моделирования входных (частота 50 Гц) и выходных (частота 220 Гц) напряжений при ОЗЗ для неуправляемого (рис. 2, а) и управляемого (рис. 2, б) фильтров. Как видно из рис. 2, при исчезновении входного напряжения в момент времени $t=0,005$ с самовозбуждение имеет место только в неуправляемом фильтре (рис. 2, а) и отсутствует в управляемом (рис. 2, б).

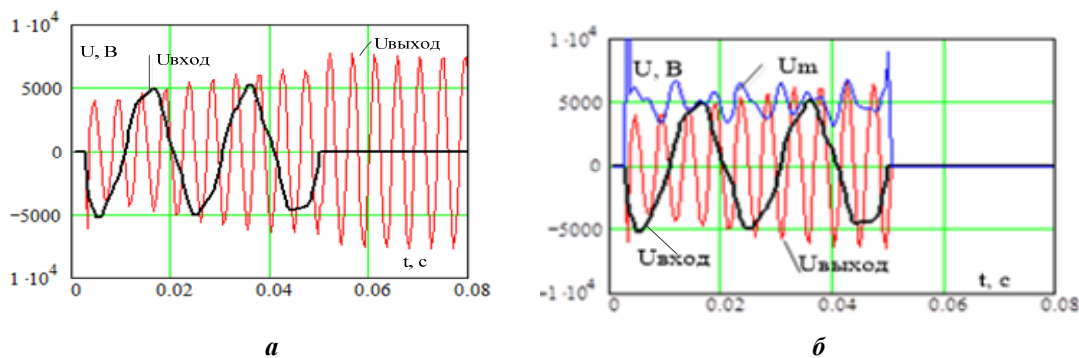


Рис. 2

Следующим недостатком защиты, предложенной в [7], является то, что при реализации алгоритма защиты путем представления комплексно-сопряженных передаточных функций (6) разностными уравнениями во временной области требуется еще неизвестное будущее дискретное значение входного сигнала x_{n+1} , что усложняет реализацию алгоритма защиты. Поэтому в данной работе предложены полосовые фильтры второго порядка с передаточными функциями (9), в которых первые множители в числителях приняты равными соответственно $1 - z_0^{-1}, 1 + z_0^{-1}$ в отличие от (6), где они равны $1 - z_0, 1 + z_0$. При этом для всех этих функций базовой является функция $C(z)$ согласно (10)

$$H1(z) = (1 - z^{-1}) \cdot C(z); \quad H2(z) = (1 + z^{-1}) \cdot C(z); \quad (9)$$

$$C(z) = \frac{(1 - z_0 z^{-1}) \cdot (1 - \bar{z}_0 z^{-1})}{(1 - z_1 z^{-1}) \cdot (1 - \bar{z}_1 z^{-1})} = \frac{z^{-2} - (z_0 + \bar{z}_0) \cdot z^{-1} + 1}{z^{-2} - (z_1 + \bar{z}_1) \cdot z^{-1} + 1} \quad (10)$$

Разностные уравнения (11), (12), полученные из (9), теперь уже не будут содержать составляющих x_{n+1} , что упрощает их реализацию при определении выходных сигналов фильтров $y1_n, y2_n$

$$y1_n = -y1_{n-2} + (z_1 + \bar{z}_1) \cdot y1_{n-1} - x_{n-3} + (z_0 + \bar{z}_0 + 1) \cdot (x_{n-2} - x_{n-1}) + x_n; \quad (11)$$

$$y2_n = -y2_{n-2} + (z_1 + \bar{z}_1) \cdot y2_{n-1} + x_{n-3} - (z_0 + \bar{z}_0 - 1) \cdot (x_{n-2} + x_{n-1}) + x_n. \quad (12)$$

Расчетные характеристики фильтров, выполненные по уравнениям (1) – (5), (9) – (12) показаны на рис. 3. Амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные (ФЧХ) характеристики (рис.3, а), а также входные и выходные сигналы во временной области (рис. 3, б) рассчитаны для параметров: $\omega_0 = 50$ Гц, $\omega_1 = 220$ Гц, $T = h = 0,0005$ с, $z_0 = 0,998 - j0,156$; $z_1 = 0,771 - j0,637$.

