

УДК 621.3.078

КОНТРОЛЬ НАСТРОЙКИ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–35 кВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ТОКОВ ДВУХ ЧАСТОТ

Вайнштейн Роберт Александрович,

д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетических систем
Энергетического института ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: vra@tpu.ru

Шестакова Вера Васильевна,

канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетических систем
Энергетического института ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: shestakova@tpu.ru

Пашковский Сергей Николаевич,

канд. техн. наук, инженер научно-производственного предприятия «ЭКРА»,
Республика Чувашия, 428003, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 3.
E-mail: pashkovsky_sn@ekra.ru

Юдин Святослав Михайлович,

канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетических систем
Энергетического института ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: ysm@elti.tpu.ru

Сербулов Алексей Николаевич,

студент кафедры электроэнергетических систем Энергетического института
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: rasstofun@gmail.com

Актуальность работы обусловлена широким применением в электрических сетях плавно регулируемых дугогасящих реакторов. Полноценный эффект при применении таких реакторов имеет место в том случае, если осуществляется автоматическая настройка дугогасящих реакторов в резонанс с суммарной емкостью сети. Для реализации автоматической настройки необходимо непрерывно получать информацию об отклонении от резонансной настройки в виде некоторого электрического сигнала.

Цель исследования: разработка способа контроля настройки дугогасящих реакторов в электрических сетях 6–35 кВ, основанного на наложении токов двух частот, отличающихся от промышленной, с использованием типового высоковольтного электро-технического оборудования.

Методы исследования: математическое моделирование с использованием программных пакетов MATHCAD, MATLAB.

Результаты: показано, что метод наложения токов двух частот может быть реализован путем их введения в сеть через обмотку типового трансформатора напряжения, соединенную в схему разомкнутого треугольника. Определены рациональные значения частот накладываемых токов, при которых обеспечивается однозначность формируемого параметра при максимально возможной расстройке компенсации. Выполненный анализ показал, что предлагаемый способ при выбранных значениях частот накладываемых токов имеет достаточную чувствительность к малым изменениям расстройки компенсации емкостных токов замыкания на землю. При этом абсолютная методическая погрешность измерения расстройки компенсации, вызываемая активной проводимостью в контуре нулевой последовательности, в типичных случаях не превышает 0,002. Предложены алгоритмы обработки электрических величин с частотами накладываемых токов, при которых электрический сигнал, характеризующий расстройку компенсации, не зависит от абсолютных значений суммарного емкостного тока сети.

Ключевые слова:

Дугогасящий реактор, измерение расстройки компенсации, наложение токов двух частот, трансформатор напряжения, методическая погрешность.

В настоящее время в России и за рубежом уделяется большое внимание выбору режима заземления нейтрали в электрических сетях среднего напряжения (6–35 кВ), способам контроля и управления режимом заземления в процессе эксплуа-

тации, а также способам выполнения защит от однофазных замыканий на землю [1–11].

Наиболее распространенными сетями среднего напряжения являются распределительные сети городов и крупных промышленных предприятий с

заземлением нейтрали через дугогасящие реакторы (ДГР) для компенсации емкостного тока замыкания на землю. Эффективность применения компенсации при прочих равных условиях тем выше, чем точнее настроены ДГР при текущем значении емкостного тока, который может изменяться в довольно широких пределах из-за включения или отключения отдельных участков сети. Точность настройки принято оценивать коэффициентом расстройки компенсации, которая определяется следующим образом

$$\nu = 1 - I_L / I_C, \quad (1)$$

где I_L , I_C – соответственно суммарный ток дугогасящих реакторов и суммарный емкостный ток при замыкании на землю.

В процессе эксплуатации сети необходимо непрерывно измерять коэффициент ν , чтобы осуществлять соответствующее изменение тока ДГР. При использовании в сети плавно регулируемых ДГР осуществляется автоматическая настройка компенсации емкостных токов. При этом достаточно зафиксировать отклонение и знак расстройки в пределах некоторой заданной зоны нечувствительности. При использовании в сети ДГР со ступенчатым ручным управлением, что встречается довольно часто, полезна непрерывная индикация расстройки компенсации в некоторых пределах. Как правило, достаточно пределов $\pm 0,2$.

В настоящее время наибольшее распространение получили устройства, основанные на измерении напряжения промышленной частоты на ДГР, например [12]. Для реализации устройств, основанных на измерении напряжения промышленной частоты, необходимые электрические величины создаются путем введения в сети искусственной несимметрии. Однако при этом в ряде случаев имеют место большие методические погрешности из-за влияния случайного по модулю и по фазе естественного напряжения несимметрии.

В последние годы предложен и реализован на практике метод настройки ДГР, основанный на измерении частоты свободных колебаний в контуре нулевой последовательности [13].

