

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, МОНИТОРИНГА И ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пискунов С.А. *, Мокеев А.В. **, Ульянов Д.Н. *, Попов А.И. **, Родионов А.В. *

Аннотация

Рассматриваются вопросы применения технологии синхронизированных векторных измерений для совершенствования систем управления, мониторинга и защиты центров питания и распределительных сетей.

Ключевые слова: синхронизированные векторные измерения, мониторинг состояния трансформатора, релейная защита.

Введение

Применение интеллектуальных электронных устройств с поддержкой синхронизированных векторных измерений (СВИ) позволит повысить эффективность систем управления, защиты и автоматики распределительных сетей и обеспечит повышение надежности электроснабжения потребителей [1,2].

Низкий уровень автоматизации распределительных сетей и большое количество центров питания, трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ и линий электропередачи требуют значительных капиталовложений при проведении модернизации сети. Применение традиционных подходов к созданию цифровых РЭС требует больших финансовых вложений из-за необходимости установки большого количества измерительных трансформаторов тока и напряжения, устройств управления, защиты и автоматики [2].

Поэтому поиск эффективных и современных решений по автоматизации распределительных сетей является актуальной задачей. Одно из перспективных решений по автоматизации распределительных сетей связано с применением распределенной обработкой данных на базе синхронизированных векторных измерений (СВИ) в сочетании с применением современных телекоммуникационных технологий и применением

* ООО "Инженерный центр "Энергосервис", Архангельск, Архангельская обл., Россия, e-mail: s.piskunov@ens.ru, d.ulyanov@ens.ru, a.rodionov@ens.ru

** Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Архангельская обл., Россия, e-mail: a.mokeev@narfu.ru, a.popov@ens.ru, ООО "Инженерный центр "Энергосервис", Архангельск, Архангельская обл., Россия, e-mail: a.mokeev@ens.ru, a.popov@ens.ru

новых датчиков тока и напряжения. При этом помимо автоматизации распределительной сети могут быть реализованы задачи по мониторингу состояния оборудования [3].

На базе мониторинга состояния оборудования могут быть рассчитаны индексы его технического состояния с целью принятия решения о необходимости последующей диагностики. Технология СВИ открывает новые возможности для создания комплексных систем, которые могут обеспечить мониторинг состояния силового оборудования подстанций, в частности, силовых трансформаторов, на базе измерения электромагнитных параметров, а также выполнять другие актуальные задачи по реализации систем защиты и автоматики, телемеханики, энергомониторинга, учета электроэнергии и т.д.

1. Системы управления, мониторинга и защиты ЦП

1.1. Автоматизация понизительных подстанций

Основное внимание при автоматизации распределительных сетей необходимо уделять автоматизации центров питания (ЦП): понижающим подстанциям (ПС) и распределительным пунктам (РП).

На ПС согласно требованиям нормативных документов и приказов Минэнерго требуется создание большого количества подсистем автоматизации: РЗА, системы приема-передачи информации (СППИ), мониторинг состояния трансформатора, мониторинг перегрузочной способности трансформатора, энергомониторинг, мониторинг качества электроэнергии. Раздельное создание указанных подсистем связано с большими финансовыми затратами, так как возникает необходимость в применении большого количества ИЭУ различного функционального назначения и раздельных систем коммуникаций и подсистем обработки данных. Наиболее эффективное решение связано с использованием многофункциональных устройств и их интеграцией с использованием протоколов цифровой подстанции. При этом наиболее рациональным решением следует признать использование двух интеллектуальных устройств для одного присоединения: многофункционального устройства РЗА и многофункционального измерительного интеллектуального электронного устройства (ИЭУ).

За счет обмена синхровекторами тока и напряжения между устройствами РЗА появляется возможность применения новых алгоритмов быстродействующих защит, в том числе защит с абсолютной селективностью и централизованных защит [4].

