

Study of Asymmetries in 0.4 kV Distribution Line with Different Schemes of Supply Transformers and Connection of Single-phase Renewable Energy Source

Bosneaga V., Suslov V.

Technical University of Moldova, Power Engineering Institute
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. The aim of the work is studying asymmetric modes of 10/0.4 kV distribution transformers at connecting single-phase renewable energy sources. This problem is relevant due to increasingly use of such sources. To achieve this goal, calculation of asymmetric modes, asymmetry coefficients for zero and negative sequences and values of phase voltages is performed. This proposed model is novel since it allows analyzing the asymmetry coefficients when connecting single-phase sources directly to distribution transformer low-voltage buses or via supplying three-phase line. Important is that transformer connection diagram is taken into account. It is shown that D/y0 connection has significant advantages over Y/y0 diagram, which is impractical in these modes. When injecting directly onto transformer low-voltage buses, the D/y0 circuit ensures permissible values of phase voltages and asymmetry coefficients in the entire range of injection variation, up to rated current of the transformer. Permissible values of injection via the three-phase line are significantly reduced due to the noticeable negative effect of its zero-sequence impedance. For estimation of injection permissible value depending on three-phase line length and its parameters, it is necessary to calculate the mode. Y/z0 circuit has somewhat better indicators compared to D/y0 circuit. In the case of connecting a single-phase generation source through a three-phase 4-core cable, the permissible value of injection is limited not so much by transformer parameters as mainly by the significantly higher zero-sequence impedance of the cable.

Keywords: impedance introduced by the transformer and three-phase distribution line, the value of permissible single-phase current injection.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.06>

UDC: 621.314.2, 621.315.1

Studiul asimetriilor în linia de distribuție 0.4 kV cu diferite scheme a transformatorului de alimentare și racordarea surselor de energie regenerabilă monofazată

Bosneaga V., Suslov V.

Institutul de Energetică al Universității Tehnice a Moldovei
Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Scopul lucrării este studierea modurilor asimetrice ale transformatoarelor de distribuție 10/0,4 kV la conectarea surselor monofazate de energie regenerabilă. Această problemă este actuală datorită utilizării tot mai răspândite surselor monofazate, care afectează simetria rețelei de distribuție. Pentru atingerea scopului este efectuată calcularea modurilor asimetrice și evaluată admisibilitatea asimetriei utilizând coeficienții de asimetrie pentru secvențele zero și inversă și valoarea tensiunilor de fază. Modelul propus este inovator, deoarece permite analiza coeficienților de asimetrie cât la barele de joasă tensiune ale transformatorului de distribuție, atât și la conectarea surselor prin linia trifazată. Totodată este considerată schema de conectare a înfășurărilor. Este demonstrat, că schema înfășurărilor D/y0 are avantaje semnificative față de schema Y/y0, a cărei utilizarea în acest mod este indezirabilă. La injectarea directă pe barele de joasă tensiune ale transformatorului, schema D/y0 asigură valori admisibile tensiunilor de fază și coeficienților de asimetrie pentru secvențele zero și inversă pentru variație injectiei până la curentul nominal al transformatorului. Valorile permise de injecție printr-o linie trifazată sunt reduse semnificativ datorită influenței impedenței sale de secvență zero. Pentru estimarea injecției permise în linia trifazată este necesară calcularea modului. Conexiunea Y/z0 are performanțe puțin mai bune decât D/y0. În cazul conectării sursei printr-un cablu trifazat cu 4 fire și schemele D/y0 și Y/z0, valoarea admisibilă a injecției este limitată de parametri transformatorului, și impedența semnificativ mai mare de secvență zero a cablului.

Cuvinte-cheie: impedența introdusă de transformator, linia de distribuție trifazată, valoarea injecției admisibile de curent monofazat.

Исследование несимметрий, возникающих в распределительной линии 0.4 кВ при различных схемах соединения обмоток питающего трансформатора и подключении однофазного источника возобновляемой энергии

Бошняга В.А., Суслов В.М.

Технический Университет Молдовы, Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Цель работы-исследование несимметричных режимов распределительных трансформаторов 10/0,4 кВ при подключении однофазных источников возобновляемой энергии. Данная проблема актуальна ввиду все более широкого распространения таких источников, влияющих на режим распределительной сети. Для достижения цели решена задача расчета несимметричных режимов и оценки допустимости несимметрии с помощью коэффициентов несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательности и анализа модулей фазных напряжений. Новизна предложенной модели состоит в учете реальной схемы соединения обмоток и позволяет анализировать показатели несимметрии при подключении однофазных источников возобновляемой энергии как непосредственно на шины низкого напряжения распределительного трансформатора, так и через трехфазную линию, питающую потребителей/производителей электрической энергии. Показано, что при работе в режиме однофазной инжекции схема соединения обмоток D/y0 обладает значительными преимуществами перед схемой Y/y0, использование которой в данном режиме нецелесообразно. При инжекции непосредственно на шины низкого напряжения трансформатора схема D/y0 обеспечивает допустимые величины фазных напряжений и коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательностям во всем диапазоне изменения инжекции, вплоть до номинального тока трансформатора. Допустимые значения инжекции через трехфазную линию значительно снижаются ввиду заметного влияния ее сопротивления нулевой последовательности. Для оценки величины допустимой инжекции в зависимости от параметров и длины трехфазной линии необходимо проводить расчет режима. Показано, что схема соединения Y/z0 обладает несколько лучшими показателями по сравнению со схемой D/y0. При подключении источника однофазной генерации через трехфазный 4-х жильный кабель и использовании схем D/y0 и Y/z0 допустимая величина этой генерации будет ограничена не столько параметрами трансформатора, сколько главным образом существенно большим сопротивлением нулевой последовательности кабеля.