Известен ряд методов и устройств, основанных на наложении на сеть токов с частотой, отличной от промышленной [14–16]. Важным преимуществом методов, основанных на наложении на сеть токов непромышленной частоты, является принципиальная возможность отстройки от влияния случайного напряжения несимметрии с помощью соответствующей фильтрации по частоте. В одном из таких устройств источник непромышленной частоты должен включаться в цепь, объединенную со стороны заземления всех ДГР сети. Это возможно только при установке всех ДГР в пределах одной подстанции [15]. Алгоритм решения задачи настройки ДГР в работе [14] предусматривает измерение значения емкостной проводимости сети, а затем настройку ДГР в соответствии с этой проводимостью. Такое решение задачи, *во-первых*, приводит к усложнению соответствующих устройств

и, *во-вторых*, требует учета индивидуальных характеристик управляемых ДГР.

Заслуживают внимания методы настройки ДГР, основанные на одновременном наложении токов двух частот. Для реализации одного из возможных вариантов такого метода, предложенного в [16], требуется подключение к контуру нулевой последовательности двух источников с очень малым внутренним сопротивлением, которые в то же время не должны шунтировать друг друга.

Реализация метода наложения двух частот, предложенная в [17], требует измерения суммарного тока ДГР, что не всегда можно осуществить по причинам, приведенным выше.

В то же время специфика задачи настройки ДГР состоит в том, что значения емкостной проводимости сети относительно земли и значения индуктивности ДГР определять не требуется, а требуется определять только их соотношение. Это очевидно из (1), так как токи I_L , I_C соответственно равны $I_L = U_\phi / \omega_n L$, $I_C = U_\phi \omega_n C$, где U_ϕ – фазное напряжение сети, ω_n – частота промышленного тока. Следовательно,

$$\nu = 1 - \frac{1}{\omega_n^2 LC}, \quad (2)$$

где C – суммарная емкость фаз сети относительно земли; L – эквивалентная индуктивность ДГР.

В данной статье предлагается и анализируется вариант реализации метода наложения токов двух частот, который, по мнению авторов, не имеет принципиальных недостатков по сравнению с известными предложениями по использованию такого метода.

Наложение вспомогательных токов осуществляется через вторичные обмотки типовых трансформаторов напряжения. Такое решение данной задачи обусловлено также и тем, что в настоящее время имеется опыт использования трансформаторов напряжения для наложения тока непромышленной частоты с целью выполнения защит от замыканий на землю в обмотке статора синхронных генераторов [18, 19]. Схема подключения основных элементов для реализации измерения расстройки компенсации приведена на рис. 1.

В схеме рис. 1 все линии и нагрузки сети замещены одной эквивалентной линией Л с суммарной емкостью фаз C_ϕ и эквивалентной нагрузкой Н. Продольные сопротивления участков линий сети на частоте наложенных токов намного меньше емкостных сопротивлений фаз и сопротивления дугогасящих реакторов, поэтому при любом размещении ДГР они могут быть замещены одним эквивалентным ДГР и эквивалентным заземляющим трансформатором.

Через вторичную обмотку трансформатора напряжения TV-1, соединенную по схеме разомкнутого треугольника, на сеть накладываются токи I_1 , I_2 двух частот ω_1 , ω_2 , причем $\omega_1 < \omega_n$, а $\omega_2 > \omega_n$. Так как токи вводятся через разомкнутый треугольник, то они создают в сети напряжения нулевой

последовательности U_1, U_2 , соответственно с частотами ω_1, ω_2 , которые выделяются частотными фильтрами и измеряются на разомкнутом треугольнике трансформатора напряжения TV-2.

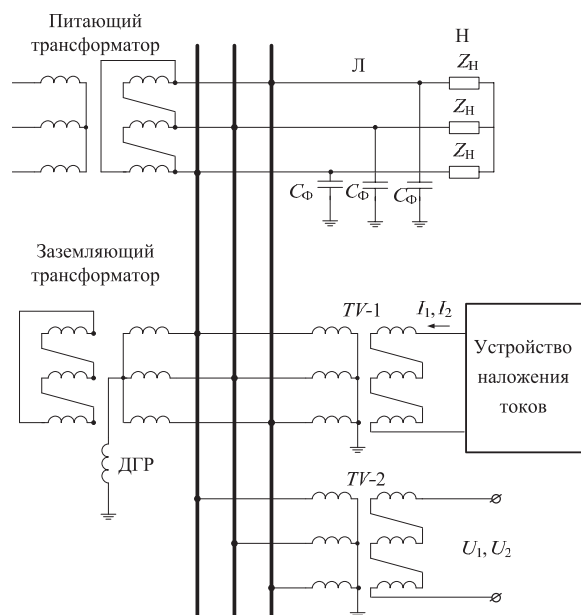


Рис. 1. Схема подключения основных элементов для реализации измерения расстройки компенсации

Fig. 1. Connection diagram of basic elements to implement the measurement of compensation detuning

По отношению к источникам токов I_1, I_2 все фазы сети соединены через малые сопротивления питающего трансформатора и нагрузки, поэтому исходная схема может быть замещена схемой нулевой последовательности, приведенной на рис. 2.