Особое место в системе защиты подстанции занимают защиты ввода и защиты трансформатора. Так, в устройстве защиты ввода за счет приема данных по синхровекторам токов присоединений среднего напряжения и синхровекторам напряжения двух секций целесообразно реализовать защиту шин с абсолютной селективностью [4]. Дополнительно в защите ввода может быть реализована централизованная резервная за-

щита для присоединений среднего напряжения понизительной подстанции. В отличие от защиты, описанной в работе [5], вместо использования sv-потоков присоединений среднего напряжения (СН) используются потоки синхровекторов тока и напряжения. На защиту ввода целесообразно возложить также функции централизованной защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Для локализации поврежденной линии при однофазном замыкании на землю предложено использование алгоритмов на основе распределенной обработки синхровекторов тока и напряжения нулевой последовательности (НП). Устройства защиты от ОЗЗ при этом подключаются к существующим измерительным трансформаторам тока нулевой последовательности (ИТТ НП) или, в случае их отсутствия, к размыкаемым датчикам тока НП (для кабельных линий) или к трем размыкаемым датчикам тока (для воздушных линий) и к обмотке разомкнутой треугольник измерительного трансформатора напряжения.

Совмещение подсистемы мониторинга состояния с устройством защиты трансформатора позволит повысить эффективность защит от перегрузки трансформатора. Использование СВИ позволяет повысить эффективность защиты трансформатора [3]. С использованием ИЭУ решаются задачи СППИ, по мониторингу состояния оборудования, мониторингу качества электроэнергии и энергомониторингу.

При глубокой модернизации подстанций или новом строительстве подстанции следует шире применять пассивные или цифровые датчики тока и напряжения. В настоящее время специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработаны опытные образцы цифровых КРУ, в составе которых используются комбинированные цифровые датчики тока и напряжения 6(10) кВ, интеллектуальные выключатели со встроенной РЗА и системой мониторинга состояния выключателя, многофункциональные ИЭУ [3].

Рассмотрим более подробно вопросы, связанные с мониторингом состояния понижающего трансформатора на основе синхронизированных векторных измерений.

1.2. Мониторинг состояния трансформатора

Мониторинг состояния трансформатора может производиться как по его электрическим параметрам, так и по неэлектрическим параметрам (газо- и влагосодержание масла, температура масла, вибрация бака и т.д.) [6]. Наиболее предпочтительным решением является комбинированный подход, сочетающий оба перечисленных выше принципа.

Вместе с тем, полноценные системы мониторинга и диагностики состояния трансформатора имеют высокую стоимость и, вследствие этого, их применение ограничивается преимущественно мощными трансформаторами. Поэтому представляется целесообразным создание систем мониторинга состояния с преимущественным использованием электрических параметров. Именно электромагнитные процессы в большей степени приводят к возникновению дефектов и аварий в трансформаторах.

Поэтому принципиально важно, чтобы системы мониторинга использовали предиктивный способ выявления вероятности возникновения опасных повреждений, а не выявление последствий уже возникшего повреждения.

Наилучшим решением при этом является применение устройства РЗА трансформатора (РЗА-Т) с функцией мониторинга его состояния при использовании технологии синхронизированных векторных измерений. При этом СВИ, как указывалось выше, следует использовать и для совершенствования РЗА трансформатора [7].

На основе синхровекторов тока и напряжения может осуществляться идентификация параметров Т-образной схемы замещения силового трансформатора. По динамике изменения указанных параметров производится выявление дефектов и неисправностей. Дополнительно в РЗА-Т реализуется мониторинг перегрузочной способности трансформатора и мониторинг сквозных токов КЗ и броска тока намагничивания (БТН), производится прямая или косвенная оценка температуры верхних слоев масла трансформатора, контроль температуры окружающей среды, давления и т.д. за счет применения специальных цифровых датчиков.

В рамках разработки РЗА-Т с функцией мониторинга его состояния специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» проводятся работы по оценке эффективности системы мониторинга при использовании многофункциональных УСВИ. Рассмотрим один из применяемых алгоритмов по оценке параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора (рис.1).

