

## КОНТРОЛЬ НАСТРОЙКИ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ С НАЛОЖЕНИЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ТИПОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ

Вайнштейн Р.А.<sup>1</sup>, Коломиец Н.В.<sup>1</sup>, Пономарчук Н.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30) E-mail: [vra@tpu.ru](mailto:vra@tpu.ru)

Предлагается способ реализации метода контроля степени расстройки компенсации емкостных токов в электрических сетях среднего напряжения (6 – 35 кВ) на основе введения в контур нулевой последовательности тока непромышленной частоты. В предлагаемом способе подключение источника непромышленной частоты осуществляется через вторичные цепи типового трансформатора напряжения, а измерение электрических величин может осуществляться через низковольтные трансформаторы тока, находящиеся на потенциале земли. Формируемый в устройстве электрический сигнал может использоваться как для визуального контроля степени расстройки компенсации, так и для автоматической настройки дугогасящих реакторов. Данный способ выполнения устройства контроля степени расстройки компенсации может применяться и в сетях с комбинированным заземлением нейтрали, в которых суммарная относительная активная проводимость в контуре нулевой последовательности может иметь значение до 20%. Дополнительная абсолютная погрешность измерения расстройки компенсации, вызываемая повышенной проводимостью, не превышает 0,9%.

Ключевые слова: источник непромышленной частоты, трансформатор напряжения, расстройка компенсации, дугогасящий реактор.

## CONTROL OF THE CAPACITIVE CURRENTS COMPENSATION SETTING BASED ON SUPERPOSITION OF THE ADDITIONAL CURRENT VIA VOLTAGE TRANSFORMER

Vaynshteyn R.A.<sup>1</sup>, Kolomic N.V.<sup>1</sup>, Ponomarchuk N.R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia, E-mail: [vra@tpu.ru](mailto:vra@tpu.ru)

An implementation of control method of the detuning compensation degree of capacitive currents in medium voltage electrical power system (6-35 kV) based on introduction of residual-current circuit at nonindustrial frequency is described in this paper. In the proposed method the connection of the source of nonindustrial frequency is carried out via the secondary circuit of the voltage transformer, while measuring of nonindustrial frequency value is carried out via low-voltage current transformers connected to ground. The electrical signal produced by this device can be used both for visual controlling of the detuning compensation degree and automatic setting of ARC-suppressing reactors. The above mentioned approach can be used in electric power system with combined neutral grounding where the value of total relative conductance in zero-sequence scheme equals up to 20%. Additional absolute measurement error of the detuning compensation caused by increased conductivity does not exceed 0.9%.

Keywords: Source of nonindustrial frequency, voltage transformer, detuning compensation, ARC-suppressing reactor.

В настоящее время наиболее распространенным режимом заземления нейтрали в кабельных электрических распределительных сетях среднего напряжения является режим заземления через дугогасящие реакторы (ДГР) для компенсации емкостного тока замыкания на землю.

**Цель исследования** – усовершенствование средств контроля настройки для компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ.

Важной эксплуатационной задачей является непрерывный контроль степени расстройки компенсации, которую, как известно, принято определять следующим образом

$$\nu = 1 - \frac{I_L}{I_C}, \quad (1)$$

где  $I_L$  и  $I_C$  соответственно суммарный ток дугогасящих реакторов и суммарный емкостный ток при устойчивом металлическом (без переходного сопротивления) замыкании на землю.

Эффективность дугогашения тем выше, чем точнее поддерживается настройка дугогасящих реакторов. По существующим требованиям расстройка компенсации не должна выходить за пределы  $\pm 5\%$ . В то же время текущее значение емкостного тока замыкания может изменяться в довольно широких пределах из-за включения или отключения отдельных участков сети, что приводит к расстройке компенсации более допустимого значения.

Непрерывное формирование электрического сигнала, характеризующего расстройку компенсации, позволяет при использовании в сети плавнорегулируемых ДГР осуществлять их автоматическую настройку. При использовании в сети ДГР со ступенчатым ручным управлением полезна непрерывная индикация расстройки компенсации в пределах около  $\pm 20\%$ .