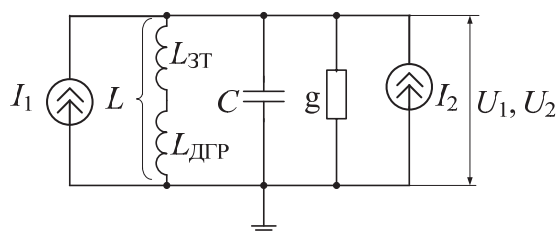


Рис. 2. Схема нулевой последовательности

Fig. 2. Zero sequence network

В статье рассматриваются только принципиальные основы предлагаемого метода контроля расстройки компенсации и основные методические погрешности. Аппаратные погрешности должны, безусловно, учитываться, но на стадии конкретной технической реализации. При такой постановке задачи трансформаторы TV-1 и TV-2 принимаются идеальными, а вторичные и первичные токи и напряжения частот ω_1, ω_2 строго пропорциональными друг другу. Для упрощения дальнейших записей первичные и вторичные токи и напряжения обозначены одинаково.

В схеме замещения кроме параметров L и C учтена также проводимость g , учитывающая активную проводимость изоляции фаз сети, потери в ДГР, а также эквивалентная индуктивность заземляющих трансформаторов $L_{ст}$, к нейтрали которых подключены дугогасящие реакторы с эквивалентной индуктивностью $L_{ДГР}$. Если мощность заземляющих трансформаторов соизмерима с мощностью ДГР, то индуктивность $L_{ст}$ может составлять несколько процентов от индуктивности ДГР. Однако, как видно из схемы рис. 2, влияние индуктивности заземляющих трансформаторов в данном случае автоматически учитывается в эквивалентной индуктивности L и не вызывает методических погрешностей.

Примем для вводимых в контур нулевой последовательности токов и частоты общие обозначения I_k и ω_k . Тогда абсолютное значение напряжения частоты ω_k , измеряемого на контуре нулевой последовательности, будет равно

$$U_k = I_k Z_k,$$

где Z_k – модуль сопротивления контура нулевой последовательности относительно точки приложения токов I_k .

Выражение для модуля сопротивления Z_k может быть получено в соответствии со схемой рис. 2 и после некоторых преобразований будет иметь вид

$$Z_k = \frac{1}{\omega_k C \sqrt{\left(\frac{g}{\omega_k C}\right)^2 + \left(1 - \frac{1}{\omega_k^2 LC}\right)^2}}. \quad (3)$$

Подставим в (3) величину LC , выраженную из (2), а проводимость g представим, как это принято, через относительную величину d , называемую коэффициентом демпфирования и определяемую как $d=g/(\omega_n C)$. При этом получим

$$U_k = \frac{I_k}{C \omega_n \sqrt{d^2 + \frac{\omega_n^2}{\omega_k^2} \left(\frac{\omega_k^2}{\omega_n^2} - 1 + \nu\right)^2}}.$$

Чтобы получить параметр, зависящий от ν , но независящий от абсолютных параметров конкретной сети, формируется величина, пропорциональная отношению напряжений на частоте ω_1 и ω_2 , которую обозначим A_ν ,

$$A_\nu = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1 \sqrt{d^2 + \frac{1}{K_2^2} (K_2^2 - 1 + \nu)^2}}{I_2 \sqrt{d^2 + \frac{1}{K_1^2} (K_1^2 - 1 + \nu)^2}}, \quad (4)$$

где $K_1 = \omega_1 / \omega_n, K_2 = \omega_2 / \omega_n$.

Коэффициент демпфирования d величина малая и, как правило, лежит в пределах 0,03–0,05, поэтому она вносит небольшую методическую погрешность в измерение ν , которая проанализирована далее, поэтому примем пока $d=0$. Также примем, что источник токов I_1, I_2 выполнен так, что соблюдается условие $I_1/I_2=1$. Тогда

$$A_v = \frac{U_1}{U_2} = \frac{K_1^2(K_2^2 - 1 + \nu)}{K_2^2(K_1^2 - 1 + \nu)}. \quad (5)$$

При решении задачи автоматической настройки компенсации важно оценить чувствительность параметра A_v к малым отклонениям ν от нулевого значения, так как точность поддержания расстройки должна быть не хуже чем $\pm 0,05$. Чувствительность может быть оценена значением производной $dA_v/d\nu$, отнесенной к A_v при $\nu=0$, которая равна

$$\left. \frac{dA_{v*}}{d\nu} \right|_{\nu=0} = \frac{K_1^2 - K_2^2}{(K_1^2 - 1)(K_2^2 - 1)}. \quad (6)$$