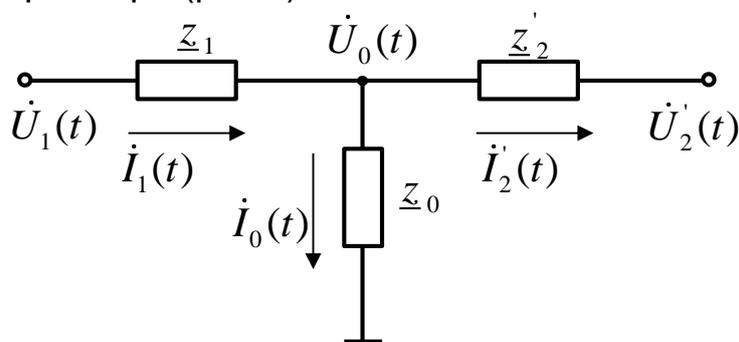


Рис. 1. – Т-образная схема замещения двухобмоточного силового трансформатора

Так как измерения в УСВИ производятся в цифровой форме, то синхровекторы будем обозначать $\dot{U}_1(k)$, $\dot{U}_2(k)$, $\dot{I}_1(k)$, $\dot{I}_2(k)$, где k - целое число, определяющее текущий отсчет измерений синхровекторов. Требуется определить параметры схемы замещения трансформатора: z_1 , z_2 , z_0 , а также недоступные для измерений синхровекторы тока и напряжения ветви намагничивания $\dot{I}_0(k)$ и $\dot{U}_0(k)$.

Проще всего определить синхровектор тока ветви намагничивания

$$\dot{I}_0(k) = \dot{I}_1(k) - \dot{I}_2(k).$$

Для определения остальных параметров недостаточно информации о синхровекторах тока и напряжения на высоком и низком напряжении

трансформатора. Один из возможных путей решения проблемы связан в использовании не только текущего отчета синхровекторов токов и напряжений, а еще одного из предыдущих отчетов, связанного с другим режимом работы трансформатора [8]. В указанной работе определения векторов тока и напряжения производится на основе обработки массивов мгновенных значений токов и напряжений и регистраторов аварийных процессов. При этом определение параметров схемы замещения производится на основе матричного исчисления, что влияет на точность расчетов.

Ниже приводится более простой алгоритм определения параметров схемы замещения. Для Т-образной схемы замещения трансформатора справедливо выражение

$$\dot{U}_1(k) = \dot{U}'_2(k) + \dot{I}'_2(k)z'_2 + \dot{I}_1(k)z_1$$

Из данного уравнения может быть выражено значение z_1

$$z_1 = \frac{\dot{U}_1(k) - \dot{U}'_2(k) - \dot{I}'_2(k)z'_2}{\dot{I}_1(k)}$$

Затем производится поиск подходящего предыдущего отсчета n , ближайшего к k , при котором соблюдаются заданные требования к значениям синхровекторов тока и напряжения (должны находиться в определенной области)

$$\dot{U}_1(k-n) = \dot{U}'_2(k-n) + \dot{I}'_2(k-n)z'_2 + \dot{I}_1(k-n)z_1$$

Подставляя значение z_1 в данное выражение, можно найти z_2

$$z'_2 = \frac{\dot{U}_1(k-n)\dot{I}_1(k) - \dot{U}_1(k)\dot{I}_1(k-n) + \dot{U}'_2(k)\dot{I}_1(k-n) - \dot{U}'_2(k-n)\dot{I}_1(k)}{\dot{I}_1(k)\dot{I}'_2(k-n) - \dot{I}_1(k-n)\dot{I}'_2(k)}$$

По найденным значениям z_1 и z'_2 производится расчет z_0

$$z_0 = \frac{\dot{U}_0(k)}{\dot{I}_0(k)} = \frac{\dot{U}_1(k) - \dot{I}_1(k)z_1}{\dot{I}_0(k)}$$

Приведенные выше формулы справедливы и для оценки параметров схемы замещения трансформатора по симметричным составляющим. В этом случае необходимо подставлять предварительно рассчитанные синхровекторы тока прямой (обратной, нулевой) последовательности.

Аналогично производится оценка параметров Т-образной схемы замещения трехобмоточного трансформатора.

1.3. Результаты проведения лабораторных испытаний

Для оценки эффективности рассмотренного выше алгоритма параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора были проведены опыты на физической лабораторной модели. В качестве объекта мониторинга был использован трехфазный сухой трансформатор малой мощности типа ТСЗИ-1,6-380/220.

Испытуемый трансформатор был подключен к сети переменного тока

380 В, а рабочей нагрузкой выступил асинхронный электродвигатель марки АИР. Согласно программе проведения испытаний в течение нескольких часов происходило последовательное изменение коэффициента загрузки и мощности трансформатора с интервалом 30 мин для каждой ступени нагрузки. В процессе проведения лабораторных опытов производились измерение и запись данных о фазных напряжениях и токах трансформатора на базе устройства ЭНИП-2-РМУ. На основе полученных результатов векторных измерений был проведен расчет параметров схемы замещения трансформатора и произведено сравнение их с теоретическими значениями.

