

УДК 621.3.024:621.317.79

ВЫЯВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТА СО СНИЖЕННЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ИЗОЛЯЦИИ В РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА

В.В. Шестакова, И.С. Исаев

Томский политехнический университет

E-mail: shestakova@elti.tpu.ru

Предлагается способ выявления элемента с пониженным сопротивлением изоляции в разветвленной сети постоянного оперативного тока электростанций и подстанций, основанный на изменении фазы тока в поврежденном присоединении за счет появления активной составляющей проводимости при появлении тока утечки. Для этого предлагается применить одновременное наложение на сеть синусоидального контрольного тока и импульсов тока высокой частоты, синхронизированных с моментом перехода через ноль напряжения синусоидального сигнала на полюсах сети.

Ключевые слова:

Постоянный оперативный ток, сопротивление изоляции, импульсы тока, синусоидальный ток.

Key words:

Constant control current, insulation resistance, current pulses, harmonic current.

Надежность работы электроустановок в значительной степени зависит, в том числе, и от состояния изоляции в сетях постоянного оперативного тока электростанций и подстанций. Естественное старение изоляции сетей, разрушение агрессивной средой и механические повреждения снижают электрическое сопротивление изоляции, что само по себе не нарушает режима работы потребителей постоянного тока, но может привести к образованию обходных цепей и неправильному действию релейной защиты и автоматики. Поэтому местное снижение сопротивления изоляции относительно земли отдельных участков электрической сети недопустимо, как по условиям безопасности обслуживающего персонала, так и по условиям работы электроприемников.

Отыскание элемента со сниженным сопротивлением изоляции в разветвленной сети постоянного оперативного тока представляет собой сложную задачу. В большинстве случаев эта задача решается поочередным отключением сначала фидеров щита постоянного тока, а затем отдельных панелей, ячеек и других элементов. Естественно, что при поочередном отключении фидеров кратковременно снимается оперативный ток с большого числа различных устройств, состояние которых в момент отключения неизвестно. Это также может привести к отказам или неправильным действиям релейной защиты и автоматики. Кроме того, для электроустановок, на которых установлены микропроцессорные устройства релейной защиты, поиск элемента со сниженным сопротивлением изоляции путём поочередного отключения фидеров не рекомендуется [1].

В настоящее время известен ряд методов и устройств, позволяющих выявлять среди элементов сети элемент с ослабленной изоляцией без их поочередного отключения [2, 3]. Однако данные устройства не получили широкого распространения в силу некоторых присущих им недостатков.

Наиболее распространенным и очевидным методом выполнения таких устройств является нало-

жение на сеть переменного контрольного тока с частотой, отличной от промышленной. Из-за значительной суммарной протяженности сетей постоянного оперативного тока вся сеть и отдельные присоединения имеют значительную емкость относительно земли. Поэтому задача выявления элемента с ослабленной изоляцией сводится к выделению активной составляющей тока на фоне емкостного тока.

Упрощенная схема замещения сети постоянного оперативного тока может быть представлена как параллельное соединение обобщенного элемента и контролируемого элемента, включенных между полюсами сети постоянного оперативного тока и точкой заземления (рис. 1). Обобщенный элемент замещен эквивалентными емкостями проводов всей сети относительно земли C_{Σ} . Контролируемый элемент замещен емкостями проводов отдельного присоединения относительно земли C и сопротивлением изоляции $R_{из}$, подключенным параллельно к одной из емкостей C .

При поочередном измерении с помощью технических средств абсолютного значения и фазы контрольного переменного тока в присоединениях сети относительно напряжения на полюсе можно идентифицировать поврежденное присоединение по величине активной составляющей этого тока

$$I_A = I \cos \varphi,$$

$$\varphi = \arctg(\omega C R_{из}),$$

где I – действующее значение контрольного тока в контролируемом элементе; ω – угловая частота тока контрольного источника; φ – фаза контрольного переменного тока; C и $R_{из}$ – соответственно емкость и активное сопротивление изоляции контролируемого присоединения.