Чтобы установить, как при малых значениях ν чувствительность зависит от частоты токов I_1, I_2 , представим предварительно относительные значения частот следующим образом

$$K_1 = \frac{\omega_{\Pi} + \Delta\omega}{\omega_{\Pi}} = 1 + \Delta\omega_*,$$

$$K_2 = \frac{\omega_{\Pi} - \Delta\omega}{\omega_{\Pi}} = 1 - \Delta\omega_*. \quad (7)$$

После подстановки (7) в (6) и некоторых преобразований получим

$$\frac{dA_{v*}}{d\nu} = \frac{4}{\Delta\omega(\Delta\omega^2 - 4)}. \quad (8)$$

Как следует из (8), чувствительность к малым отклонениям ν тем выше, чем меньше $\Delta\omega$, то есть чем ближе частоты токов I_1, I_2 к промышленной частоте. Однако необходимо учитывать, что работа системы автоматической настройки компенсации не должна нарушаться и при больших расстройках компенсации, которые могут иметь место при отключении и повторном включении больших участков сети. Примем максимальное возможное значение расстройки компенсации равным $\nu_{\max} = \pm 0,7$. При таких расстройках компенсации не должна нарушаться монотонность зависимости A_v от ν . Для выполнения этого условия относительные значения частот K_1 и K_2 должны быть приняты такими, чтобы при изменении расстройки компенсации в пределах $\pm 0,7$ ни числитель, ни знаменатель выражения (5) не обращались в ноль.

С учетом такого ограничения частота выше промышленной ($K_1 > 1$) определяется максимальной перекомпенсацией ($\nu_{\max} < 0$) и должна удовлетворять условию

$$K_1 \geq \sqrt{1 + \nu_{\max}}.$$

Частота ниже промышленной ($K_2 < 1$) определяется максимальной недокомпенсацией ($\nu_{\max} > 0$) по условию

$$K_2 \leq \sqrt{1 - \nu_{\max}}.$$

При $|\nu_{\max}| = 0,7$ получаем $K_1 \geq 1,304$, $K_2 \leq 0,547$. Принимаем далее $K_1 = 1,5$ (75 Гц), $K_2 = 0,5$ (25 Гц). При таких значениях частот производная по (6) равна 2,1. Это означает, что в области малых зна-

чений ν при ее изменении, например, на 0,01, параметр A_v изменяется на 0,021.

Для реализации автоматической настройки компенсации необходимо сформировать параметр ΔA_v , который должен удовлетворять условиям при $\nu=0$, $\Delta A_v=0$; при $\nu>0$, $\Delta A_v>0$; при $\nu<0$, $\Delta A_v<0$. (9)

Возможны два варианта формирования такого сигнала. Сигнал формируется как разность текущего значения A_v и его значения при $\nu=0$. В соответствии с (5) этот сигнал, отнесенный к A_v , равен

$$\Delta A_{v*} = 1 - \frac{(K_1^2 - 1)(K_2^2 - 1 + \nu)}{(K_2^2 - 1)(K_1^2 - 1 + \nu)}. \quad (10)$$

Очевидное преобразование (10) позволяет получить выражение для ΔA_{v*} в виде

$$\Delta A_{v*} = \frac{(K_2^2 - K_1^2)\nu}{(K_2^2 - 1)(K_1^2 - 1 + \nu)}. \quad (11)$$

На рис. 3, а приведена зависимость $\Delta A_{v*}(\nu)$, построенная по выражению (11), в диапазоне малых значений расстройки компенсации $\nu = \pm 0,05$, которая, как видно, практически линейная.

Следовательно, с точки зрения обеспечения точности автоматической настройки, чувствительность к положительным и отрицательным отклонениям будет практически одинаковой. Нелинейность зависимости $\Delta A_{v*}(\nu)$ существенно проявляется при реализации визуальной индикации расстройки компенсации в сетях без плавно регулируемых ДГР в диапазоне $\nu = \pm 0,2$. Это необходимо учитывать при градуировке индикатора расстройки (рис. 3, б).

Другой возможный вариант формирования сигнала, удовлетворяющего условию (9), заключается в организации вычислительной процедуры, соответствующей выделению в явном виде расстройки компенсации ν из выражения (5). Это дает сигнал, отнесенный к A_v при $\nu=0$

$$\Delta A_{v*} = \frac{A_v K_2^2 (K_1^2 - 1) - K_1^2 (K_2^2 - 1)}{K_1^2 - A_v K_2^2}. \quad (12)$$

Сигнал ΔA_{v*} по (12) линейно зависит от расстройки компенсации во всем возможном диапазоне изменения $\nu = \pm 0,7$, что показано на рис. 4.