Ключевые слова: сопротивление, вносимое трансформатором и трехфазной распределительной линией, величина допустимой однофазной инжекции.

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена исследованию особенностей несимметричных режимов работы распределительных трансформаторов 10/0,4 кВ, которые возникают при подключении однофазных источников возобновляемой энергии (ВИЭ). Такие источники получают все более массовое распространение в связи с наблюдаемой тенденцией резкого увеличения производства электроэнергии от небольших однофазных возобновляемых источников. Например, в Германии доля таких устройств по данным [1] составляет около 70%. Имеется большое количество работ, в которых рассматривается влияние широкого проникновения однофазных возобновляемых источников в распределительные сети низкого напряжения на качество электроэнергии и на другие аспекты их функционирования [2-18], однако нигде не анализируется влияние схем соединения трансформаторов. Традиционно распределительные сети 0,4 кВ проектируются так, чтобы обеспечивать допустимые уровни напряжения у потребителя, при этом сеть обычно радиальная и поток мощности всегда

направлен к потребителю. Однако, при подключении ВИЭ ситуация изменяется, потоки мощности больше не являются однонаправленными, так как теперь мощность может также течь обратно от самого дальнего потребителя к подстанции из-за интеграции ВИЭ. На величины напряжений в системе определенно будет влиять интеграция ВИЭ, и при этом сеть становится активным элементом. Это явление, по мнению авторов [19], даже диктует необходимость пересмотра принятых норм для подключения подобных источников. Однако, несмотря на большое количество исследований в данной области [20-29], посвященных различным аспектам влияния ВИЭ на режим работы распределительной сети, нет работ, учитывающих одновременное влияние как схемы соединения обмоток трансформатора, так и его параметров, и параметров трехфазной линии, посредством которой подключаются источники возобновляемой энергии. Поэтому целью данной работы является учет указанных факторов и выработка рекомендаций по подключению ВИЭ с учетом упомянутых факторов.

При этом основное внимание уделено рассмотрению режимов, близких к предельно допустимым по величине коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности, а также тех, при которых еще соблюдаются нормы по допустимой величине отклонения модулей напряжений фаз у потребителя. Рассмотрены три наиболее распространенные схемы соединения обмоток, а именно: звезда/звезда с нулем ($Y/y0$), треугольник/звезда с нулем ($D/y0$), звезда/зигзаг с нулем ($Y/z0$). Исследования проведены с использованием разработанной авторами схемы (см. рис. 1) на основе модели трехфазного трехстержневого трансформатора, описанной в работах авторов ранее. Эта модель учитывает наличие электромагнитной связи между обмотками разных фаз (но без учета несимметрии плоской конструкции трехстержневого трансформатора), что позволяет более точно отразить специфику возникающих несимметричных режимов. При этом используются номинальные данные трансформатора, такие как мощность,

номинальные напряжения обмоток и напряжения короткого замыкания, ток холостого хода, потери в режиме холостого хода и короткого замыкания для прямой последовательности. Кроме того, модель позволяет также учесть аналогичные данные для нулевой последовательности, которые могут существенно отличаться от параметров для прямой последовательности в случае трехстержневых трансформаторов и существенно зависят от схемы соединения обмоток. Отметим, что в доступной литературе имеются лишь отрывочные данные для параметров трансформатора нулевой последовательности [30], поэтому для повышения точности расчета их необходимо запросить у производителя или определить на основании соответствующих измерений.

Схема рис.1 содержит модель 3-х фазного трансформатора с соединением обмоток, соответствующим рассматриваемому варианту (блок 1), модель линии (блок 2), блоки нагрузок на шинах трансформатора (блок 3) и в конце линии (блок 4).

