

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ С КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ

Петров М.И. (НПП «Бреслер»), Ильин В.Ф., Петров Е.М., (НПП «Экра», Чебоксары)

Современная микропроцессорная техника и методы обработки электрических сигналов позволяют на качественно более высоком уровне решать задачи автоматизации управления дугогасящими реакторами (ДГР). Принципиальным отличием представленной в статье системы автоматической настройки (САН) ДГР является отказ от создания в сети постоянной искусственной несимметрии, приводящей зачастую к значительным перекосам фазных напряжений. Применение метода настройки с контролем параметров контура нулевой последовательности (КНП) сети позволяет эффективно решать задачи управления как плавно-, так ступенчато-регулируемыми ДГР, обеспечить их параллельную работу, в том числе, и в случае комбинированного режима заземления нейтрали, а также параллельную работу ДГР при объединении нескольких секций шин.

Введение

Основным назначением компенсации емкостных токов в сетях 6-35 кВ является снижение токов замыкания на землю. При этом проявляется ряд факторов, положительно сказывающихся на работе сети: создаются условия для гашения дуги; снижаются уровни перенапряжений; ограничивается скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе; улучшаются условия электробезопасности и др.

Наиболее полное выполнение перечисленных условий достигается при резонансной настройке контура нулевой последовательности, когда индуктивный ток реактора равен суммарному емкостному току сети, который определяется фазной емкостью всего электрооборудования: кабеля, трансформаторов, двигателей, и т.п. Отключение (включение) любого присоединения приводит к изменениям тока замыкания на землю. С целью поддержания резонансной настройки плавнорегулируемые дугогасящие реакторы должны комплектоваться автоматическими регуляторами, а ступенчато-регулируемые – устройствами определения расстройки компенсации [1, 2]. При отсутствии возможности настройки дугогасящего реактора на резонансный режим допускается настройка с перекомпенсацией, но не более 5 А. Допустимое значение степени расстройки компенсации не должно превышать 5%. Эти два требования накладывают ограничения по точности поддержания режима настройки в сетях при средних (100-300А) и больших (выше 300А) токах замыкания на землю.

Настройка с контролем амплитуды и фазы напряжения нейтрали

Настоящее время в сетях эксплуатируются устройства настройки дугогасящих реакторов, которые используют в качестве параметра управления амплитудные и фазовые характеристики КНП сети, т.е. зависимости напряжения нейтрали частотой сети U_0 или фазового угла между U_0 и опорным $U_{0П}$ напряжениями. В качестве последнего выбирается одно из фазных или линейных напряжений. Однако названные параметры имеют низкую помехоустойчивость из-за влияния небалансов элементов сети.

В реальной сети напряжение естественной несимметрии $U_{НС}$ обусловлено небалансом параметров элементов всей сети:

- фазных напряжений сети высшего уровня;
- питающего T , присоединительного TN и измерительного TV трансформаторов;
- нагрузки;
- активных и емкостных проводимостей фаз сети относительно земли.

- наведенных на соединительных проводах обмотки разомкнутого треугольника трансформатора TU и информационного входа САН КНП сети помех широкого спектра частот, наибольшее влияние из которых оказывает составляющая с частотой 50 Гц.

В [3] приведен пример влияния несимметрии напряжения сети высшего уровня на напряжение нейтрали сети 6-35 кВ. Произведем оценку небаланса в схеме на рис. 1.

