

ИМПУЛЬСНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Канд. техн. наук ДОЛГОПОЛОВ А. Г.

*Научно-технический центр
Всероссийского электротехнического института*

В электрических сетях 6—35 кВ с изолированной нейтралью при больших токах замыкания на землю широко применяется компенсация однофазного тока замыкания с помощью дугогасящих аппаратов различных типов. В последние годы освоены в производстве и находят все большее применение в России и странах СНГ дугогасящие реакторы серии РУОМ с глубоким насыщением магнитной цепи и автоматической настройкой после возникновения замыкания на землю. Быстрая и точная автоматическая настройка таких реакторов в момент замыкания при сохранении глубокой расстройки в нормальном режиме исключает резонансные явления, характерные для компенсированных сетей, и выгодно отличает реакторы РУОМ от всех других известных дугогасящих устройств [1].

Различные режимы работы реактора и сети до и после момента замыкания, а также принципиальная возможность автоматически, безынерционно и точно настроить РУОМ при возникновении однофазного замыкания на землю предъявляют и новые требования к их системам автоматического управления. Резонансная настройка в нормальном режиме, применяемая в настоящее время для плунжерных и других аналогичных автоматически настраиваемых дугогасящих катушек, принципиально не позволяет в нормальном режиме вести измерение емкости сети, отслеживая изменение ее конфигурации, а в режиме замыкания обеспечить соответствующую быструю настройку реактора в резонанс с ранее измеренной емкостью.

Поэтому для реакторов серии РУОМ разработаны и выпускаются системы автоматической настройки компенсации (САНК), измеряющие емкостную проводимость сети в нормальном режиме наложением промышленной частоты и настраивающие проводимость реактора при возникновении замыкания на землю изменением тока подмагничивания в замкнутом контуре автоматического регулирования, обеспечивающем сравнение этих проводимостей.

При такой идеологии важным является процесс измерения емкостной проводимости сети в нормальном режиме, точность которого определяет в дальнейшем точность настройки дугогасящего реактора в резонанс в режиме однофазного замыкания на землю. В существующих САНК для реакторов серии РУОМ измерение емкости сети производится на частоте 16,6 Гц, которая получается делением промышленной частоты на три. Напряжение указанной частоты подается в нейтраль сети через сигнальную обмотку РУОМ, затем сигналы тока РУОМ и напряжения нейтрали выделяются фильтрами, а емкостная проводимость сети получается в результате деления тока реактора на напряжение нейтрали. При этом на точность измерения существенное влияние оказывают два фактора: во-первых, добротность фильтров нижних частот, отсекающих напряжение смещения нейтрали 50 Гц и высших гармоник в нормаль-

ном режиме; во-вторых, наличие на подстанции параллельно работающих дугогасящих устройств и других заземленных аппаратов (резисторов, трансформаторов напряжения и т. п.), которые могут шунтировать наложенное напряжение частотой 16,6 Гц.

Погрешность настройки дугогасящего реактора не должна превышать 2 % во всем рабочем диапазоне регулирования [2], что предъявляет дополнительные требования и вызывает схемотехнические проблемы как при реализации фильтров нижних частот, так и при настройке САНК РУОМ, работающих параллельно с уже существующими базовыми дугогасящими аппаратами. Поэтому актуальной является проблема выбора такого способа измерения емкости сети или ее проводимости, который бы в наименьшей степени зависел от состава оборудования реальных подстанций и естественного напряжения смещения нейтрали.

В качестве такого можно использовать способ импульсного зондирования сети путем периодического разряда на сигнальную обмотку РУОМ предварительно заряжаемого конденсатора. Если эквивалентная частота разряда значительно, более чем на порядок, превышает промышленную частоту, то указанные выше проблемы фильтрации полезных сигналов и влияния других заземленных индуктивностей легко снимаются. При синхронизации разряда конденсатора с напряжением естественного смещения нейтрали фильтры можно вообще исключить из схемы измерения.

Если в нормальном режиме работы сети подмагничивание реактора и рабочий ток в нем отсутствуют, то магнитная система не насыщена, и процесс трансформации импульсного сигнала измерения происходит на линейном участке кривой намагничивания. В таком случае продольные индуктивности самого реактора в сумме с индуктивностью трансформатора присоединения можно считать линейными, а эквивалентная схема замещения контура разряда может быть представлена в виде последовательного соединения активного, индуктивного и емкостных элементов. На рис. 1 представлена схема, где C_1 — предварительно заряженный конденсатор; L — индуктивность реактора и трансформатора присоединения; C_2 — эквивалентная емкость фаз сети относительно земли; r — активное сопротивление обмоток и соединительных проводов. В реальных условиях C_1 значительно меньше C_2 , а активное сопротивление мало, поэтому процесс разряда C_1 через L на C_2 будет носить колебательный затухающий характер.