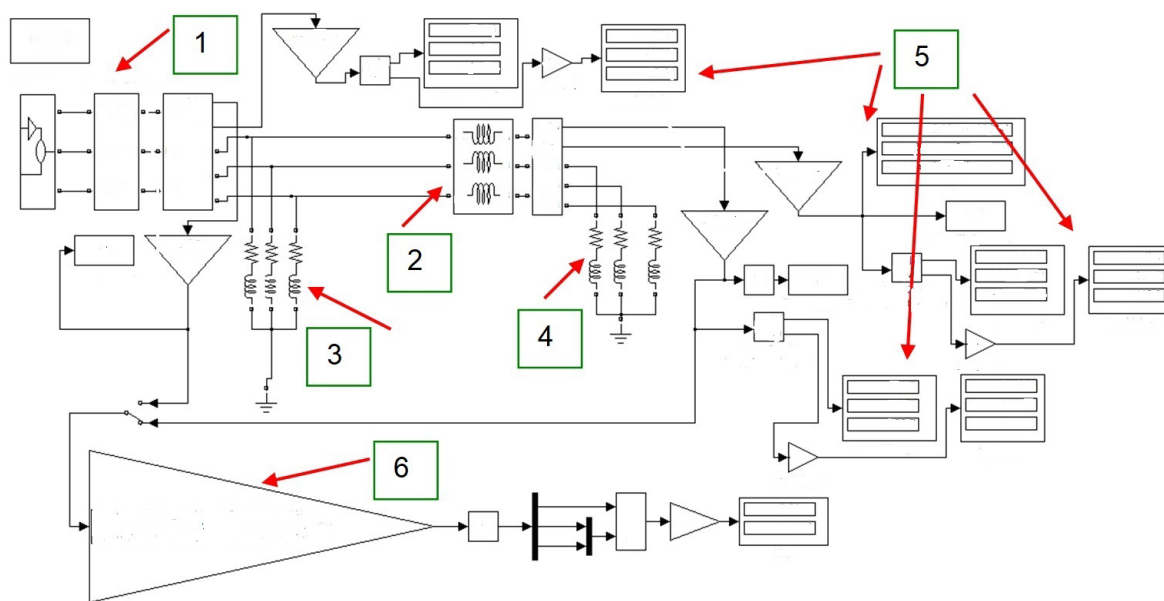


Рис.1. Схема модели для расчетов режимов однофазной инжекции в пакете МАТЛАБ.
Блок 1-модель 3-х фазного трансформатора, блок 2-модель линии, блоки 3,4-блоки нагрузок на шинах трансформатора и в конце линии, блоки 5-отображают модули и углы напряжений и токов в схеме, блок 6-вычисление коэффициентов несимметрии для нулевой и обратной последовательностей.

Fig. 1. Model for calculating single-phase injection modes in MATLAB package.
Block 1-is a model of a 3-phase transformer, block 2-line model, blocks 3,4-loads on the transformer buses and at the end of the line, blocks 5-display the modules and angles of voltages and currents in the circuit, block 6-calculates the asymmetry coefficients for zero and negative sequences.

Кроме того, используются блоки для отображения модулей и углов напряжений и

токов в схеме (блоки 5), а также блок 6 для вычисления коэффициентов несимметрии для

нулевой и обратной последовательностей. В качестве первого этапа ограничимся рассмотрением одной линии, питающейся от шин низкого напряжения (НН) трансформатора, в конце которой может быть подключена нагрузка. Для моделирования однофазной инъекции тока используется отрицательное активное сопротивление соответствующей величины в фазе А нагрузки, которое и создает отрицательный ток нагрузки, т.е. ток инъекции от возобновляемого источника энергии.

Рассмотрим далее поочередно влияние различных схем соединения обмоток трансформатора, а также длины линии до точки подключения однофазного источника, на величину возникающей несимметрии и возможность выполнения нормативных требований по допустимым величинам фазных напряжений и коэффициентам несимметрии по нулевой и обратной последовательности у потребителя [31].

I. РАСЧЕТЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСИММЕТРИИ И МОДУЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ФАЗ ДЛЯ СХЕМЫ Y/y0

Рассмотрим режим однофазной инъекции на шины трансформатора по схеме Y/y0. Здесь и в дальнейшем будем считать, что инъекция производится на стороне низкого напряжения (НН) в фазу А. Кроме того, графики будем строить в относительных единицах по отношению к номинальному току вторичной обмотки трансформатора и нормированному значению допустимого коэффициента несимметрии в 2%.

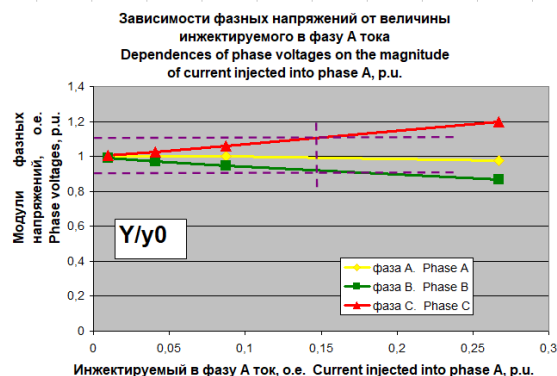


Рис. 2. Модули фазных напряжений при изменении тока инъекции.

Fig. 2. Values of phase voltages at changes of injection current.

На рис. 2,3 показаны графики зависимостей относительных значений

модулей фазных напряжений и коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от относительной величины тока инъекции в фазу А.

В качестве базы для расчета относительных значений приняты номинальное фазное напряжение 230 В и максимальное допустимое значение коэффициента несимметрии в 2%, которые заданы в национальном стандарте Молдовы [31].

Пунктирными линиями на рис.2 ограничена область допустимых значений модулей фазных напряжений в $\pm 10\%$. Из рис.2 видно, что уже при токе инъекции в 0,15 о.е. от номинального (22 А), модуль фазного напряжения фазы С выходит за допустимые пределы. При этом модуль фазы А, куда производится инъекция тока, изменяется незначительно, а напряжение фазы В уменьшается, однако переходит через допустимое значение при большем токе инъекции по сравнению с фазой А. Если в сети нет трехфазных нагрузок, для которых критично соблюдение требований по величине коэффициента несимметрии по нулевой последовательности, то практически это значение активного тока инъекции и есть предельно допустимое.