В настоящее время наибольшее распространение получили устройства, основанные на использовании напряжения несимметрии промышленной частоты на ДГР, например [1]. Для реализации устройств, основанных на использовании напряжения несимметрии 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[2].

Известен ряд методов и устройств, основанных на наложении на сеть токов с частотой, отличной от промышленной [3–5]. Важным преимуществом методов, основанных на наложении на сеть токов не промышленной частоты, является принципиальная возможность отстройки от влияния случайного напряжения несимметрии с помощью соответствующей фильтрации по частоте. В одном из таких устройств источник не промышленной частоты должен включаться в первичную цепь, объединенную со стороны заземления всех ДГР сети [3]. Это возможно только при установке всех ДГР в пределах одной подстанции.

В устройстве по [3] для получения информации о расстройке компенсации с помощью трансформаторов напряжения измеряются напряжения на дугогасящем реакторе и на источнике не промышленной частоты, как показано на схеме рис.1.

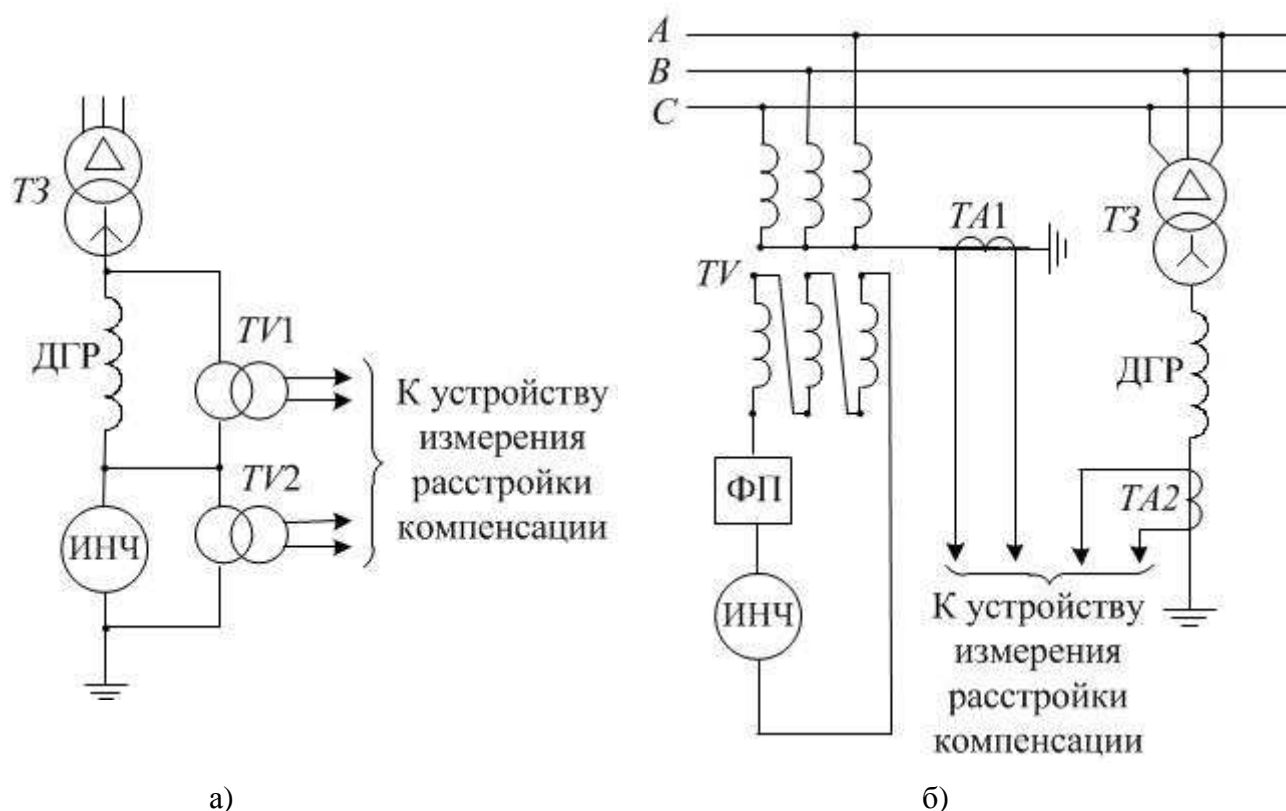


Рис.1. Схемы реализации метода контроля степени расстройки компенсации известная (а) и предлагаемая (б): ТЗ – трансформатор заземляющий; ДГР – дугогасящий реактор; TV, TV1, TV2 – трансформаторы напряжения; ТА1, ТА2 – трансформаторы тока; ИНЧ – источник не промышленной частоты; ФП – фильтр присоединения