Входное напряжение и емкостной (индуктивный) ток нулевой последовательности при ОЗЗ имеют угловой сдвиг 90° (рис. 3, б), а ФЧХ фильтров выбраны также со сдвигом по фазе на $\Delta\varphi = 90^\circ$ их выходных сигналов между собой (рис. 3, а). Тогда при ОЗЗ произведение мгновенных значений тока и напряжения на выходе фильтров будет равно реактивной мощности, которая для поврежденных присоединений будет положительной, а для неповрежденных – отрицательной. Для селективного действия защиты при ОЗЗ необходимо, чтобы реактивная мощность, вычисленная по (13) как произ-

ведение найденных по (11) и (12) составляющих тока и напряжения частоты 220 Гц, была положительной и превышала заданное пороговое значение $Q_{порог}$

$$Q_n = i_{вых}^{(n)} \cdot u_{вых}^{(n)} \geq Q_{порог} . \quad (13)$$

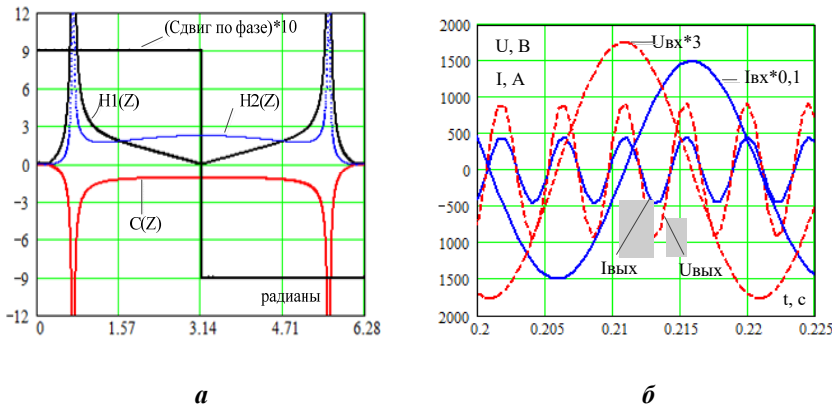


Рис. 3

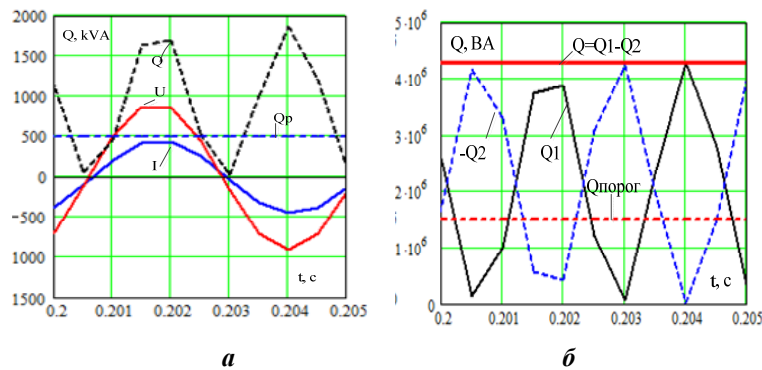


Рис. 4

сдвига по фазе сигналов реактивных мощностей $Q1$ и $Q2$ (рис. 4, б) их сумма (разность) будет иметь практически только постоянную составляющую. Это следует из рис. 4, б, где реализованы соотношения

$$Q1_n = i1_{вых}^{(n)} \cdot u2_{вых}^{(n)} ; \quad Q2_n = i2_{вых}^{(n)} \cdot u1_{вых}^{(n)} ;$$

$$Q_n^{рез} = Q1_n - Q2_n = i1_{вых}^{(n)} \cdot u2_{вых}^{(n)} - i2_{вых}^{(n)} \cdot u1_{вых}^{(n)} \geq Q_{порог} . \quad (14)$$

С учетом результатов выполненных исследований структурная схема разработанной защиты будет иметь вид, показанный на рис. 5. Она содержит фильтры нулевой последовательности тока ТА0 и напряжения TV0, выходные сигналы которых, пропорциональные току и напряжению нулевой последовательности, поступают на аналогово-цифровые преобразователи АЦП-И и АЦП-У. К выходу каждого АЦП подсоединено по два фильтра: один с характеристикой $H1(z)$, другой – с $H2(z)$. Выходные сигналы $i1_{вых}$ и $u2_{вых}$ фильтров Ф1-и и Ф2-и имеют частоту 220 Гц, совпадают по фазе и поступают в блок перемножения БП-1, с выхода которого реактивная мощность первого канала $Q1$ поступает в сумматор. Аналогично в сумматор поступает мощность $Q2$ после БП-2, вычисленная в нем по сигналам $i2_{вых}$ и $u1_{вых}$ с фильтров Ф2-и и Ф1-и.