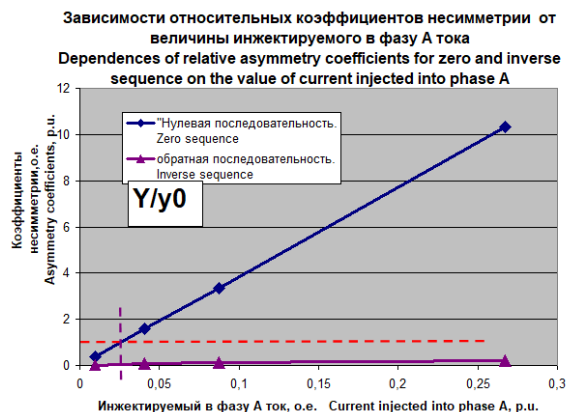


Рис. 3. Зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательностям от тока инъекции.

Fig. 3. Dependences of asymmetry coefficients for zero and inverse sequences at changes of injection current.

При необходимости соблюдать также и нормируемое предельное значение коэффициента несимметрии по нулевой последовательности в 2% величина допустимого тока однофазной инъекции

активной мощности будет еще меньше и в соответствии с рис. 3 составляет около 0,025 о.е. от номинального тока, что соответствует току инжекции в 3,6 А.

Таким образом, для схемы распределительного трансформатора $Y/y0$ при инжекции активного тока непосредственно на шины низкого напряжения трансформатора, ее допустимая величина при соблюдении всех требований к качеству напряжения слишком мала даже для источника очень небольшой мощности, порядка 800 Вт. Данный результат, естественно, справедлив для принятых в расчете исходных данных трансформатора. При других исходных данных трансформатора необходим проверочный расчет для уточнения результатов с использованием предложенной модели.

Рассмотрим далее для этой же схемы трансформатора вариант с подключением однофазного источника возобновляемой энергии в конце трехфазной линии определенной длины и влияние линии на режим напряжений. Проведенные расчеты показали, что при относительно небольшой длине линии (рассматривался вариант с длиной 100 метров) наибольшее влияние оказывает сопротивление нулевой последовательности, вносимое в цепь трансформатором. Поэтому получаемые результаты практически близки к варианту подключения возобновляемого источника непосредственно на шины НН трансформатора. При более значительных длинах трехфазной линии заметное влияние начинают оказывать ее параметры нулевой последовательности. На рис. 4,5 показаны

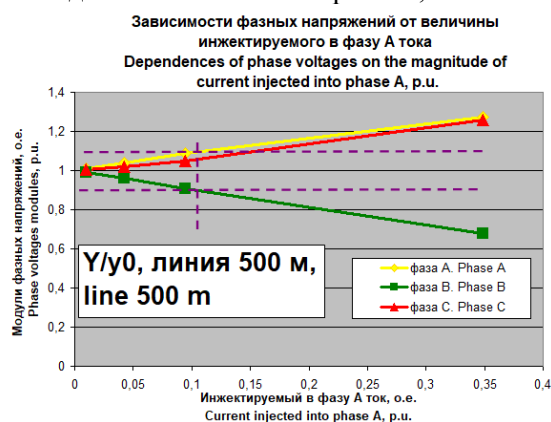


Рис. 4. Зависимости значений фазных напряжений от величины тока инжекции при длине линии 500 м.

Fig. 4. Dependences of phase voltages on the injection current value for a line length of 500 m.

графики зависимостей относительных значений фазных напряжений и коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от относительной величины тока инжекции при длине линии 500 м. Из рис. 4 видно, что уже при токе инжекции около 0,1 о.е. модули напряжений фаз А и В выходят за допустимые пределы.

Если в сети нет трехфазных нагрузок, для которых критично соблюдение требований по величине коэффициента несимметрии по нулевой последовательности, то практически это значение инжекции и есть предельно допустимое. При необходимости соблюдать

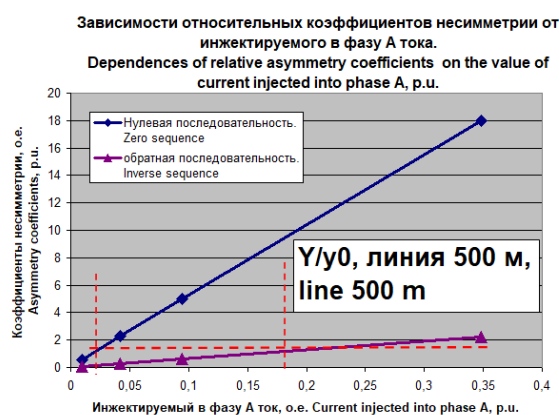


Рис. 5. Зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от тока инжекции при длине линии 500 м.

Fig. 5. Dependences of asymmetry coefficients for zero and negative sequences on the injection current for a line length of 500 m.