Далее определим абсолютную погрешность $\Delta \nu_{\text{погр}}$ измерения ν , которую вносит активная проводимость в контуре нулевой последовательности. Эту погрешность можно найти, определив $\Delta \nu_{\text{погр}}$ из условия равенства правых частей выражений (4) и (5). Причем в (4) нужно принять $d \neq 0$, $\nu = 0$ и $I_1/I_2 = 1$, а в (5) $\nu = \nu_0 + \Delta \nu_{\text{погр}}$, где ν_0 – это значение фактической расстройки, при котором определяется $\Delta \nu_{\text{погр}}$. Тогда получим

$$\frac{K_1^2(K_2^2 - 1 + \nu_0 + \Delta \nu_{\text{погр}})}{K_2^2(K_1^2 - 1 + \nu_0 + \Delta \nu_{\text{погр}})} = \frac{\sqrt{d^2 + \frac{1}{K_2^2}(K_2^2 - 1)^2}}{\sqrt{d^2 + \frac{1}{K_1^2}(K_1^2 - 1)^2}}. \quad (13)$$

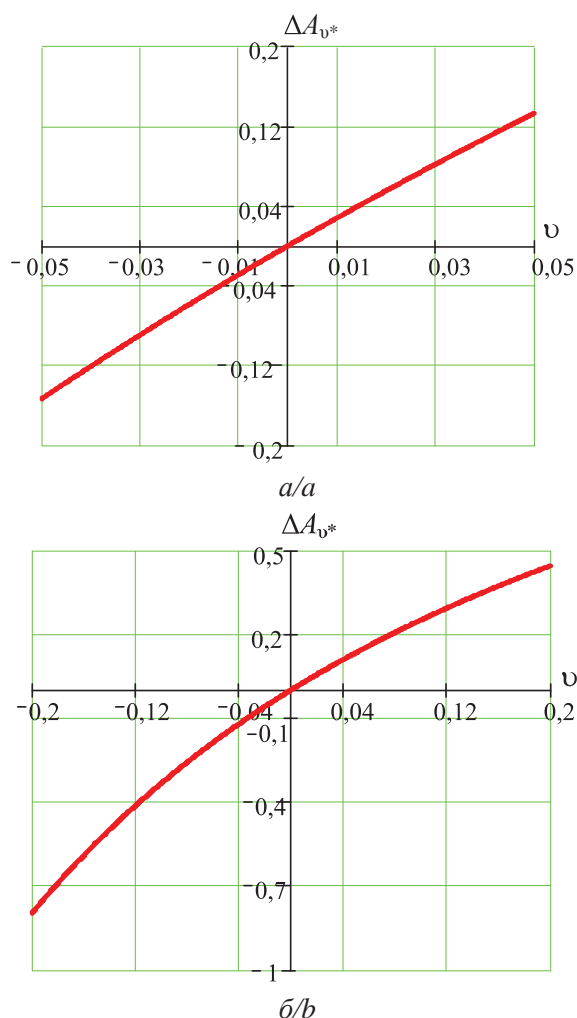


Рис. 3. Изменение параметра ΔA_{v^*} при ν : а) $\pm 0,05$; б) $\pm 0,2$
 Fig. 3. Change of parameter ΔA_{v^*} at ν : а) $\pm 0,05$; б) $\pm 0,2$

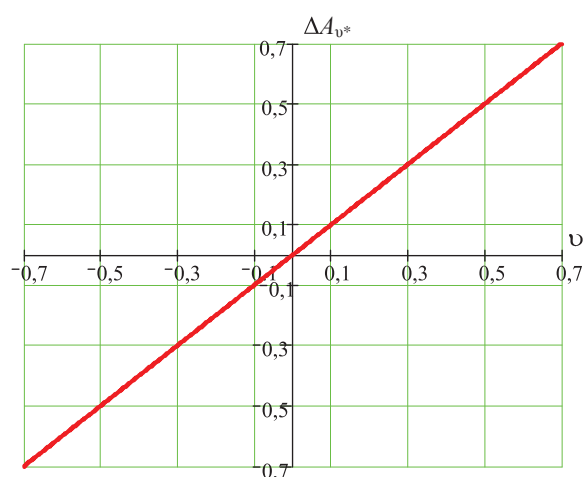


Рис. 4. Зависимость параметра ΔA_{v^*} по (12) в диапазоне $\nu = \pm 0,7$
 Fig. 4. Dependence of parameter ΔA_{v^*} according to (12) in the range of $\nu = \pm 0,7$

Естественно, что, прежде всего, важно определить погрешность при фактически точной настройке. Зависимость абсолютной погрешности от значения коэффициента демпфирования при $\nu_0=0$ приведена на рис. 5.