В предлагаемом устройстве источник не промышленной частоты включается в цепь через фильтр присоединения в цепь разомкнутого треугольника типового трансформатора напряжения, а информацию о расстройке компенсации получают измерением суммарного тока ДГР.

Таким образом, применение предлагаемого в статье устройства также возможно при установке всех ДГР на одной подстанции. Однако предлагаемое выполнение по рис. 1,б имеет ряд функциональных и технических преимуществ. Во-первых, исключается одна из значительных составляющих методической погрешности, обусловленная тем, что в устройстве по рис.1 не учитывается наличие в цепи ДГР индуктивности нулевой последовательности заземляющего трансформатора. Во-вторых, отпадает необходимость в двух высоковольтных измерительных трансформаторах напряжения. Измерение электрических величин не промышленной частоты в устройстве по рис. 1,б может

осуществляться низковольтными трансформаторами тока, так как последние, как видно, находятся на потенциале “земли”.

Формирование электрической величины, характеризующей расстройку компенсации, далее рассмотрим по схеме замещения контура нулевой последовательности, приведенной на рис. 2.

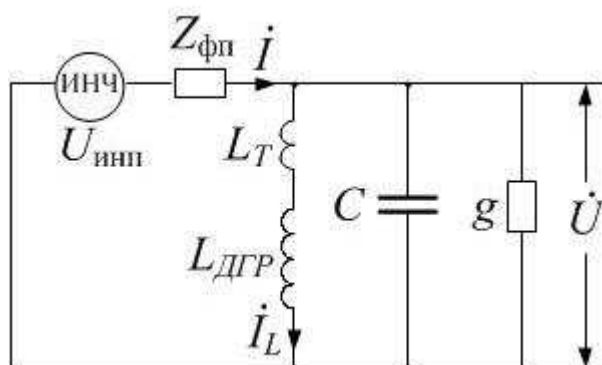


Рис. 2. Схема замещения контура нулевой последовательности:  $L$  – эквивалентная индуктивность дугогасящих реакторов;  $C$  – суммарная емкость трех фаз сети;  $g$  – эквивалентная активная проводимость контура нулевой последовательности;  $L_T$  – индуктивность нулевой последовательности заземляющего трансформатора;  $Z_{пр}$  – сопротивление фильтра присоединения

Напряжение источника не промышленной частоты (ИНП) и сопротивление фильтра присоединения приведены в схеме рис. 2 к ступени первичного напряжения. Примем, что частота источника не промышленной частоты  $\omega_n$  отличается от частоты промышленного тока  $\omega_p$  в  $\beta$  раз, то есть  $\omega_n = \beta \omega_p$ .

Ток в цепи ДГР по схеме рис. 2 равен

$$\dot{I}_L = \dot{I} \frac{1}{\frac{g + j\omega_n C}{1} + j\omega_n L}, \quad (2)$$

где  $L = L_{ДГР} + L_T$ .

При отнесении параметров всех элементов схемы к суммарной емкостной проводимости сети на частоте  $\omega_n$  получим

$$I_L = I \frac{\frac{1}{\frac{g}{j\omega_H C} + 1}}{\frac{1}{\frac{g}{j\omega_H C} + 1} - \omega_H^2 LC}, \quad (4)$$