нормируемое предельное значение коэффициента несимметрии по нулевой последовательности величина допустимой однофазной инжекции активной мощности будет еще меньше, и в соответствии с рис. 7 составляет около 0,02 от номинального тока, т.е. 3 А.

Отметим, что ограничение по величине коэффициента несимметрии для обратной последовательности (как следует из рис.5) менее жесткое. Для его выполнения необходимо поддерживать величину генерации не более 0,17 о.е.

Таким образом, для рассмотренной схемы соединения обмоток распределительного трансформатора $Y/y0$ максимальная допустимая величина инжектируемого активного тока находится в диапазоне от 0,1 о.е. (при инжекции через линию длиной 500 м) до 0,15 о.е. (инжекция на шины НН). При

наличии же трехфазных потребителей, для которых необходимо также соблюдать требования по величине коэффициентов несимметрии, этот диапазон еще меньше и составляет от **0,02** (при наличии линии) до **0,025 о.е.** (без линии). Полученные результаты показывают, что при использовании в распределительной сети трансформатора со схемой соединения обмоток **У/у0** возможности подключения к нему на стороне НН однофазных источников возобновляемой мощности крайне ограничены ввиду больших сопротивлений нулевой последовательности, как для данной схемы трансформатора, так и для трехфазной четырехпроводной линии.

II. АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСИММЕТРИИ И МОДУЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ФАЗ ДЛЯ СХЕМЫ Д/у0.

Расчеты для данной схемы трансформатора показали, что при инъекции непосредственно на шины НН трансформатора величины модулей напряжений фаз и коэффициентов несимметрии укладываются в норму вплоть до величины инъекции, равной номинальному току.

То есть, для схемы соединения обмоток трансформатора **Д/у0** при подключении однофазного источника возобновляемой энергии непосредственно на его шины НН практически нет ограничений по величине тока инъекции.

Рассмотрим далее влияние трехфазной линии длиной 100 м при подключении источника в ее конце. На рис. 6,7 приведены графики зависимостей относительных

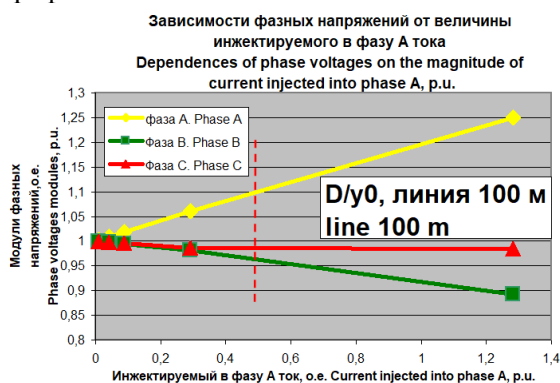


Рис.6. Зависимости фазных напряжений от тока инъекции при длине линии 100 м.

Fig. 6. Dependences of phase voltages on injection current for a line length of 100 m.

значений модулей фазных напряжений и коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной

относительной величины тока инъекции в фазу А в конце линии. Видно, что для соблюдения нормы по величине фазного напряжения возможна инъекция тока до величины **0,5 о.е.** (см. рис.6). Ограничением при этом является повышение напряжения на фазе А.

Однако намного более жестким является ограничение по величине допустимой несимметрии. Для соблюдения нормы по величине коэффициента несимметрии по нулевой последовательности необходимо ограничить уровень инъекции приблизительно до величины **0,06 о.е.** (см. рис.7), в то время как ограничение для обратной последовательности составляет около **0,3 о.е.**

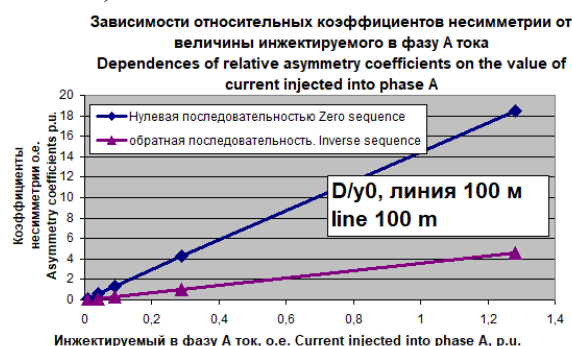


Рис.7. Зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от тока инъекции при длине линии 100 м.

Fig. 7. Dependences of asymmetry coefficients for zero and inverse sequences on the injection current for a line length of 100 m.

Рассмотрим далее влияние трехфазной линии длиной 500 м при подключении однофазного источника возобновляемой энергии в ее конце.

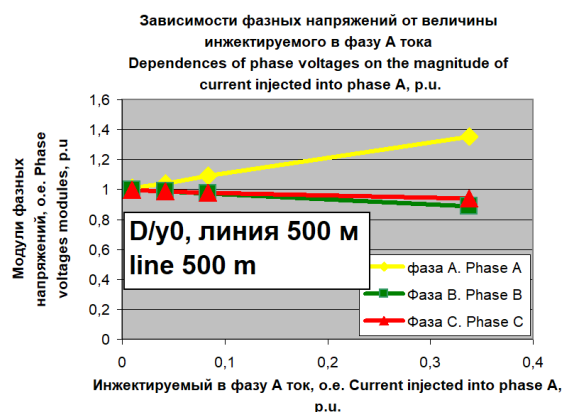


Рис.8. Зависимости фазных напряжений от тока инъекции при длине линии 500 м.