Найденная в сумматоре по (14) реактивная мощность Q подается на компараторы К1 и К2. В первом из них при условии, что реактивная мощность положительна и превышает пороговое значение $Q_p = Q_{порог}$, подается сигнал на срабатывание выходного органа В1, который указывает на наличие ОЗЗ на данном присоединении. Выходной орган В2 выполняет вспомогательные функции и осуществляет самодиагностику реле. При внешнем ОЗЗ на «чужом» присоединении собственный емкостной ток будет направлен к шинам, а реактивная мощность – отрицательная. При её значении менее

Характер изменения во времени реактивной мощности Q , рассчитанной по приведенным на рис. 3, б мгновенным значениям выходных напряжений и токов фильтров, показан на рис. 4, а. Из последнего следует, что при ОЗЗ имеют место промежутки времени, когда мощность Q не превышает порогового значения $Q_{порог}$, и на выходной орган будет поступать дискретный (прерывистый) сигнал, усложняющий работу выходного органа.

Для устранения этого недостатка в работе предложено защиту выполнить двухканальной, дополнив её еще двумя фильтрами, аналогичными (9)–(12), и одним блоком произведения. При этом к каждому из входных сигналов тока и напряжения будет подключено по два разного типа фильтра с выходными сигналами $u1_{вых}, u2_{вых}$ и $i1_{вых}, i2_{вых}$, имеющими частоту 220 Гц. За счет

порогового $-Q_p$ срабатывает В2, что свидетельствует об исправности всех блоков защиты и её успешной проверке натурными сигналами. Предусмотрена возможность вывода из работы В2.

Результаты математического моделирования разработанной защиты подтвердили правильность её действия при изменении индуктивности катушки Петерсена в широких пределах как при недокомпенсации, так и при перекомпенсации емкостных токов сети.

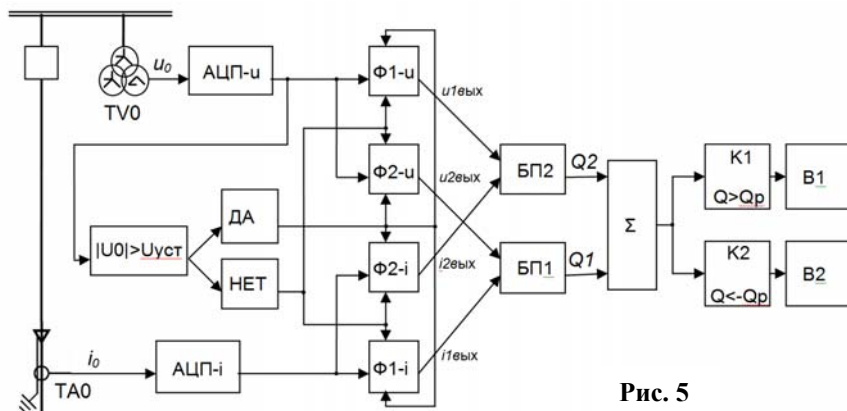


Рис. 5

Положительные результаты также получены для разветвленных сетей собственных нужд электростанций, работающих с изолированной нейтралью. Лабораторный образец защиты был реализован на базе микроконтроллера STM32F4Discovery [10]. Для гальванической развязки были применены датчики типа Lem, основанные на использовании эффекта Холла. Удовлетворительная работа образца получена на физической модели сети напряжением 0,4 кВ. Она состоит из разделительного трансформатора мощностью 15 кВА, катушки Петерсена, трех фидеров с конденсаторами в каждой фазе на землю 5,10 или 25 мкФ, трансформаторов тока нулевой последовательности типа ТЗЛМ. Замыкание фазы на землю производилось через активное сопротивление 0,5 Ом. Реле правильно определяло поврежденное присоединение во всех случаях, кроме значений емкостей на всех фидерах 2 мкФ и сопротивлении замыкания на землю 10 Ом, что было связано с недостаточными значениями реактивной мощности и требовало увеличения коэффициентов усиления фильтров.