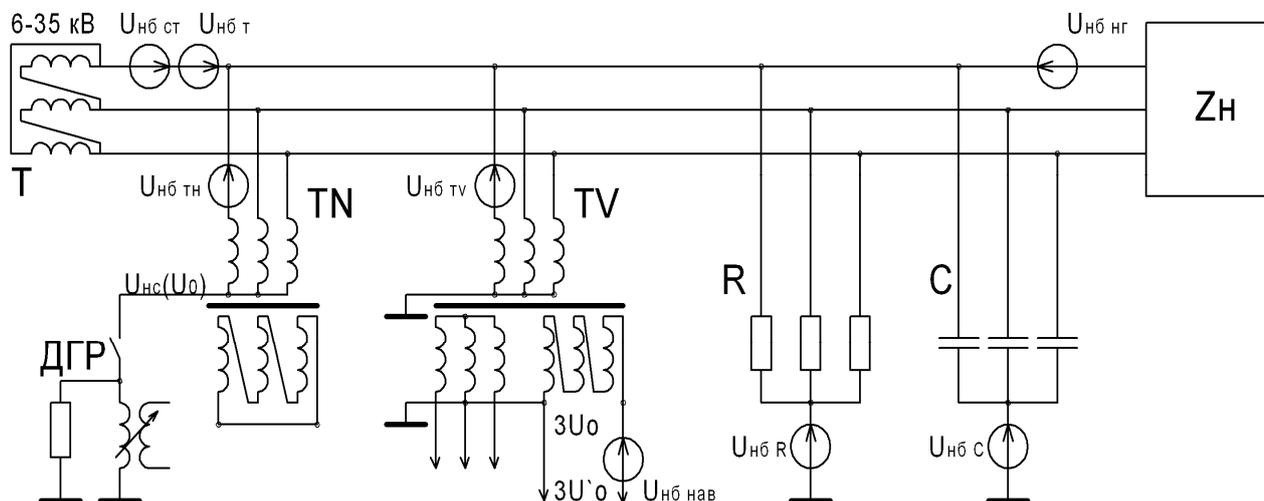


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной компенсированной сети

При отключенном ДГР напряжение естественной несимметрии будет определяться параметрами небаланса всех элементов, за исключением измерительного трансформатора, т.е.

$$\dot{U}_{HC} = \dot{U}_{HB CT} + \dot{U}_{HB T} + \dot{U}_{HB TN} + \dot{U}_{HB HG} + \dot{U}_{HB RC}, \quad (1)$$

где: $\dot{U}_{HB CT}$ – эквивалентное напряжение небаланса, обусловленное неравенством фазных напряжений сети высшего уровня; $\dot{U}_{HB T}$, $\dot{U}_{HB TN}$, $\dot{U}_{HB HG}$ – эквивалентные напряжения небаланса, вызванные несимметричностью питающего и присоединительного трансформаторов, нагрузки; $\dot{U}_{HB RC}$ – эквивалентное напряжение небаланса проводимостей на землю, состоящая из активной $\dot{U}_{HB R}$ и емкостной $\dot{U}_{HB C}$.

В кабельных сетях напряжение несимметрии имеет незначительную величину и все его составляющие соизмеримы. Положение вектора напряжения \dot{U}_{HC} зависит от параметров небаланса всех элементов.

При включенном реакторе напряжение на нейтрали связано с расстройкой КНП сети

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{HC} / (\mathcal{G} + jd), \quad (2)$$

где \mathcal{G} и d коэффициенты расстройки и демпфирования соответственно. Коэффициент d в нормальном режиме работы сети величина практически постоянная и его влияние на величину напряжения нейтрали \dot{U}_0 существенно меньше коэффициента расстройки \mathcal{G} . На рис 2. приведена круговая диаграмма напряжения на нейтрали, характеризующая зависимость \dot{U}_0 от расстройки компенсации при заданной величине коэффициента демпфирования. Положение векторов \dot{U}_0 и \dot{U}_{HC} соответствует резонансной настройке контура. Согласно (1), вектор напряжения \dot{U}_{HC} представлен суммой векторов напряжений небаланса.

В процессе эксплуатации параметры сети изменяются, поэтому амплитуда и фаза \dot{U}_{HC} , а соответственно и \dot{U}_0 постоянно меняются, независимо от значения расстройки \mathcal{G} .

Применение амплитудных и фазовых характеристик в качестве управляющего параметра СН КНП сети, таким образом, не может обеспечить стабильную работу автоматических регуляторов без принятия специальных мер по стабилизации вектора напряжения несимметрии. Такой мерой служит, как отмечено ранее, увеличение напряжения небаланса одного из элементов сети: присоединительного трансформатора; фазных проводимостей (емкостной) сети; включением последовательно с ДГР источника дополнительного напряжения. Причем обязательно условие совпадения направлений векторов напряжений несимметрии и вводимого дополнительно в нейтраль сети. На рис. 2 приведенное к вторичной (соединенной по схеме в разомкнутый треугольник) обмотке TV напряжение на нейтрали \dot{U}_0 отличается от напряжения на входе СН $3\dot{U}'_0$ как по величине, так и по фазе. Это вызвано переходом к цепям измерения напряжения небаланса измерительного трансформатора и влиянием на эти цепи посторонних источников напряжением основной частоты сети.

В этом случае, установленная по фазовым характеристикам (ФХ) КНП сети настройка будет отличаться от резонансной на величину, определяемой углом φ .