Fig. 8. Dependences of phase voltages on the injection current value for a line length of 500 m.

На рис. 8,9 приведены графики зависимостей модулей фазных напряжений и коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности тока инъекции в конце линии. Видно, что в данном случае для соблюдения нормы по величине фазного напряжения возможна инъекция тока до величины **0,09** о.е. (см. рис.8). Ограничением является повышение напряжения на фазе А.

Как показали расчеты, как и ранее, намного более жестким является ограничение по величине допустимой несимметрии. Для соблюдения нормы по величине коэффициента несимметрии по нулевой последовательности необходимо ограничить уровень инъекции приблизительно до величины **0,02** о.е. (см. рис.9).

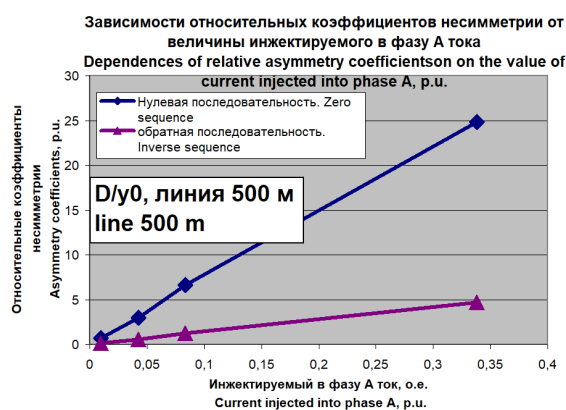


Рис.9. Зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от тока инъекции при длине линии 500 м.

Fig. 9. Dependences of asymmetry coefficients for zero and inverse sequence on the injection current for a line length of 500 m.

III. РАСЧЕТЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСИММЕТРИИ И МОДУЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ СХЕМЫ $Y/z0$.

Расчеты для данной схемы трансформатора показали, что при инъекции непосредственно на шины НН трансформатора величины модулей напряжений фаз и коэффициентов несимметрии укладываются с большим запасом в норму вплоть до величины инъекции, равной номинальному току (см. рис. 10).

Таким образом, для схемы трансформатора $Y/z0$ при подключении однофазного источника возобновляемой энергии непосредственно на его шины НН

практически нет ограничений по величине тока инъекции с точки зрения величин напряжений. На рис.11 приведены зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от

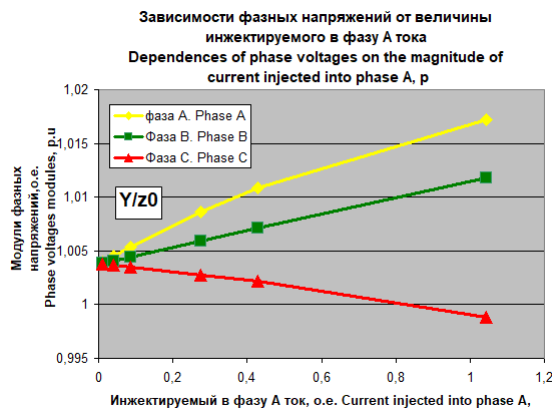


Рис. 10. Зависимости модулей фазных напряжений от величины инжектируемого тока.

Fig. 10. Dependences of phase voltages modules on the magnitude of injected current.

относительной величины тока инъекции в фазу А. Видно, что ограничение по величине допустимой несимметрии (см. вертикальную пунктирную линию) соблюдается приблизительно до величины инъекции в **0,8** о.е., т.е. в достаточно широком диапазоне.

При этом более жестким, как и ранее, является ограничение по величине несимметрии, но в отличие от предыдущих случаев, теперь выше оказывается величина коэффициента несимметрии для обратной последовательности.

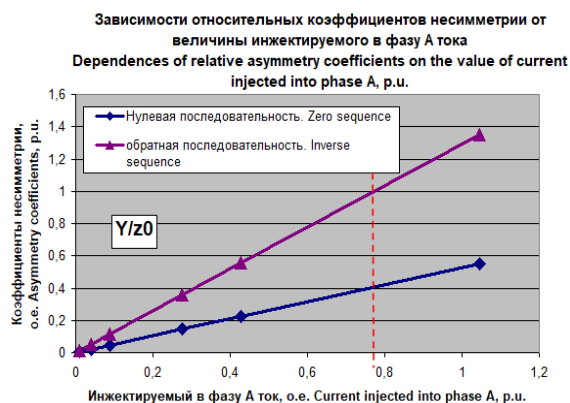


Рис.11. Зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от тока инъекции.

Fig. 11. Dependences of asymmetry coefficients for zero and inverse sequence on the injection current.

Рассмотрим далее влияние трехфазной линии при подключении источника возобновляемой энергии в ее конце.