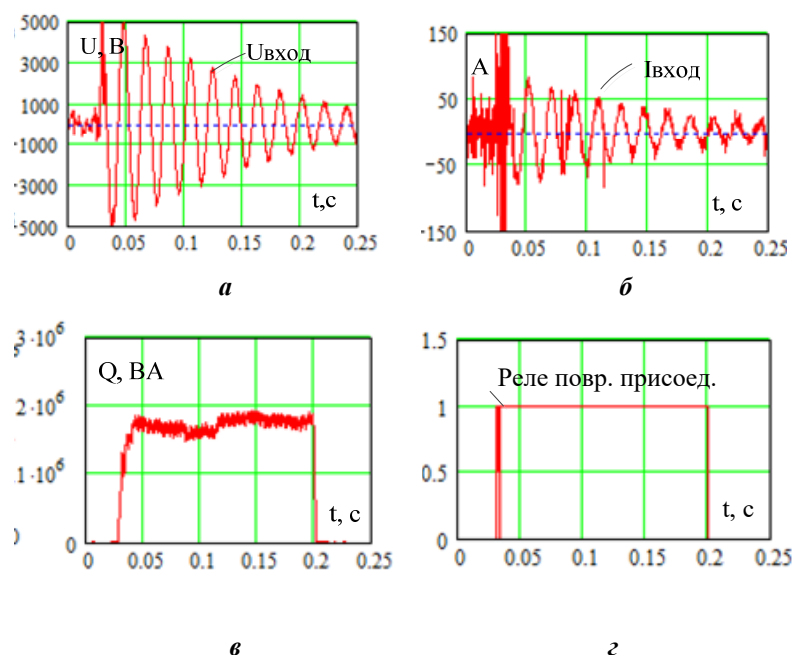


Рис. 6

Кроме того, проверка работы защиты осуществлялась путем подачи на вход защиты сигналов тока и напряжения нулевой последовательности, записанных в реальной сети цифровыми регистраторами. В качестве примера ниже приведены осциллограммы входного напряжения (рис. 6, а) и тока (рис. 6, б) поврежденного присоединения в сети 6 кВ при резонансной настройке катушки Петерсена.

Реакция устройства на эти сигналы для реактивной мощности (рис. 6, в) и для выходного реле (рис. 6, з) подтверждает правильность и эффективность действия защиты при ОЗЗ. При этом время работы фильтров и блоков перемножения от момента возникновения ОЗЗ до превышения реактивной мощности Q_p составляет около пяти шагов расчета (2,5 мс), а выходного органа – 10 мс.

Результаты моделирования и экспериментов могут служить основанием для возможного внедрения разработанной защиты в электрических сетях с компенсированной нейтралью.

Задачей дальнейших исследований является оценка возможности применения разработанной защиты для сетей с изолированной и комбинированной заземленной нейтралью.

Выводы. 1. Математическим моделированием показана возможность выполнения для компенсированных сетей селективной защиты от замыканий на землю на основе контроля знака реактив-

ной мощности, определяемой по токам и напряжениям частоты 150-300 Гц, выделенных с помощью полосовых частотных фильтров из напряжений и токов нулевой последовательности. При таких частотах индуктивность катушки Петерсена практически не компенсирует в поврежденном присоединении емкостные токи этой частоты, что позволяет использовать для защиты критерий направления реактивной мощности.

2. Разработана микропроцессорная защита от ОЗЗ, в которой для повышения устойчивости релактивных фильтров применено их управление по напряжению нулевой последовательности, а для обеспечения постоянства выходного сигнала при работе защиты её выполняют двухканальной с подключением двух фильтров разного вида к каждому входному сигналу напряжения и тока. Суммирование реактивной мощности этих каналов обеспечивает постоянство выходного сигнала вместо его дискретного характера при одноканальном исполнении.