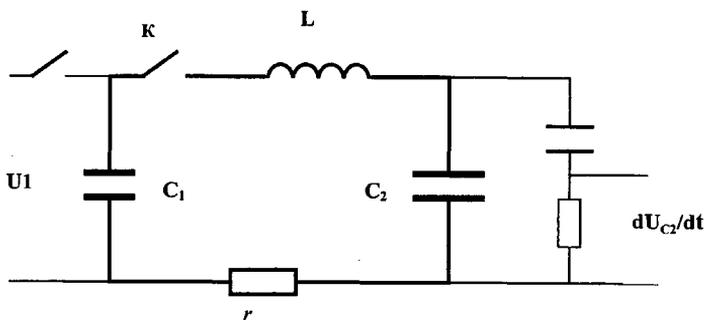


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения контура разряда

Искомой величиной в процессе измерения является емкостная проводимость или емкость сети C_2 . Для определения параметра, по которо-

му было бы возможно достаточно просто и точно выявлять изменяющуюся в процессе оперативных переключений проводимость (или емкость) сети, рассмотрим переходный процесс в схеме замещения на рис. 1 [3].

Поскольку частота импульсов достаточно велика (около 1 с), а длительность фронта разряда несоизмеримо мала (меньше 1 мс), можно считать процесс разряда конденсатора C_1 на конденсатор C_2 однократным. Начальными условиями являются отсутствие тока в индуктивности и напряжения на конденсаторе C_2 , конденсатор C_1 до момента разряда предварительно заряжен до фиксированного значения напряжения U_{10} .

Если приложенное напряжение и ток в установившемся режиме равны нулю и принужденных составляющих нет, то остается определить свободную составляющую тока в последовательной цепи, для которой линейное дифференциальное уравнение второго порядка имеет вид

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\delta \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0,$$

где

$$\delta = \frac{r}{2L}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2}},$$

а характеристическое уравнение имеет два корня

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2}}.$$

При указанных выше начальных условиях получаем выражение для тока

$$i = -\frac{U_{10}}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}).$$

Так как значение r предполагается небольшим (в реальных сетях добротность контура нулевой последовательности достаточно высока), в выражении для тока будут комплексные корни, когда $r < 2\sqrt{\frac{L(C_1 + C_2)}{C_1 C_2}}$, а само выражение для тока принимает вид

$$i = -\frac{U_{10}}{\omega' L} e^{-\delta t} \sin \omega' t,$$

где

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2} - \frac{r^2}{2L^2}}.$$

Реальное соотношение разрядной емкости C_1 и эквивалентной емкости сети C_2 , приведенных к одному напряжению, таково, что емкость C_1

при любых изменениях конфигурации сети намного меньше емкости C_2 . Если оговорить условия, что емкость C_1 всегда заряжается до одного фиксированного значения напряжения, а ее величина не менее чем в тысячу раз меньше емкости сети, то из выражения для тока следует независимость тока от значения емкости C_2 при неизменных значениях U_1 , C_1 , L , r (если пренебречь величиной емкости C_1 в сумме $C_1 + C_2$ числителя подкоренного выражения).

Дальнейшую практическую реализацию импульсного измерения удобнее всего получить, если взять производную напряжения, возникающего на нейтрали сети (на емкости C_2) при разряде конденсатора C_1 . Эта производная напряжения, получаемая, например, с помощью дифференциального звена на выходе обмотки разомкнутого треугольника трансформатора напряжения, с коэффициентом C_2 есть тот же ток в разрядном контуре. Чтобы перейти к определенному интегралу и простой схмотехнической реализации обработки дифференцированного сигнала напряжения, возьмем значение тока разряда в момент его максимума, который совпадает и с максимумом производной напряжения на нейтрали. Тогда выражение для максимума тока принимает вид

$$I_m = C_2 \left. \frac{dU_{C_2}}{dt} \right|_{\max} = \frac{U_{10}}{\omega' L} = \frac{U_{10}}{L \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2} - \frac{r^2}{4L^2}}} \cong \frac{U_{10}}{L \sqrt{\frac{1}{LC_1} - \frac{r^2}{4L^2}}},$$

из которого следует независимость максимума тока разряда, или, что то же самое, произведения C_2 на максимум производной напряжения, от величины емкости C_2 (при выполнении условия $C_1 \ll C_2$).

Если произведение величины емкости C_2 на амплитуду производной напряжения равно константе, то мы имеем обратно пропорциональную зависимость (или гиперболу) между емкостью сети C_2 и амплитудой напряжения на выходе дифференциального звена. Для дальнейшего использования полученной зависимости в контуре регулирования САНК можно пойти разными путями. Первый и очевидный — это сравнение текущего значения $1/C_2$, пропорционального полученной амплитуде и емкостному сопротивлению сети $1/\omega C$, с индуктивным сопротивлением дугогасящего реактора в замкнутом контуре автоматического регулирования в режиме однофазного замыкания на землю. При достаточно простой технической реализации это вызывает необходимость последующего сравнения текущих значений двух нелинейных зависимостей, приведенных к одному коэффициенту, а само измерение выполняется в размерности сопротивления сети, что обратно пропорционально как величине емкости, так и ожидаемому емкостному току замыкания.