На рис.2 приведены рассчитанные значения параметров схемы замещения лабораторного трансформатора.

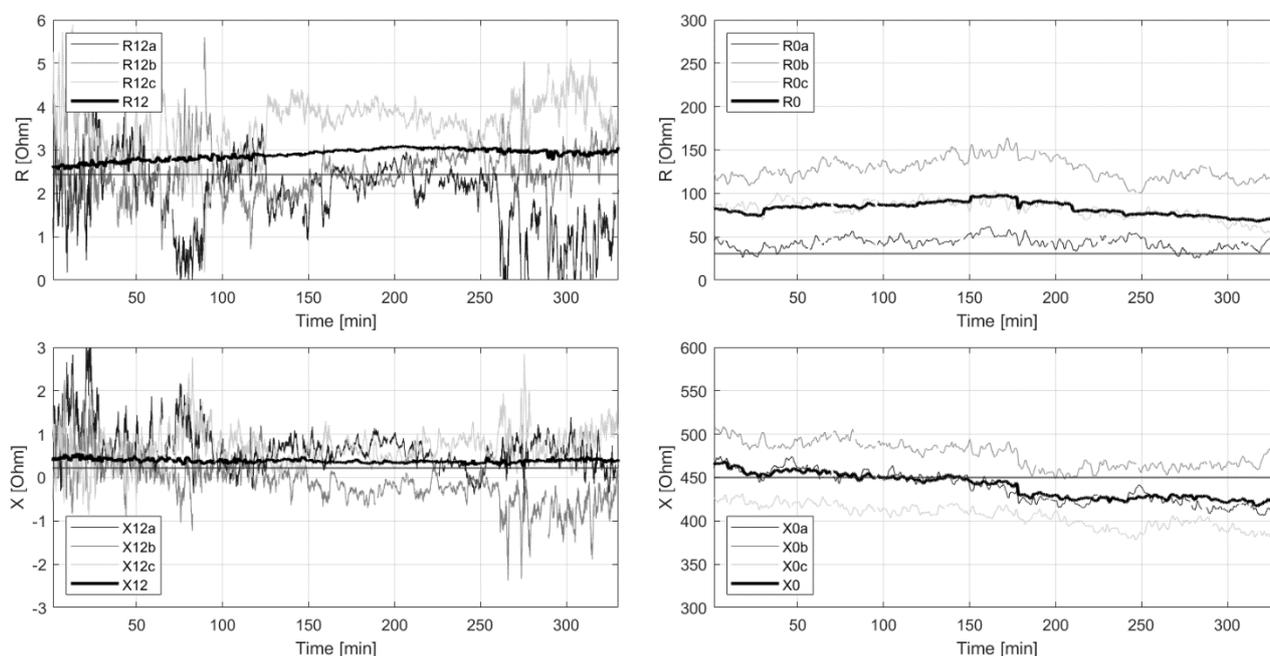


Рис. 2. – Параметры схемы замещения лабораторного трансформатора

На рис.2 индексами а, b, с обозначены фазные сопротивления трансформатора, без индекса – сопротивления прямой последовательности. По графику видно, что применение симметричных составляющих позволяет снизить влияние нелинейности и несимметрии нагрузки и питающего напряжения.

В ходе проведения опыта произошло увеличение температуры обмоток трансформатора и, как следствие, увеличение их активного сопротивления, что видно по графику (рис.2). Таким образом, расчет позволил произвести оценку изменения параметров трансформатора под действием нагрузки.

Алгоритм позволяет произвести оценку потерь активной и реактивной мощности, фактического коэффициента трансформации, а также параметров схемы замещения трансформатора по симметричным составляющим в зависимости от коэффициента загрузки и мощности.

При проведении расчетов выполнено сравнение представленного алгоритма с двумя известными алгоритмами вычисления параметров схемы замещения трансформатора [8,9]. На рис.3 представлено сравнение алгоритмов расчетов полных сопротивлений продольной и поперечной ветви Z_{12} и Z_0 . Индексами (1) и (2) обозначены алгоритмы, рассматриваемые в [8,9]; алгоритм, приведенный выше, обозначен индексом (3).