Частота ω может иметь различные значения. Целесообразно выбирать частоту ω такой, чтобы фазовый сдвиг φ при реальных емкостях элементов сети и нормированных предельно допустимых сопротивлениях изоляции имел значение, позволяющее проводить измерения, не прибегая к использо-

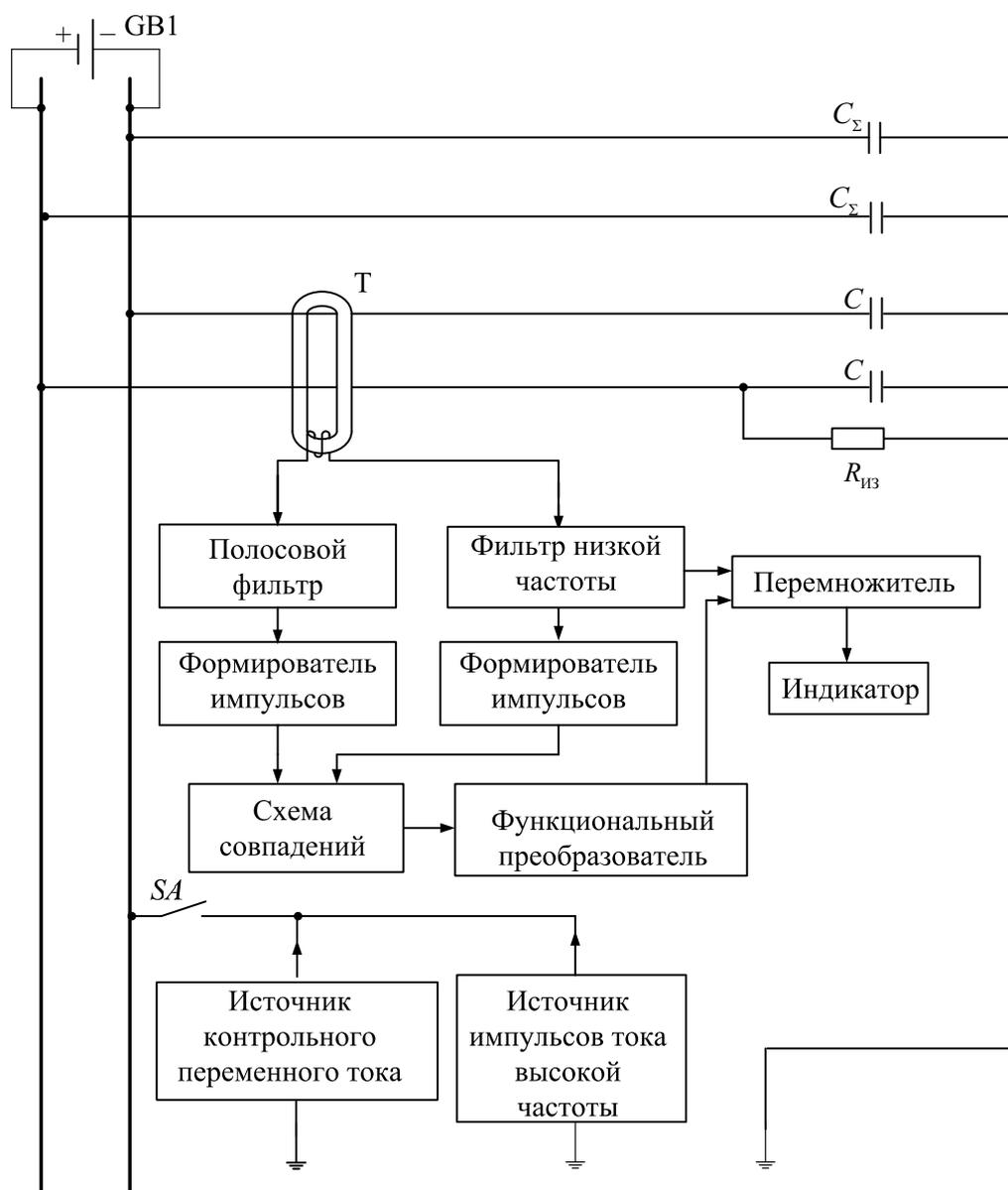


Рис. 1. Структурная схема устройства

ванию очень точных, и, следовательно, дорогих измерительных устройств.