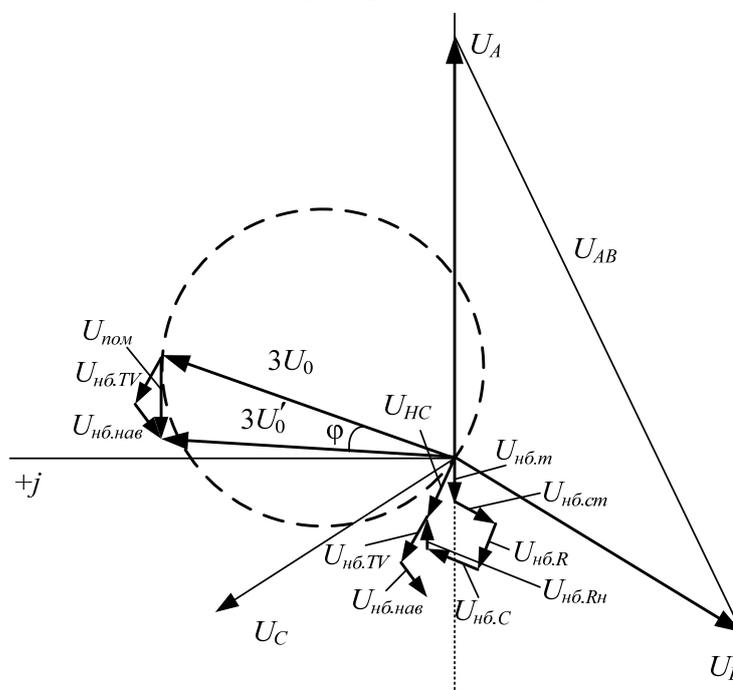


Рис.2. Круговая диаграмма напряжения на нейтрали.

В области больших расстроек напряжение \dot{U}_0 уменьшается и при значениях, соизмеримых с находящимся за круговой диаграммой напряжением помехи $\dot{U}_{пом}$, ФХ контура будет определяться параметрами всех составляющих входного сигнала АР: полезного, определяемого формулой

$$\dot{U}_0 = \frac{U_{НС}}{\sqrt{g^2 + d^2}} \cdot e^{-j \cdot \arctg \frac{g}{d}} \quad (3)$$

и помех с частотой питающей сети

$$\dot{U}_{пом} = U_{пом} e^{j \cdot \varphi_{пом}}.$$

При резонансной настройке или изменении расстройки в определенных пределах напряжение U_0 и его фаза несут практически достоверную информацию о режиме компенсации. Однако, при удалении от резонанса наблюдается несоответствие фазовой и амплитудной характеристик от истинных. Согласно приведенным в [4] кривым, в реальной

электрической сети с установленным в нейтрали ДГР плунжерного типа с большим диапазоном регулирования индуктивного тока при работе в области больших расстроек наблюдаются провалы в амплитудной $U'_0=f(I_L)$ и фазовой $\varphi=f(I_L)$ характеристиках контура, Эти провалы воспринимается АР как изменение знака расстройки и САН, функционирующая с использованием этих характеристик, оказывается неработоспособной. Введение дополнительной искусственной несимметрии не оказывает существенного влияния на характеристики КНП сети в области больших расстроек.

В [5] приведены данные режима компенсации емкостных токов замыкания на землю на подстанциях Северных электрических сетей ОАО «Чувашэнерго» по состоянию на май-июнь 2006 г. Компенсация производилась плунжерными ДГР типа РЗДПОМ производства Московского электрозавода, оснащенные фазовыми регуляторами РНДР-2. На всех подстанциях применено искусственное смещение нейтрали посредством введения напряжения через сигнальную обмотку ДГР. Проведенные авторами исследования режима компенсации в городских распределительных сетях ОАО «Чувашэнерго» показали, что:

- на ряде секциях режим не соответствует резонансному, расстройка составляет 7–8%;
- на одной из секций подстанции «Радуга» отказ автоматики управления реактором произошел вследствие изменения фазы напряжения несимметрии;
- практически на всех подстанциях наблюдается повышенное напряжение на нейтрали вблизи резонансных настроек.

В частности, на подстанции «Студенческая» напряжение на выводах разомкнутого треугольника трансформатора НТМИ $3U_0$ достигало 15-17 В, что приводило к ложным срабатываниям сигнализации замыкания на землю.