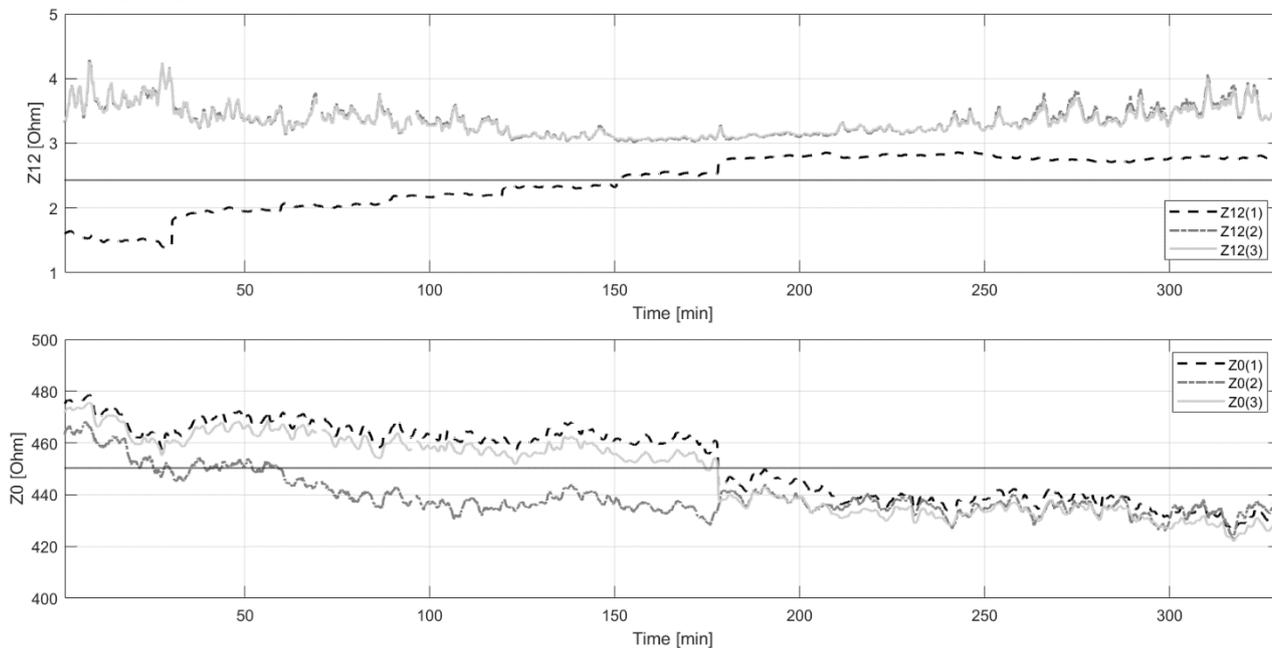


Рис. 3. – Сравнение алгоритмов расчета параметров Z_{12} и Z_0

По рис.3 видно, что методика (1) имеет прямую зависимость от величины и характера загрузки, что сказывается на значениях Z_{12} . Методики (2) и (3) не зависят от нагрузки, но имеют большой диапазон разброса мгновенных значений из-за относительно плохой обусловленности системы исходных уравнений при погрешности входных данных. Таким образом, предъявляются определенные требования к выбору отсчетов СВИ тока и напряжения трансформатора. Тем не менее, результаты опытов подтверждают возможность применения предложенной методики (3) для создания системы мониторинга трансформатора на базе электромагнитных параметров.

1.4. Опытная эксплуатация системы мониторинга трансформатора на базе СВИ

В настоящее время алгоритмы мониторинга состояния трансформатора апробируются в составе специальной системы мониторинга на ПС-7 и ПС-8 Архангельского филиала «Россети Северо-Запад».

Полученные в процессе измерений данные позволяют производить анализ работы алгоритмов при различных состояниях силового трансформатора. Результаты показывают, что алгоритм расчета параметров схемы замещения трансформатора позволяет получать устойчивые и точные значения Z_1 , Z_2 , Z_0 в режиме реального времени, что открывает

новые возможности для технического обслуживания трансформатора по состоянию.

На рис.4 приведена выборка комплексных значений Z_1 , Z_2 , Z_0 за несколько часов работы для силового трансформатора ТД-10000-35/6, установленного на одном из объектов мониторинга.