Поскольку для измерения тока предполагается использовать довольно грубые бесконтактные датчики тока, следует ограничить минимальное изменение фазы значениями около 10° . Для получения больших фазовых сдвигов нежелательно принимать слишком низкие частоты вспомогательного источника, так как при этом могут возникнуть трудности при реализации бесконтактного измерения токов. При таких параметрах сети достаточное для надежного измерения изменение фазового сдвига получается при частотах контрольного источника в пределах 3...8 Гц.

В сетях постоянного оперативного тока суммарная емкость всей сети может составлять несколько десятков мкФ, а емкости отдельных присоединений достигают 3...5 мкФ. Минимально допу-

стимое сопротивление изоляции, до достижения которого разрешается эксплуатировать сеть, по ПТЭ нормируется значением 20 кОм. Для надежного выявления элемента с таким сопротивлением изоляции прием далее с запасом, что разрабатываемое устройство должно позволять отыскивать поврежденный элемент с сопротивлением изоляции 40 кОм.

Для измерения фазового сдвига необходимо подведение к измерительному устройству напряжения с полюсов сети. Это не вызывает больших затруднений при измерении фазы на головных участках, сосредоточенных в пределах секции щита постоянного тока, где соответствующие датчики для измерения напряжения и тока могут быть подключены стационарно. Однако важной также является задача выявления поврежденного элемента на периферии сети, где при использовании данно-

го метода требуется проводить замеры в десятках элементов. Подведение тока к измерительному устройству может быть осуществлено, например, с помощью токоизмерительных клещей, то есть бесконтактно, а для подведения напряжения требуется непосредственное подключение к полюсу сети. Частое выполнение такой операции во многих точках сети может стать причиной попадания оператора под напряжение или возникновения междуполюсного замыкания.

В связи с этим актуальной является задача разработки методов и средств, позволяющих полноценно реализовать фазочувствительный метод отыскания элемента с ослабленной изоляцией без подведения напряжения с полюса сети в точках измерения.

В [4, 5] предлагалось для решения задачи в такой постановке наряду с наложением на сеть контрольного переменного тока осуществить наложение коротких импульсов, синхронизированных с моментом перехода через ноль напряжения на полюсах сети, выделить эти сигналы в токе контролируемого элемента и измерить активную составляющую тока. Информацию об активной составляющей тока в контролируемом элементе предлагалось получать на основании измерения отрезка времени между моментом перехода через ноль переменного тока контролируемого элемента и моментом появления короткого импульса.

Принципиальным недостатком устройства, реализующего данный способ, является затруднение отстройки от импульсных помех, возникающих при коммутациях, так как для выделения короткого импульса в месте измерения требуется фильтр с широкой полосой пропускания. Кроме того, необходимо отметить возможность совпадения собственной частоты отдельных участков сети с частотами спектра короткого импульса, что приводит к зависимости работы устройства от параметров сети.

В данной работе предлагается способ поиска элемента со сниженным сопротивлением изоляции, основанный на наложении на сеть контрольного тока и импульсов тока высокой частоты [6]. Длительность импульсов принимается равной половине периода контрольного тока, и активная составляющая тока контролируемого элемента определяется на ос-

новании подсчета полупериодов тока высокой частоты, попадающих в отрезок времени между моментом перехода через ноль переменного контрольного тока контролируемого элемента и моментом исчезновения импульса тока высокой частоты, рис. 2.

На рис. 1 представлена одна из возможных структурных схем устройства, реализующего предложенный способ.

Источник импульсов тока высокой частоты синхронизирован так, что импульс тока высокой частоты начинает вырабатываться в моменты перехода напряжения на полюсах сети через ноль и длится в течение одного положительного полупериода контрольного переменного напряжения.

Предлагаемое устройство также содержит фильтр низкой частоты, на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный контрольному току низкой частоты.