Таким образом, использование только фазовых характеристик КНП сети в качестве параметра управления реакторами, даже при наличии искусственной несимметрии, не гарантирует поддержания в сети резонансной настройки. В ряде случаев, особенно в сетях с однореакторной схемой компенсации, управление с контролем фазы может привести к отказу САН ДГР. Введение дополнительного параметра – зависимости напряжения нейтрали от расстройки – для формирования сигнала управления ДГР позволяет произвести более точную настройку на резонанс при условии отсутствия в сети переменной нагрузки. Однако низкая помехоустойчивость в области больших расстроек нередко приводит к сбоям в работе не только фазовых, но и экстремальных и адаптивных регуляторов. Причем последние, с целью корректировки состояния настройки, требуют периодического включения реактора, что является недопустимым для плунжерных реакторов по условиям эксплуатации.

Особенности управления ДГР

Не будем затрагивать вопросы управления ДГР отдельно взятой секции на резонансный либо заданный, по соображениям обеспечения устойчивости работы релейной защиты или снижения напряжения нейтрали, режим компенсации емкостных токов замыкания на землю. Эта задача, с рядом допущений и ограничений в применении того или иного устройства, считается решенной. Способы и устройства настройки реакторов описаны в литературе и находят применение в электрических сетях. Остановимся на тех моментах, когда применение упомянутых устройств затруднено или даже невозможно.

Комбинированное заземление нейтрали

В последнее время в ряде сетей, с целью повышения надежности электрооборудования и улучшения качественных показателей релейной защиты, параллельно ДГР подключают высокоомные резисторы. Названный режим заземления нейтрали (комбинированный) приводит к снижению добротности контура нулевой последовательности сети с 20-30 до 3-7. При этом снижается напряжение на нейтрали сети и падает крутизна фазовой характеристики $d\varphi/dL$, что эквивалентно снижению чувствительности измерительного органа САН КНП сети.

Параллельная работа секций

Следует отметить, что, сборные шины секций 6-10 кВ генерирующих предприятий, как правило, объединены. Выключение секционных выключателей (СВ) производится редко, при аварийных и плановых работах. ДГР подключены к нейтрали трансформаторов собственных нужд. Переход на секционирование шин практически всегда сопровождается перенастройкой дугогасящих реакторов секций, поскольку настройка на резонансный режим объединенной секции не предусматривает слежение за настройкой КНП каждой отдельно взятой секции. Включение на параллельную работу настроенных в резонанс контуров отдельных секций не должно приводить к включению САН реакторов, т.к. в этом случае сохраняется резонансная настройка объединенной секции шин.

На главных понизительных подстанциях (ГПП) предприятий и подстанциях городских распределительных сетей ДГР подключаются к сети посредством присоединительного трансформатора, в частности, из-за того, что трансформаторы собственных нужд этих предприятий зачастую имеют меньшую мощность, чем ДГР. С целью снижения токов КЗ, а также емкостных токов замыкания на землю производят секционирование шин, объединение которых производится в исключительных случаях (в аварийных режимах работы сети). ДГР каждой секции настраивается в нормальном режиме работы сети на резонансный режим. Очевидно, включение секционных выключателей объединяемых секций не должно приводить к перенастройке контура, т.к. в сети сохраняется резонансная настройка. Поиск резонансного режима может иметь место только при выходе расстройки за зону допустимой, например, вследствие вывода какого-либо присоединения на ремонт или в случае преднамеренных поисковых отключений линий.

Настройка с контролем параметров КНП сети

Контур нулевой последовательности, включающий фазные емкости сети и индуктивность ДГР, в области малых (низких) частот представляется колебательным звеном второго порядка. Существенное влияние на индуктивный ток, особенно при выведенном сердечнике ДГР, оказывает присоединительный (подземляющий) трансформатор, посредством которого реактор подключается к сети. Поэтому параметры трансформатора необходимо учитывать при сопоставимых мощностях реактора и трансформатора.

В нормальном режиме работы сети (рис. 3) на контур 1 действует напряжение несимметрии $U_{нс}$. Контур усиливает частоты, находящиеся в полосе пропускания и всегда настроен на частоту, близкую к 50 Гц. Напряжение на нейтрали U_0 при включенном реакторе и его фаза отражают качественные параметры контура, но вычисление их, а именно, добротности, собственной частоты, представляет большую трудность, поскольку всегда остается неизвестной истинная величина напряжения основной частоты в спектре $U_{нс}$, а также индуктивность (реактора и трансформатора) и емкость конденсатора (фаз относительно земли).