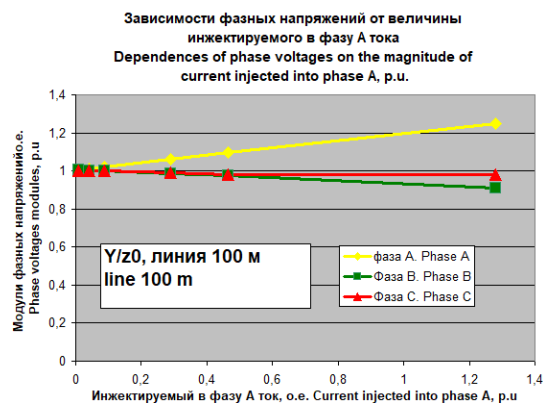


Рис. 12. Зависимости модулей фазных напряжений от тока инжестии при длине линии 100 м.

Fig. 12. Dependences of phase voltages modules on injection current for a line length of 100 m.

На рис. 12,13 приведены графики зависимостей модулей фазных напряжений и коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от величины тока инжестии в конце трехфазной линии длиной 100 м.

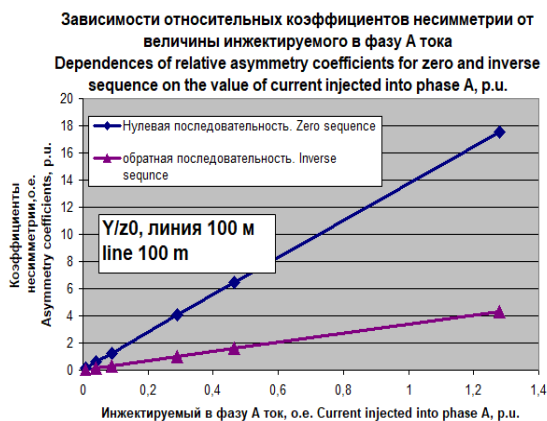


Рис. 13. Зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от тока инжестии при длине линии 100 м.

Fig. 13. Dependences of asymmetry coefficients for zero and inverse sequences on the injection current for a line length of 100 m.

Видно, что в данной схеме для соблюдения нормы по величине фазного напряжения возможна инжестия тока до величины приблизительно 0,47 п.е. (см.рис.12).

Ограничением является повышение напряжения на фазе А. Как и ранее, намного

более жестким является ограничение по величине допустимой несимметрии.

Для соблюдения нормы по величине коэффициента несимметрии по нулевой последовательности необходимо ограничить

уровень инжестии приблизительно до величины 0,07 п.е. (см. рис.13).

ВЫВОДЫ

1. Возможности выдачи мощности в сеть от подключенных однофазных источников возобновляемой энергии для распределительного трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/y0$, тем более через трехфазную линию некоторой длины, крайне ограничены, поэтому целесообразно его применение только для питания симметричной трехфазной нагрузки.

2. Одним из способов улучшить симметрию режима могло быть заземление нейтрали первичной обмотки через резистор, однако для этого необходимо изменить конструкцию трансформатора и отказаться от использования режима изолированной нейтрали, что требует существенных доработок.

3. Схема соединения обмоток $D/y0$ в рассмотренном несимметричном режиме однофазной инжестии от источника возобновляемой энергии обладает значительными преимуществами перед схемой $Y/y0$. При инжестии непосредственно на шины НН трансформатора она обеспечивает допустимые значения величин напряжений и коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательностям во всем диапазоне изменения величины инжестии, вплоть до номинального значения тока трансформатора.

Допустимые значения инжестии через трехфазную линию значительно снижаются ввиду заметного влияния ее сопротивления нулевой последовательности. При этом, более жесткими для потребителя являются ограничения по величине допустимых коэффициентов несимметрии.

4. При отсутствии симметричной трехфазной нагрузки и, следовательно, необходимости соблюдения норм по коэффициентам несимметрии, определяющими становятся ограничения по величинам напряжений фаз, при этом допустима большая величина инжестии. В общем случае, для определения допустимой инжестии в зависимости от дли-

ны и параметров трехфазной линии, необходимо проводить полный расчет режима.

5. Схема соединения обмоток $Y/z0$ в несимметричном режиме однофазной инжекции обладает несколько лучшими показателями по коэффициентам несимметрии по сравнению со схемой $D/y0$. При этом диапазон изменения модулей напряжений фаз на шинах трансформатора приблизительно такой же.

6. Режимы инжекции мощности на шины НН на вторичной стороне трансформаторов со схемами соединения обмоток $D/y0$ и $Y/z0$ сопровождаются приемлемыми значениями коэффициентов несимметрии и отклонениями модулей напряжений фаз в достаточно широком диапазоне изменения инжектируемой мощности, вплоть до номинальных значений, что позволяет рекомендовать их использование при подключении однофазных ВИЭ.

7. В случае подключения источника однофазной генерации на определенном расстоянии от трансформатора со схемами соединения обмоток $D/y0$ и $Y/z0$ через трехфазный 4-х жильный кабель, допустимая величина этой генерации будет ограничена не столько параметрами трансформатора, сколько главным образом удельными электрическими параметрами кабеля и его длиной. При этом главным ограничителем является его существенно большее сопротивление по нулевой последовательности. Поэтому для определения допустимой инжекции с учетом влияния трехфазной линии необходимо проводить полный расчет режима.

8. Отметим также, что вышеприведенные результаты получены в предположении подключения одного однофазного источника. Если имеются несколько источников, подключенных к разным фазам и в разных местах трехфазной линии, то режим может оказаться более симметричным, однако для получения конкретных результатов необходимо также провести полный расчет.