Импульсы высокой частоты выделяются полосовым фильтром, что обеспечивает повышение помехоустойчивости устройства. Необходимо отметить, что частота синусоиды, наполняющей импульсы, может приниматься заведомо меньше, чем собственные частоты контролируемых элементов сети, что также повышает помехоустойчивость (собственные частоты присоединений сети лежат в диапазоне от 3 кГц и выше).

Сигналы с выходов фильтров подаются на схему совпадений, в которой определяется число положительных полупериодов импульса тока высокой частоты, попадающих в отрезок времени между моментом перехода через ноль переменного контрольного тока t_1 и моментом исчезновения импульса тока высокой частоты t_2 (рис. 2).

В элементе с неповрежденной изоляцией число таких положительных полупериодов составляет 50 % от общего числа положительных полупериодов, в элементе с пониженным сопротивлением изоляции их число меньше 50 %. Далее на выходе функционального преобразователя формируется сигнал, пропорциональный $\cos\varphi$, а на выходе перемножителя получают сигнал

$$U_A = kI \cos\varphi,$$

где U_A – напряжение, пропорциональное активной составляющей контрольного тока; k – коэффици-

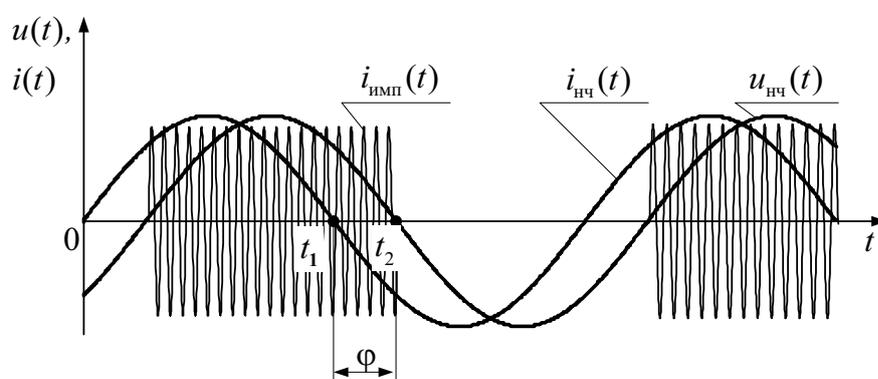


Рис. 2. Сигналы в контролируемом присоединении: $u_{нч}(t)$ – контрольное напряжение на полюсе; $i_{нч}(t)$ – контрольный ток; $i_{имп}(t)$ – импульсы тока высокой частоты

ент пропорциональности; $\varphi_1=180^\circ(n/N)$ – фазовый сдвиг между током в контролируемом элементе и напряжением на полюсе сети; n – число положительных полупериодов импульса, попадающих в отрезок времени $t_1\dots t_2$; N – общее число положительных полупериодов импульса.

Сигнал с выхода перемножителя подается на индикатор, по показаниям которого оператор может судить о снижении сопротивления изоляции в контролируемом элементе.

В результате расчетов установлено, что при реальных сочетаниях параметров сети постоянного оперативного тока можно зафиксировать в месте измерения угол $\varphi \geq 10^\circ$.

Например, пусть контролируемый элемент имеет следующие параметры: $R_{из}=40$ кОм, $C=3$ мкФ. Тогда при частоте контрольного переменного тока $f_{нч}=5$ Гц в месте измерения отрезок времени между моментом перехода через ноль контрольного тока контролируемого элемента и моментом исчезновения импульса тока высокой частоты соответствует $\varphi=75^\circ$. То есть изменение фазы составит $90^\circ-75^\circ=15^\circ$.

Оценим методическую погрешность метода. Одна из составляющих методической погрешности обусловлена сдвигом по фазе синусоиды высокой частоты, наполняющей импульсы тока. Фазовый сдвиг импульсов тока высокой частоты по сравнению с фазовым сдвигом контрольного переменного тока при прочих равных условиях во столько же раз меньше, во сколько раз высокая частота превышает частоту контрольного переменного тока. Например, при $R_{из}=40$ кОм, $C=3$ мкФ и частоте импульсов тока высокой частоты $f_{вч}=800$ Гц фазовый сдвиг составит $0,1^\circ$, что вносит погрешность $0,6\%$.