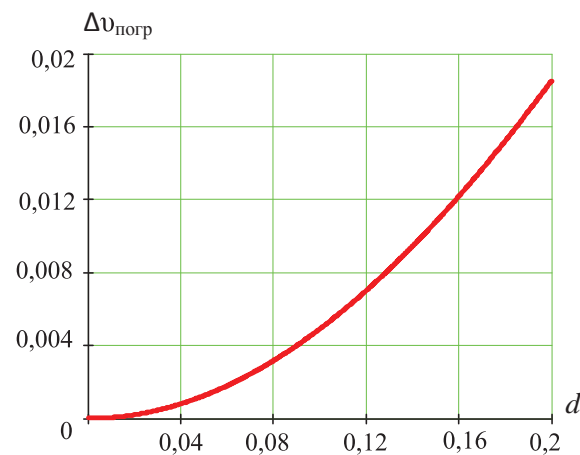


Рис. 5. Зависимость абсолютной погрешности измерения ν при фактически точной настройке при различных коэффициентах демпфирования
 Fig. 5. Dependence of absolute ν measurement error at actual fine adjustment at various damping parameters

Влияние активной проводимости проявляется как недокомпенсация. При типичном значении $d=0,05$ абсолютная погрешность составляет 0,00124. Такое значение методической погрешности при установке точности настройки порядка 0,01–0,02, безусловно, не является препятствием для практической реализации предлагаемого способа измерения расстройки компенсации.

В настоящее время находит применение режим комбинированного заземления нейтрали, который заключается в том, что параллельно к ДГР подключается резистор с проводимостью 0,15–0,20 от емкостной проводимости фаз сети относительно земли [20]. Коэффициент демпфирования d при этом составляет порядка 0,2. Даже при таком значении d абсолютная погрешность измерения расстройки компенсации не превышает 0,02.

Выводы

1. Способ измерения степени расстройки компенсации на основе наложения токов двух частот через типовой трансформатор напряжения позволяет обеспечить измерение расстройки компенсации емкостного тока при изменении коэффициента демпфирования d в диапазоне от 0,05 до 0,2 с методической погрешностью соответственно от 0,00124 до 0,02.
2. Основой для технической реализации предлагаемого способа контроля расстройки компенсации может быть источник тока промышленной частоты, используемый для защиты от замыканий на землю генераторов и апробированный на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кужеков С.Л. Кратковременное низкоомное заземление нейтралей в сетях 6–10 кВ // *Новости электротехники*. – 2013. – № 2 (80). – С. 60–62.
2. Особенности использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6–10 кВ / В.А. Шуин, О.А. Сарбеева, Е.С. Шагурина, Д.И. Ганджаев // *Вестник ИГЭУ*. – 2011. – № 1. – С. 32–41.
3. Манилов А.М., Барна А.А., Мельник Д.А. Способ обеспечения чувствительности защит и улучшения условия ограничения перенапряжения при однофазном замыкании на землю в электрических сетях 6–10 кВ с комбинированным заземлением нейтрали // *Электричество*. – 2013. – № 9. – С. 7–11.
4. Рыжкова Е.Н., Фомин М.А., Садовская К.О. О практической возможности изменения режима нейтрали сетей с малыми токами замыкания на землю // *Промышленная энергетика*. – 2012. – № 7. – С. 15–28.
5. Обабков В.К., Целуевский Ю.Н. Обзор существующих алгоритмов управления контуром нулевой последовательности сети в задаче подавления дуговых замыканий на основе резонансного заземления нейтрали URL: <http://www.ntbe.ural.ru/stat2.htm> (дата обращения: 05.05.2014).
6. Pramod P., George G. Characterization of a thyristor controlled reactor // *Electric power system research*. – 1997. – V. 41. – P. 141–149.
7. Tang Y. A Complete set of automatic compensation equipment of a capacitive charging current in the application of a medium-voltage power system // *Electric power system research*. – 1997. – V. 41. – P. 35–41.
8. Folliot P., Boyer J., Bolle S. Neutral grounding reactor for medium voltage networks // *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. – Stockholm, 2001. – V. 1. – P. 18–21.
9. Chen H., Chen W.X. Controllable Arc-Extinguishing Reactor with high speed response // *Proceedings of the fifth international conference on electrical machines and systems*. – Amsterdam, 2001. – V. 1. – P. 233–235.
10. Рыжкова Е.Н. Управление защитным резистором для сетей 6–35 кВ с активно-индуктивным заземлением нейтрали // *Электричество*. – 2007. – № 3. – С. 32–40.
11. Зацепина В.И., Волтуева И.А. Обеспечение резонансного заземления нейтралей в распределительных сетях 6–35 кВ // *Промышленная энергетика*. – 2008. – № 4. – С. 45–52.
12. Микроконтроллерный регулятор МИРК-5 URL: <http://mikroingining.ru/index.php/product/catalog/mirk-5> (дата обращения: 26.03.2014).
13. Соловьев И.В., Петров В.С., Петров М.И. Метод автоматического управления плунжерными дугогасящими реакторами // *Вестник Чувашского университета*. – 2010. – № 3. – С. 251–259.
14. Система автоматической настройки компенсации: пат. на полезную модель № 88221; заявл. 08.06.2009; опубл. 27.10.2009.
15. Непрерывный контроль степени расстройки компенсации и автоматическая настройка дугогасящих реакторов в электрических сетях 6–10 кВ на основе наложения токов с частотой 25 Гц / Р.А. Вайнштейн, С.Л. Березницкий, В.В. Шестакова, С.М. Юдин // *Известия ВУЗов. Электромеханика*. – 2004. – № 4. – С. 54–59.
16. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
17. Шкрабец Ф.П., Остапчук А.В. Система автоматического управления дугогасящим реактором. URL: <http://masters.donntu.edu.ua/2011/etf/agytin/library/tez2.htm> (дата обращения: 29.09.2014)
18. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов в схеме блоков с реактированной отпайкой / Р.А. Вайнштейн, А.В. Доронин, А.М. Наумов, С.М. Юдин // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2011. – № 6. – С. 98–101.
19. Доронин А.В. Функционирование защиты обмотки статора генератора от замыканий на землю с наложением контрольного тока через трансформатор напряжения при перемежающихся замыканиях // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 61–66.
20. Ильиных М.В., Сарин Л.И., Ширковец А.И. Исследование переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ ТЭЦ металлургического комбината с комбинированным заземлением нейтрали // *Электрические сети и системы*. – 2008. – № 3. – С. 38–47.