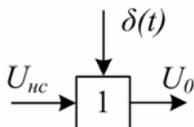


Рис.3. Структурная схема КНП сети

В сети всегда присутствуют внешние возмущения $\delta(t)$ в виде скачкообразных изменений фазных емкостей при набросе и сбросе нагрузки, частичных разрядов и т.п., которые, воздействуя на контур, вызывают колебания напряжения U_0 . При высокой добротности контура вызванный возмущением переходный процесс имеет ярко выраженный колебательный характер. Частота биений напряжения в контуре Δf отражает расстройку \mathcal{Q} контура относительно частоты входного напряжения f_c , в данном случае несимметрии $U_{нс}$ (рис.4.).

Расстройка вычисляется по формуле

$$g = 1 - \frac{f_k^2}{f_c^2}, \quad (4)$$

где f_k – собственная частота контура.

На рис.4 приведена расчетная кривая переходного процесса при введении в эквивалентный КНП сети с добротностью $Q=33$ импульсного возмущения длительностью 5 мс. Частота входного напряжения равна 50 Гц, собственная частота контура – 56,27 Гц, частота биений, определяемая на временном интервале 0,1–0,55 с, составляет

$$\Delta f = |f_k - f_c| = \frac{1}{T} = 6,25 \text{ Гц},$$

где $T = 0,16$ с. Выделенная частота биений несет информацию о величине расстройки контура, но не раскрывает знака расстройки. Последний является важным параметром, указывающим направление движения плунжера ДГР для реализации заданного режима компенсации.

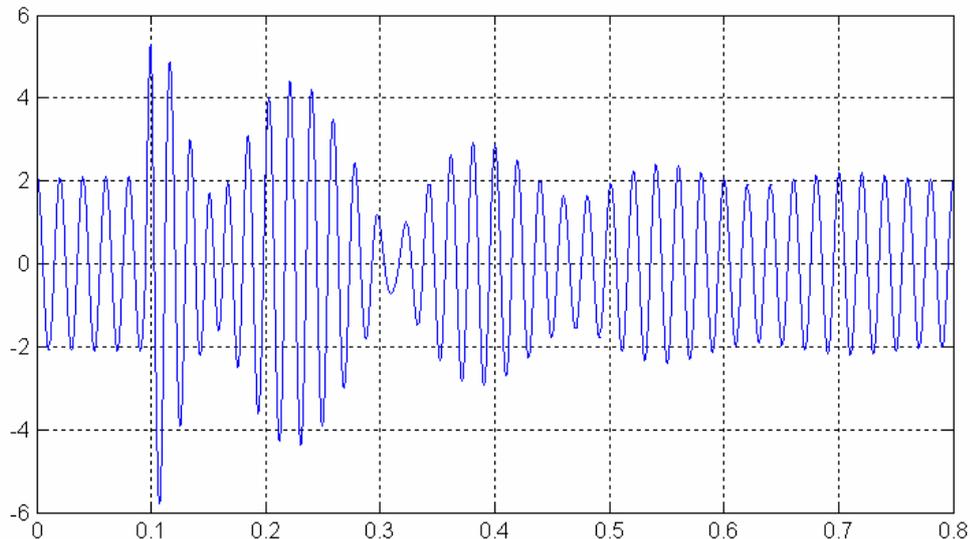


Рис. 4. Переходной процесс в эквивалентном КНП сети

Для большинства сетей добротность КНП ниже, а напряжение на нейтрали существенно выше приведенных в расчетной модели. Поэтому в случае малых возмущений, что на практике зачастую имеет место, выделить частоту свободных колебаний контура таким методом оказывается затруднительно.

На рис. 5 приведена структурная схема блока выделения свободной составляющей, включающая два идентичных контура 1 и 2, инвертор с единичным коэффициентом передачи $k=1$ и сумматор. При отсутствии внешнего возмущения в цепи контура 1 выходные напряжения контуров U_0' и U_0'' имеют одинаковые амплитуду и фазу, поэтому выходное напряжение сумматора равно нулю. При введении возмущающего воздействия $\delta(t)$ выходной сигнал U_0' первого контура представляет реакцию на сигналы $U_{нс}$ и $\delta(t)$, а выходной сигнал U_0'' второго контура - реакцию только на сигнал $U_{нс}$. Выходным сигналом сумматора в этом случае оказывается разностный, содержащий только реакцию на импульсное возмущение $\delta(t)$. Этот сигнал представляет собой свободную составляющую переходного процесса $U_{св}$, характер изменения которой определяется только параметрами контура.