3. Правильность функционирования разработанной защиты подтверждена результатами математического моделирования, лабораторными испытаниями натурального образца и правильностью действия при использовании сигналов, записанных с помощью цифровых регистраторов при замыканиях на землю в реальных сетях.

Статья подготовлена по результатам исследований, полученных при выполнении Гостемы Д-17-03 «Разработка микропроцессорной селективной защиты от замыканий на землю в традиционных электрических системах 6–10 кВ и системах Smart grid».

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. Назарычев А.Н., Пугачев А.А., Титенков С.С. Комбинированное заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ. Мифы и реальность. *Новости ЭлектроТехники*. 2016. № 3(99).
3. Hengxu Ha, Sankara Subramanian. Transient earth fault detection on compensated earthed system, CIGRE- 2013. 22th Intern. Conf. and Exhibition on *Electricity Distribution*, Stockholm, 10-13 June 2013. Paper No 0119.
4. Altonen J., Wahlroos A., Vähäkuopus, S. Application of multi-frequency admittance-based fault passage indication in practical compensated mv-network 2017. 24th Intern. Conf. and *Exhibition CIGRE -2017*. Glasgow. 12-15 June 2017. Paper 0967.
5. URL: <https://new.abb.com/medium-voltage>
6. URL: <https://w3.siemens.com>
7. Pitot F., Venkataraman k., Vassilevsky N., Teon C.P. Wattmetric earth fault protection – innovation for compensated distribution networks. 23rd Intern. Conf. on *Electricity Distribution CIGRE-2015*, Lyon. 15-18 June 2015. Vol. 1. Paper 0963. Pp. 1.1,1-5.
8. Сивокобыленко В.Ф, Лебедев В.К., Сердюков Р.П. Развитие математической модели для анализа переходных процессов в системе собственных нужд электростанций при замыканиях фазы на землю. *Наукові праці ДонНТУ, серія Електротехніка і енергетика*. 2011. Вип. 10(180). С. 153-161.
9. Toader D., Naragus St., Blaj C., Numeric Simulation of Faults in Electrical Network. Proc. of the 10th WSEAS Intern. Conf. on *Fuzzy System*, Prague, March, 2009. Pp. 128-135.
10. URL: <http://www.st.com>

МИКРОПРОЦЕССОРНИЙ СЕЛЕКТИВНИЙ ЗАХИСТ ВІД ЗАМИКАННЯ ФАЗИ НА ЗЕМЛЮ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З КОТУШКОЮ ПЕТЕРСЕНА В НЕЙТРАЛІ

В.Ф. Сивокобыленко, докт.техн.наук, **В.А. Лисенко**, канд.техн.наук

Донецький національний технічний університет,

пл. Шибанкова, 2, Покровськ, Донецька обл., 85300, Україна.

E-mail: svf1934@gmail.com; viktor.lysenko@donntu.edu

Розроблено селективний захист від замикань на землю для компенсованих мереж, в яких традиційні захисти через вплив катушки Петерсена не забезпечують їхньої селективної дії. Використано цифрові вузькосмугові частотні фільтри, які з напруг і струмів нульової послідовності мережі виділяють і підсилюють складові з центральною частотою, обраною з діапазону 150–300 Гц. Математичним моделюванням встановлено, що за таких частот катушка Петерсена практично не зменшує емнісний струм у пошкодженому приєднанні у разі замикання на землю, як це має місце за частоти 50 Гц. Передавальні функції фільтрів напруги і струму відрізняються між собою для забезпечення фазового зсуву на 90 градусів між їхніми вихідними сигналами. Для усунення самозбудження фільтрів їх виконують керованими в функції амплітуди напруги нульової послідовності. Вихідний орган захисту реагує на знак реактивної потужності, яка визначається як добуток вихідних сигналів фільтрів струму і напруги. Для виключення подання дискретного сигналу на вихідний орган за-

хист виконують двоканальним. При цьому до кожного вхідного сигналу підключають два фільтри різного типу, вихідні сигнали яких після перехресного множення сумують і подають на біполярний вихідний орган, що фіксує замикання як в зоні захисту, так і поза зоною для самодіагностики. Працездатність розробленого захисту підтверджена результатами математичного моделювання, випробуваннями на лабораторному стенді та правильністю дії у разі подачі натурних сигналів, записаних із застосуванням цифрових реєстраторів у випадку замикання на землю в реальних мережах. Бібл. 10, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: компенсована мережа, замикання на землю, селективний захист, частотний фільтр, струм, напруга, нульова послідовність, реактивна потужність.