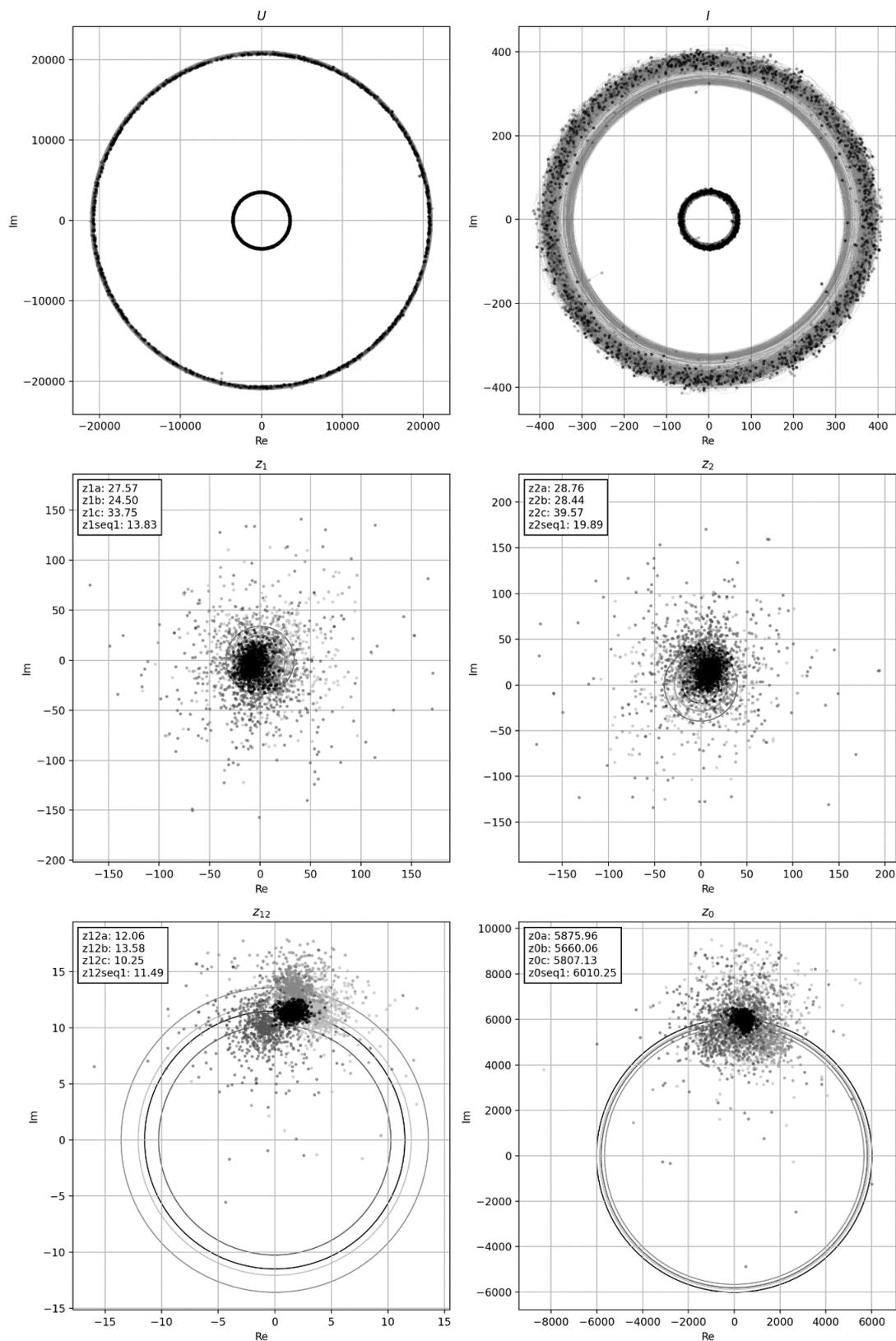


Рис. 4. – Комплексные значения параметров схемы замещения ТД-10000-35/6

Значения комплексных фазных сопротивлений имеют некоторый разброс, связанный с различием реальных фазных сопротивлений продольной и поперечной ветви схемы замещения из-за трехстержневой конструкции магнитопровода трансформатора, а также из-за погрешности входных данных (измеряемых токов и напряжений). Значения комплексных сопротивлений прямой последовательности имеют более высокую кучность. Эти данные могут быть использованы для анализа текущего состояния трансформатора, выявления трендов изменения сопротивлений в зависимости от условий его работы, а также для выявления их ненормальных отклонений, свидетельствующих о неисправностях (дефектах) в трансформаторе.