Далее введем общепринятый параметр, называемый коэффициентом демпфирования сети

$$d = \frac{g}{\omega_H C}. \quad (5)$$

Так как в (1)  $I_L = \frac{U_\phi}{\omega_H L}$ , а  $I_C = U_\phi \omega_H C$ , то нетрудно установить, что

$$\omega_H^2 LC = \frac{\beta^2}{1 - \nu}. \quad (6)$$

С учетом (1), (4), (5) абсолютная величина тока  $I_L$  получится равной

$$I_L = I \frac{1 - \nu}{\sqrt{(1 - \nu - \beta^2)^2 + (d\beta)^2}}. \quad (7)$$

Коэффициент  $d$ , как правило, не превышает значения 0,05 и только лишь в тех случаях, когда применяют комбинированное заземление нейтрали, может достигать значения около 0,2. Принципиальным обстоятельством, как для получения приемлемой зависимости параметра  $I_L$  от расстройки компенсации, так и с точки зрения технической реализации является выбор частоты вспомогательного источника. Очевидно, что частота вспомогательного источника должна достаточно сильно отличаться от промышленной, так как при этом облегчается задача выделения составляющей непромышленной частоты на фоне сигналов, обусловленных естественной несимметрией сети. С этой точки зрения приемлемыми, например, могут быть частоты 25 Гц или 100 Гц. Для выбора одного из этих значений определим чувствительность параметра  $I_L$  к изменению расстройки компенсации при каждой из этих частот. В качестве меры чувствительности примем значение производной

$I_L$  по  $\nu$  при  $\nu = 0$ , которое равно  $\frac{\beta^2}{(1-\beta^2)^2}$ . Абсолютное значение этой величины как при  $\beta =$

0,5, так и  $\beta = 2$  получается одинаковым и равным 0,44.

Определим также при этих двух значениях частот влияние  $d$  на абсолютную величину измеряемого тока  $I_L$ , например, при  $\nu = 0$  и  $d = 0,2$ . Отличие абсолютной величины  $I_L$  из-за влияния  $d$  как при  $\beta = 0,5$ , так и  $\beta = 2$  составляет около 0,9%.

Таким образом, характеристики устройства для измерения расстройки компенсации как при частоте 25 Гц, так и при частоте 100 Гц получаются одинаковыми. Дополнительным фактором, который следует учесть при окончательном выборе частоты, является наличие в сети в нормальном режиме, кроме напряжения несимметрии промышленной частоты, также и напряжения с частотами, образующими систему нулевой последовательности, в частности с частотами 150 Гц. Поскольку относительное отличие частоты 25 Гц по отношению к частоте 150 Гц значительно больше, чем частоты 100 Гц, то применение частоты 25 Гц может быть предпочтительным с точки зрения решения задачи частотной фильтрации.

В аппаратной части устройства формируется величина, пропорциональная разности абсолютного значения тока  $I_L$  и его значения при  $\nu = 0$ , отнесенная к значению суммарного тока  $I$ , который измеряется в цепи заземления трансформатора напряжения  $TV1$  (рис.1,б)

$$U_\nu = \pm K \left( \left| \frac{1-\nu}{1-\nu-\beta^2} \right| - \left| \frac{1}{1-\beta^2} \right| \right), \quad (8)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности.

В формуле (8) знак плюс принимается при  $\beta = 0,5$  и знак минус – при  $\beta = 2$ .

Параметр  $U_\nu$  удовлетворяет условию, позволяющему использовать его либо для индикации расстройки компенсации, либо для автоматической настройки ДГР, так как

$$\text{при} \begin{cases} \nu = 0; & U_\nu = 0; \\ \nu > 0; & U_\nu > 0; \\ \nu < 0; & U_\nu < 0. \end{cases}$$

### Выводы:

1. Показана возможность решения задачи контроля расстройки компенсации емкостных токов, основанного на наложении тока непромышленной частоты, путем включения вспомогательного источника непромышленной частоты в цепь разомкнутого треугольника типового трансформатора напряжения.

2. Предпочтительным для реализации устройства контроля расстройки компенсации является использование вспомогательного источника с частотой 25 Гц.

### Список литературы

1. Микроконтроллерный регулятор МИПК-5 URL: <http://mikroinginiring.ru/index.php/product/catalog/mirk-5> (дата обращения: 21.01.2015).
2. Соловьев И.В., Петров В.С., Петров М.И. Метод автоматического управления плунжерными дугогасящими реакторами // Вестник Чувашского университета. – 2010. – № 5 – С. 251–259.
3. 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.
4. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
5. 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: 10.02.2015).

### Рецензенты:

Хрущев Ю.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электрических сетей и электротехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск;

Лукутин Б.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.