MICROPROCESSOR SELECTIVE PROTECTION FROM THE PHASE TO THE EARTH FAULT IN ELECTRIC NETWORKS WITH PETERSEN COIL IN NEUTRAL

V.F. Syvokobylenko, V.A. Lysenko

Donetsk National Technical University,

sq. Shibankova, 2, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine.

E-mail: svf1934@gmail.com; viktor.lysenko@donntu.edu

Selective ground-fault protection for compensated modes is developed, in which traditional protection due to the influence of Petersen's coil does not provide their selective action. Digital narrowband frequency filters are used, which isolates and amplifies components with a central frequency selected from the range of 150–300 Hz from the voltages and currents of the zero sequence of the network. The results of mathematical modeling have established that at such frequencies the Petersen coil practically does not reduce the capacitive current in the damaged connection when closing to the ground, as is the case at a frequency of 50 Hz. Transmitting functions of the voltage and current filters differ in order to ensure a phase shift of 90 degrees between their output signals. To eliminate the self-excitation of the filters, they are executed in the function of the amplitude of the voltage of the zero sequence. The source protection body reacts to the direction of reactive power, which is defined as the product of the output signals of current and voltage filters. To exclude the representation of the discrete signal to the source organ, the protection is performed by a dual channel. In this case, to each input signal are connected two filters of different types, the output signals which after the cross-multiplication are sad and submit to the bipolar source that fixes the circuit both in the protection zone and out of the area for self-diagnosis. The efficiency of the developed protection is confirmed by the results of mathematical modeling, tests on the laboratory stand and the correctness of the action when supplying the natural signals recorded with the help of digital recorders when closing the ground in real networks. References 10, figures 6, table 1.

Keywords: compensated network, ground fault, selective protection, time-consuming filter, current, voltage, zero sequence, reactive power.

1. Fedoseev A.M. Relay protection of electric power systems. Network Relay Protection. Moskva: Enerhoatomizdat. 1984. 520 p. (Rus)
2. Nazarychev A.N., Puhachev A.A., Tytenkov S.S. Combined neutralgrounding in 6–35 kV grids. Myths and reality. *Novosty ElektroTekhnyky* 2016. No 3(99). (Rus)
3. Hengxu Ha, Sankara Subramanian. Transient earth fault detection on compensated earthed system, 22th Intern. Conf. and Exhibition on *Electricity Distribution CIGRE- 2013*, Stockholm, 10-13 June 2013. Paper No 0119.
4. Altonen J., Wahlroos A., Vähäkuopus S. Application of multi-frequency admittance-based fault passage indication in practical compensated mv-network 2017. 24th Intern. Conf. and *Exhibition CIGRE -2017*. Glasgow, 12-15 June 2017. Paper 0967.
5. URL: <https://new.abb.com/medium-voltage>
6. URL: <https://w3.siemens.com>
7. Pitot F., Venkataraman K., Vassilevsky N., Teon C.P. Wattmetric earth fault protection – innovation for compensated distribution networks. 23rd Intern. Conf. on *Electricity Distribution CIGRE -2015*, Lyon. 15-18 June 2015. Vol. 1. Paper 0963. Pp. 1.1,1-5.
8. Syvokobylenko V.F., Lebedev V.K., Serdiukov R.P. Development of Mathematical Model for the Analysis of Transients in Power Stations Auxiliaries at Phase-to-Ground Faults. *Naukovi pratsi DonNTU, seriia Elektrotehnika i enerhetyka*. 2011. No 10(180). Pp. 153-161. (Rus)
9. Toader D., Haragus St., Blaj C., Numeric Simulation of Faults in Electrical Network. Proc. of the 10th WSEAS Intern. Conf. on *Fuzzy System*. Prague. March, 2009. Pp. 128-135.
10. URL: <http://www.st.com/web/en/home.html>

Надійшла 29.01.2018

Остаточний варіант 26.12.2018