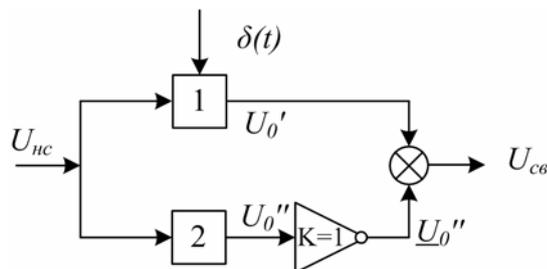


Рис. 5. Двухконтурная структура блока выделения свободной составляющей переходного процесса

Реализация данной структурной модели затруднительна по следующим причинам. Возмущение на самом деле всегда является частью напряжения несимметрии $U_{нс}$ и, таким образом, представляется общим для обоих контуров. К тому же реализация двухконтурной структуры с одинаковыми параметрами в области малых частот является затратной задачей.

На рис. 6 приведена одноконтурная структура блока, в которой выходной сигнал сумматора представлен в виде разностного сигнала U_0' контура 1, рассматриваемого с момента поступления импульса возмущения $\delta(t)$, и сигнала, предшествующего моменту возмущения, полученного путем задержки на определенный временной интервал Δt сигнала U_0' . Результатом суммирования смещенных во времени сигналов является свободная составляющая переходного процесса, вызванного в контуре импульсным возмущением. Очевидно, длительность задержки Δt должна быть достаточной, чтобы определить параметры свободных колебаний контура: частоту и декремент затухания. Поэтому она не может быть меньше длительности двух периодов минимально возможной частоты собственных колебаний контура.

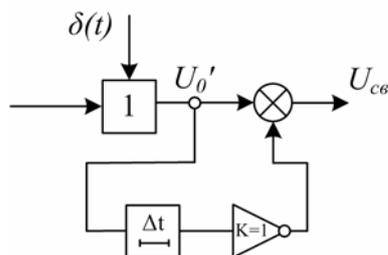


Рис. 6. Одноконтурная структура блока выделения свободной составляющей

Так как изменения в сети за короткое время измерений маловероятны, то параметры свободного колебательного процесса остаются неизменными во времени и зависимыми только от установленных на данный момент индуктивности реактора, фазных емкостей и активных потерь в цепи ДГР и изоляции сети. Таким образом, путем контроля параметров свободных колебаний – частоты и декремента затухания, при известных значениях индуктивности и добротности ДГР производится настройка на заданный режим компенсации [6]. Частота собственных колебаний контура нулевой последовательности однозначно определяется только значениями фазных емкостей изоляции: длины линий электропередачи, установленного электрооборудования, и не зависит от конфигурации сети. Данный подход одинаково применим в сетях: с низкочастотным КНП, включая сети с комбинированным заземлением нейтрали; при секционировании шин (сети генерирующих компаний) или объединении секций шин (сетевые компании) при плановых ремонтных или в аварийных режимах работы, а также в сетях, где имеет место параллельная работа двух и более управляемых ДГР в одной секции. В последнем случае настройку контура необходимо производить с учетом коэффициентов загрузки реакторов секции.

Рассмотренный принцип определения параметров КНП электрической сети описан в [7] и нашел применение в микропроцессорных терминалах автоматизации управления ДГР типа

«Бреслер 0107.060» и контроля изоляции в сетях с изолированной нейтралью типа «Бреслер 0107.065».

Литература:

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – М., 2003. – 352 с.
2. Князев В., Боков Г. Техническая политика ФСК. Требования к распределительному электросетевому комплексу//Новости ЭлектроТехники, № 6(42), 2006. – С. 22-26.
3. Шалин А.И., Кондранина Е.А., Михель А.А. Об одном режиме работы распределительных сетей среднего напряжения/Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ. Тр. IV Всеросс. науч.- техн. конф. – Новосибирск, 2006. – С.32-35.
4. Петров Е.М., Лошкарев В.И. Особенности управления дугогасящими реакторами при параллельной работе секций/Вестник Чувашского университета. – Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова. №1, 2007. – С. 157-164.
5. Ильин В.Ф., Петров Е.М., Петров М.И. и др. Исследование режимов настройки контура нулевой последовательности распределительных сетей 6-10 кВ ПЭС «Северные электрические сети»/Труды академии электротехнических наук Чувашской республики. – №1, 2006. – С. 18-23.
6. Патент РФ №2321132. Способ настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях/В.Ф. Ильин, М.И. Петров, И.В. Соловьев.- Оpubл. в Б.И. №9, 2008.
7. Козлов В.Н., Ильин В.Ф. Дугогасящие реакторы в сетях 6-35 кВ. Реализация метода автоматического управления//Новости ЭлектроТехники, № 2(50), 2008. – С. 92-94.