Поступила 11.04.2014 г.

UDC 621.3.078

AUTOMATIC TUNING OF ARC-EXTINGUISHING REACTORS FOR 6–35 kV MEDIUM-VOLTAGE POWER SYSTEM APPLYING THE METHOD OF TWO FREQUENCIES AUXILIARY CURRENTS OVERLAP

Robert A. Vaynshteyn,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vra@tpu.ru

Vera V. Shestakova,

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: shestakova@tpu.ru.

Sergey N. Pashkovskiy,

Cand. Sc., engineer of scientific and industrial enterprise «EKRA», 3, I. Yakovlev
Avenue, Cheboksary, 428003, Chuvashiya. E-mail: pashkovsky_sn@ekra.ru

Svyatoslav M. Yudin,

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ysm@elti.tpu.ru

Aleksey N. Serbulov,

student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: rasstofun@gmail.com

The urgency of the discussed issue is caused by the need to control automatic tuning of the arc-extinguishing reactor in a medium-voltage power system. Full effect of the application of such reactors takes place in the case if ARC-extinguishing reactor is automatically adjusted coils in resonance with the network total capacity. To realize automatic adjustment it is necessary to obtain continuously the information on deviation from resonance in the form of electrical signal.

The main aim of the research is to design the method for controlling arc-extinguishing reactor adjustment in medium-voltage power systems, based on superposition of two different non-industrial frequencies currents. Typical high-voltage electrical equipment can be used for the design.

Investigation methods: mathematical modeling with software packages MATHCAD, MATLAB.

Results. It is shown that the method proposed is sensitive enough to small changes in detuning of the capacitive earth fault currents. The authors have determined that currents could be input into the network through the winding of a conventional voltage transformer connected by open delta. The absolute methodical error of the compensation detuning measurements was calculated. It is caused by conductance in a zero sequence circuit. It was proved that typically absolute methodical error does not exceed 0,002. The paper introduces the algorithms of processing electrical quantities with frequencies of superimposed currents when the electric signal characterizing compensation detuning does not depend on absolute values of network total capacitive current.

Key words:

ARC-extinguishing reactor, measuring the detuning compensation, currents of two frequencies, voltage transformer, methodical error.

REFERENCES

1. Kuzhekov S.L. Kratkovremennoe nizkoomnoe zazemlenie neytrali v setyakh 6–10 kV [A short-term neutral grounding hints for networks 6–10 kV]. *Novosti elektrotehniki*, 2013, vol. 2, no. 80, pp. 60–62.
2. Shuin V.A., Sarbeeva O.A., Shagurina E.S., Gandzhaev D.I. Osobennosti ispolzovaniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa v zashchitakh ot zamykaniy na zemlyu elektricheskikh setey 6–10 kV [Features of using transition electric values in earth leakage protections of 6–10 kV electrical networks]. *Vestnik IGEU*, 2011, vol. 1, pp. 32–41.
3. Manilov A.M., Barna A.A., Melnik D.A. Sposob obespechivaniya chuvstvitelnosti zashchit i uluchsheniya usloviya ogranichehiya perenapryazheniya pri odnofaznom zamykanii na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV s kombinirovannym zazemleniem neytrali [The way to ensure the protection sensibility and to improve the conditions of over voltage limits for single line-to-ground fault in 6–10 kV electrical networks with compound neutral grounding]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 9, pp. 7–11.
4. Ryzhkova E.N., Fomin M.A., Sadovskaya K.O. O prakticheskoy vozmozhnosti izmeneniya rezhima neytrali setey s malymi tokami zamykaniya na zemlyu [On feasibility of changing neutral point connection in networks with small ground-fault currents]. *Pro-myshlennaya energetika*, 2012, no. 7, pp. 15–28.
5. Obabkov V.K., Tseluevskiy Yu.N. *Obzor sushchestvuyushchikh algoritmov upravleniya konturom nulevoy posledovatelnosti seti v zadache podavleniya dugovykh zamykaniy na osnove rezonansnogo zazemleniya neytrali* [A review of the existing zero-sequence circuit control algorithms in fault arc suppression task based on resonant neutral grounding]. Available at: <http://www.ntbe.ural.ru/stat2.htm> (accessed 05 May 2014).
6. Pramod P., George G. Characterization of a thyristor controlled reactor. *Electric power system research*, 1997, vol. 41, pp. 141–149.
7. Tang Y. A Complete set of automatic compensation equipment of a capacitive charging current in the application of a medium-voltage power system. *Electric power system research*, 1997, vol. 41, pp. 35–41.
8. Folliot P., Boyer J., Bolle S. Neutral grounding reactor for medium voltage networks. *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. Stockholm, 2001. Vol. 1, pp. 18–21.