Другая составляющая погрешности обусловлена дискретностью подсчета количества импульсов высокой частоты, лежащих в области $t_1\dots t_2$. В логическом устройстве каждому положительному полупериоду сигналов соответствует прямоугольный импульс. Если момент перехода контрольного тока низкой частоты через ноль попадает в интервал между импульсами или находится «внутри» импульса, то погрешность определения данного момента времени зависит от длительности половины периода синусоиды высокой частоты, и погрешность определения фазы тока $\Delta\varphi_M$ составляет

$$\Delta\varphi_M = \omega_{нч} (T_{вч}/2) = \pi f_{нч}/f_{вч},$$

где $f_{нч}$ – частота контрольного тока; $f_{вч}$ – частота заполнения прямоугольных импульсов.

Например, при отношении $f_{нч}/f_{вч}=5/800$ погрешность $\Delta\varphi_M=1,125^\circ$.

При определении методической погрешности метода необходимо также учесть погрешность, обусловленную переходными процессами в фильтрах. Погрешность определения момента исчезновения сигнала высокой частоты (момент t_2), вносимая полосовым фильтром, определяется количеством положительных полупериодов сигнала высокой частоты m на выходе фильтра, попадающих в область $(t_2, t_2+3\tau)$, где τ – постоянная времени фильтра, которая определяется следующим образом

$$\tau = Q / (\pi f_{вч}),$$

где Q – добротность полосового фильтра.

Для исключения данной погрешности можно назначить некоторый пороговый уровень сигнала. Импульсы, имеющие амплитуду меньше заданного уровня, не учитываются при определении фазы. Если принять $Q=30$, $f_{вч}=800$ Гц, то пороговый уровень может быть принят равным $0,8$ от установившегося значения сигнала высокой частоты.

Таким образом, при принятых параметрах суммарная методическая погрешность измерения активной составляющей переменного тока контролируемого элемента составляет не более 3% при снижении сопротивления его изоляции до 40 кОм и ниже.

Полученные результаты могут быть использованы, например, для выбора параметров соответствующей аппаратуры.

Выводы

Показано, что для выявления поврежденного элемента в разветвленной сети постоянного оперативного тока может быть использован метод, основанный на наложении на сеть синусоидального сигнала частотой от 5 до 10 Гц и пакетов прямоугольных импульсов с частотой заполнения $500\dots 1000$ Гц, синхронизированных с моментом перехода через ноль напряжения синусоидального сигнала на полюсах сети. Сквозность прямоугольных импульсов равна $0,5$. Амплитуда синусоидального сигнала низкой частоты может быть принята равной 100 В, прямоугольных импульсов – 150 В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем / Стандарт организации ОАО РАО «ЕЭС России», издание официальное, ОАО РАО «ЕЭС России», 2005. – 42 с.
2. Овсянников А.А., Файбисович В.А., Шлык В.В. Автоматизация поиска замыканий на землю в оперативных цепях постоянного тока // Электрические станции. – 1982. – № 2. – С. 61–63.
3. Вайнштейн Р.А., Кулага Ю.А., Потемкин В.В. Устройство для отыскания мест замыкания на «землю» в сети постоянного оперативного тока // Известия вузов. Сер. Энергетика. – 1987. – № 8. – С. 52–55.
4. Способ поиска элемента со сниженным сопротивлением изоляции в разветвленной электрической сети постоянного опера-

тивного тока: пат. 2180124 Рос. Федерация. № 99101607/09; заявл. 19.01.1999; опубл. 27.02.2002, Бюл. № 6. – 4 с.

5. Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В. Измерение фазы токов для выявления элемента с ослабленной изоляцией в разветвленной электрической сети путем наложения коротких синхронизированных импульсов // Известия вузов. Сер. Электромеханика. – 1999. – № 1. – С. 39–43.
6. Способ поиска элемента с пониженным сопротивлением изоляции в разветвленной электрической сети постоянного оперативного тока: пат. 2310211 Рос. Федерация. № 2006126946/28; заявл. 24.07.2006; опубл. 10.11.2007, Бюл. № 31. – 7 с.

Поступила 03.09.2010 г.