2. Системы управления, мониторинга и защиты кабельных и воздушных сетей

Определение поврежденной кабельной линии при ОЗЗ производится на основе распределенной обработки данных синхровекторов тока на ТП и синхровекторов тока и напряжения центра питания [3,10]. Разработано специальное устройство, подключаемое к размыкаемым индикаторам тока КЗ и размыкаемому датчику тока НП.

Для определения поврежденного фидера разработан алгоритм определения поврежденного участка на основе выявления максимального значения угловой характеристики [10]. Расчеты в виртуальной модели Simulink и результаты опытов подтверждены на физической модели кабельной сети, а также в ходе опытной эксплуатации в Архангельских электрических сетях и промышленной эксплуатации в МУП «Электросеть» (Череповец).

Для определения поврежденного участка воздушной линии с ответвлениями разработано устройство, измеряющее электрическое и магнитное поле вблизи линии в заданном частотном диапазоне.

Рассматриваемые принципы локализации повреждений в распределительных сетях среднего напряжения реализованы на базе программно-технического комплекса «Цифровой РЭС» [11].

Выводы

Применение технологии СВИ позволяет разрабатывать комплексные технические решения по автоматизации распределительной сети. Системы локализации повреждений в сети, построенные на базе СВИ, способны выполнять функции устройств телемеханики, энергомониторинга, учета электроэнергии, систем мониторинга состояния оборудования.

Контроль электромагнитных параметров силового трансформатора на базе измерения синхронизированных векторов тока и напряжения позволяет реализовать функции системы мониторинга трансформатора, обеспечивающей своевременное выявление неисправностей и ненормальных режимов его работы. В перспективе подобные решения позво-

лят производить диагностику, техническое обслуживание и ремонт силового оборудования ПС по состоянию.

Литература

1. Synchrophasor Monitoring for Distribution Systems: Technical Foundations and Applications. A White Paper by the NASPI Distribution Task Team, NASPI-2018-TR-001, January 2018, 62 p.

2. Мокеев А.В., Бovyкин В.Н., Ульянов Д.Н. Автоматизация подстанций и распределительных сетей // Автоматизация и ИТ в энергетике, 2019, 10, с. 30-38.

3. Мокеев А.В., Пискунов С.А., Ульянов Д.Н., Хромцов Е.И. Повышение эффективности и надежности систем управления, релейной защиты и автоматики цифровых понизительных подстанций и цифровых РЭС // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 71. Надежность электроснабжения потребителей в условиях их цифровизации / Книга 2 / Отв. ред. Н.И. Воропай. ИСЭМ СО РАН, 2020, с. 292-301.

4. Мокеев А.В., Хромцов Е.И. Многофункциональные устройства с поддержкой СВИ для цифровых подстанций и цифровых сетей // Релейная защита и автоматизация, 2019. № 4, с. 20-25.

5. Булычев А.В. и др. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем // Релейная защита и автоматизация. 2019, № 1, с. 70-76.

6. Силовые трансформаторы: Справочная книга / Лизунов С.Д., Лоханин А.К. 2004, Энергоиздат.

7. Piskunov S.A., Mokeev A.V. Power transformer relay protection with its condition monitoring function // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, 2021, с.1-6.

8. Пат. № 2237254, Российская Федерация, G01R31/02, H02N7/04. Способ диагностики силовых трансформаторов / А.Н. Алюнов, В.А. Бабарушкин, А.В. Булычев, В.А. Гуляев. Заявл. 08.01.2003; опубл. 27.09.2004. Бюл. № 27.

9. Смекалов В.В. Контроль состояния электрооборудования 110-500 кВ по параметрам мониторинга нормальных и аварийных режимов работы // Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования, Пермь, 2020.

10. Piskunov S.A., Mokeev A.V., Khromtsov E.I. Application of synchronized phasor measurements in RPA devices of distribution networks // E3S Web of Conferences SUSE-2021, 288, 01014 (2021).

11. Ульянов Д.Н., Петров К.В., Мокеев А.В., Пискунов С.А., Родионов А.В. Повышение надежности распределительных сетей с помощью системы автоматического восстановления электроснабжения // ИСУП, 2020, №6, с. 154-157.