9. Chen H., Chen W.X. Controllable Arc-Extinguishing Reactor with high speed response. *Proceedings of the fifth international conference on electrical machines and systems*. Amsterdam, 2001, vol. 1, pp. 233–235.
10. Ryzhkova E.N. Upravlnie zashchitnym rezistorom dlya setey 6–35 kV s aktivno-induktivnym zazemleniem neytrali [Control of protective resistor for 6–35 kV networks with active-inductive neutral grounding]. *Elektrichestvo*, 2007, no. 3, pp. 32–40.
11. Zatsepina V.I., Voltueva I.A. Obespechenie rezonansnogo zazemleniya neytraley v raspredelitelykh setyakh 6–35 kV [Providing neutrals resonance grounding of 6–35 kV distribution network]. *Promyshlennaya energetika*, 2008, no. 4, pp. 45–52.
12. *Mikrokontrollerny regulyator MIRK-5* [Microcontroller selector MIRK-5]. Available at: <http://mikroinginiring.ru/index.php/product/catalog/mirk-5> (accessed 26 March 2014).
13. Solovov I.V., Petrov V.S., Petrov M.I. Metod avtomaticheskogo upravleniya plunzhernymi dugogasyashchimi reaktorami [Automatic control method of arc control reactors]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 251–259.
14. Dolgoplov S.G., Aliev R.G., Egipiti E.V. *Sistema avtomaticheskoy nastroyki kompensatsii* [Automatic tuning system of compensation]. Patent for utility model, no. 88221, 2009.
15. Vaynshtein R.A., Berezniy S.L., Shestakova V.V., Yudin S.M. Nepreryvny control stepeni rasstroyki kompensatsii i avtomaticheskaya nastroyka dugogasyashchikh reaktorov v elektricheskikh setyakh 6–10 kV na osnove nalozheniya tokov s chastotoy 25 Gts [Continuous control of compensation detuning degree and automatic tuning of arc suppression reactors in 6–10 kV electric networks on the basis of applying currents with 25 Hz frequency]. *Izvestiya VUZov. Elektromekhanika*, 2004, no. 4, pp. 54–59.
16. Vilgeim R., Uoters M. *Zazemlenie neytrali v vysokovolnykh sistemakh* [Grounding of neutrals point in high voltage systems]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1959. 414 p.
17. Shkrabets F.P., Ostapchuk A.V. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya dugogasyashchim reaktorom* [Automatic control system of arc suppression reactor]. Available at: <http://masters.donntu.edu.ua/2011/etf/agytin/library/tez2.htm> (accessed 29 September 2014).
18. Vaynshtein R.A., Doronin A.V., Naumov A.M., Yudin S.M. Zashchita ot zamykaniy na zemlyu v obmotke statora generatorov v skheme blokov s reaktivnoy otpaykoy [Protection against short-circuits to ground in generator stator winding in a circuit of blocks with reaction tapping]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2011, no. 6, pp. 98–101.
19. Doronin A.V. Funktsionirovanie zashchity obmotki statora generatora ot zamykaniy na zemlyu s nalozhcheniem kontrolnogo toka cherez transformator napryazheniya pri peremzhayushchikhsya zamykaniyakh [Operation of generator stator winding protection against short-circuits to ground at control current overlapping through voltage transformer at intermittent closures]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 61–66.
20. Ilinykh M.V., Sarin L.I., Shirkovets A.I. Issledovanie perekhodnykh protsessov pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu v seti 6 kV TETS metallurgicheskogo kombinata s kombinirovannym zazemleniem neytrali [Research of transients in single line-to-ground faults in 6 kV network of metallurgical complex TPP with a neutral compound grounding]. *Elektricheskije seti i sistemy*, 2008, no. 3, pp. 38–47.

Received: 11 April 2014.