Чтобы перейти к измерению и сравнению величин, прямо пропорциональных емкости сети и току замыкания, в новом варианте САНК осуществляется вычисление пропорциональных C_2 значений тока и проводимости путем деления неизменного значения тока в разрядном контуре на амплитуду производной напряжения на C_2 . Для этого каждый раз после измерения амплитуды импульса на выходе дифференциального звена берется ее обратная величина. Фактически наряду с упрощением схемы измерения это приводит к тому, что в контуре регулирова-

ния можно сравнивать две линейные величины — измеренную в нормальном режиме емкостную проводимость сети и регулируемую в режиме замыкания индуктивную проводимость реактора. При этом персонал имеет на индикаторе блока измерения САНК величину, соответствующую ожидаемому при «металлическом» замыкании на землю емкостному току в амперах.

Структурная схема блока измерения емкости сети САНК приведена на рис. 2 и содержит в своем составе: зарядное устройство ЗУ емкости C_1 , разрядный ключ К с устройством синхронизации УС, которое в момент перехода через нуль производной напряжения на нейтрали разряжает конденсатор C_1 через сигнальную обмотку СО реактора РУОМ и питающий его трансформатор ТСН на нейтраль сети. На выходе стандартного трансформатора напряжения типа НТМИ или НАМИ подключена дифференциальная цепочка ДЗ, сигнал которой передается в устройство синхронизации и собственно в схему САНК, где происходит его обработка, масштабирование, выделение амплитуды и ее деление для получения обратной величины.

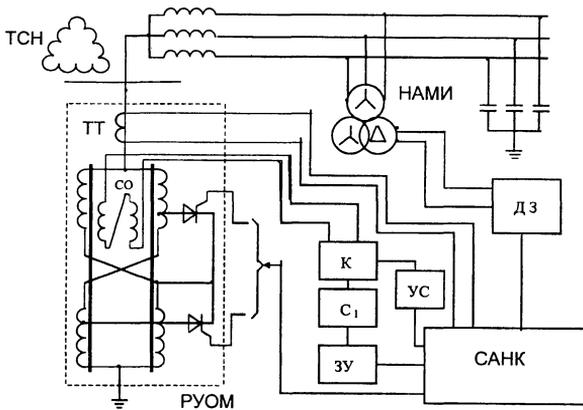


Рис. 2

Рассмотренный способ измерения и структурная схема реализованы аппаратно на аналоговых элементах, проверены на математической и физической моделях, а также на полномасштабном стенде РУОМ с эквивалентом трехфазной сети 6 кВ. Точность измерения превосходит ранее используемый способ, погрешность во всем диапазоне (десятикратное изменение емкости сети) не превышает 2 %. В настоящее время осваивается серийное производство САНК, использующей импульсный способ измерения, в частности, по заказу электрических сетей Мосэнерго.

ЛИТЕРАТУРА

1. З а з е м л я ю щ е е д у г о г а с я щ е е устройство на базе управляемых реакторов / М. А. Бики, А. М. Брянцев, А. Г. Долгополов и др. // Наука, производство, рынок: Тез. докл. 4-го междунар. симпозиума ТРАВЭК «Электротехника 2010». — М., 1997.
2. П е т р о в О. А. Точность систем автоматической компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю в электрических сетях // Электрические станции. — 1989.— № 11.

З. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. — Л.: Энергия, 1975.

Представлена научно-техническим советом

Поступила 21.09.1999

УДК 621.311

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ОСНОВНЫХ СЕТЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО МЕТОДА

Инж. КОРОТКЕВИЧ А. М.

Производственное энергетическое предприятие «ОДУ»

Канд. техн. наук, доц. ПРОКОПЕНКО В. Г.

Белорусская государственная политехническая академия

Одним из направлений решения задачи планирования оптимальных режимов основных сетей энергосистем по напряжению и реактивной мощности служит применение методов, позволяющих вводить дискретные значения переменных [1]. В этом случае удастся учесть важную специфику задачи: ступенчатость, разные законы изменения коэффициентов трансформации автотрансформаторов связи и связанность регулирования. Кроме того, в процессе оптимизационного расчета легко организовать контроль режимных ограничений по величинам напряжений узлов схемы сети, перевозбуждению трансформаторов и автотрансформаторов и т. д. Получающийся в результате расчетов окончательный режим не нуждается в коррекции и уточнении, что компенсирует дополнительные затраты времени на реализацию дискретных методов в отношении к методам, оперирующим с переменными как с непрерывными величинами.

Недостатком дискретных методов является то, что при их реализации несколько увеличивается время расчетов, однако с ростом быстродействия ЭВМ и усовершенствованием программ расчета установившихся режимов электрических сетей этот недостаток становится не столь существенным.

Нами для оптимизации режима основных сетей энергосистем по напряжению и реактивной мощности применен метод, учитывающий дискретность изменения переменных.

В качестве целевой функции выступает зависимость суммарных потерь активной мощности ΔP от изменения значений независимых переменных, которыми в данной задаче служат источники реактивной мощ-