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

- [1] Kortenbruck Jan, Tawichai Premgamone, Egon Ortjohann, Daniel Holtschulte, Sasiphong Leksawat, Andreas Schmelter, Shashank Varada, Danny Morton. Asymmetrical grid control with power electronic regulator in distribution level. IET Renewable Power Generation. Special Issue: Selected papers from the 7th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP 2019). ISSN 1752-1416. doi: 10.1049/iet-rpg.2020.0054. www.ietdl.org.
- [2] Kandil S., Farag H.E., Hilaire L.St., Janssen E.. Power Quality Monitor System for Quantifying the Effects of Photovoltaic Penetration on the Grid. Proceeding of the IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Halifax, Canada, May 3-6, 2015. pp. 237-241. DOI: [10.1109/CCECE.2015.7129192](https://doi.org/10.1109/CCECE.2015.7129192).
- [3] Habijan Danijel, Čavlović Marina, Jakšić Dalibor. The issue of asymmetry in low voltage network with distributed generation. 22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, 10-13 June 2013. Paper 0795, CIRED2013 Session S4. DOI: 10.1049/cp.2013.0933.
- [4] Tiku Fidelis Etanya, Pierre Tsafack, Divine Khan Ngwashi. Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review. Energy Reports 13 (2025) 3181–3203, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.02.050>, <https://www.sciencedirect.com/journal/energy-reports>.
- [5] Marlés-Sáenz Eduardo, Gómez-Luna Eduardo., Guerrero Josep M, Juan C. Vasquez. Analysis of Impacts in Electric Power Grids Due to the Integration of Distributed Energy Resources. *Energies* 2025, 18(3), 745; <https://doi.org/10.3390/en18030745>.
- [6] Naumov I. V., Karamov D. N., Tretyakov A. N., Yakupova M. A., Fedorinova E. S.. Asymmetric power consumption in rural electric networks. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, Sci. 677 032088, doi:10.1088/1755-1315/677/3/032088.
- [7] Fattaheian-Dehkordi S., Fotuhi-Firuzabad M., Shahidepour M., Lehtonen M., "A Distributed Framework for Minimizing the Asymmetrical Power Request in Multi-Agent Microgrids With Unbalanced Integration of DERs," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 116041-116054, 2024, doi:10.1109/ACCESS.2024.3446468. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10640095>.
- [8] Berdygozhin Ansar, Campos-Gaona David. Asymmetric Operation of Power Networks, State of the Art, Challenges, and Opportunities. *Energies* 2024, 17, 5021. <https://doi.org/10.3390/en17205021>, <https://www.mdpi.com/journal/energies>.
- [9] Antonov A., Ivanov D., Denchik Y., Ivanova E., Ivanov M., Palagushkin B., Pereladov M., Romanov M., Salnikov V. Line voltage asymmetry in closed electrical networks with distributed generation as a source of electromagnetic interference. 2021, J. Phys.: Conf. Ser. 2131 052004, DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052004.

- [10] Burbelo M. Y., Melnichuk S. M.; Koshkalda V. O. Raschety regima raspredelitelnoi seti pri nesimmetrichnoi nagruzke. [Calculation of the distribution network mode under asymmetrical load]. Naukovi pratsi VNTU, 2012, № 4, Energetika i electrotehnika, senteabri, 2013, <https://trudy.vntu.edu.ua/index.php/trudy/article/view/359>. (In Russian).
- [11] Von Appen J., Schmiegel A., Braun M.. Impact of pv storage systems on low voltage grids - a study on the influence of pv storage systems on the voltage symmetry of the grid. Germany. Conference Paper, September 2012. DOI: 10.4229/27thEUPVSEC2012-5CO.8.4. <https://www.researchgate.net/publication/236478609>.
- [12] Emmanuel Michael, Rayudu Ramesh. The impact of single-phase grid-connected distributed photovoltaic systems on the distribution network using P-Q and P-V modes. Electrical Power and Energy Systems 91 (2017) 20–33. Victoria University of Wellington, Wellington 6140, New Zealand. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.03.001>
- [13] Kshitij Girigoudar, Line A. Roald. On the impact of different voltage unbalance metrics in distribution system optimization. Electric Power Systems Research, Volume 189, December 2020, 106656. Electrical and Computer Engineering Department, University of Wisconsin–Madison, Madison, USA. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106656>.
- [14] Thilini Perera, Chaminda Udayakumar. Voltage Unbalance Assessment of Solar PV Integrated Low Voltage Distribution System in Sri Lanka Using Monte Carlo Simulation. Department of Electrical and Computer Engineering, the Open University of Sri Lanka, Nawala, Nugegoda. DOI: 10.22059/jser.2023.350730.1262
- [15] Kharrazi Ali ; Sreeram Victor; Mishra Yateendra . Assessment of Voltage Unbalance Due to single phase Rooftop Photovoltaic Panels in Residential Low Voltage Distribution Network. 2017, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). DOI:10.1109/AUPEC.2017.8282506.
- [16] Pintarič M., Štumberger G.. The impact of different PV system grid integration approaches on voltage profile, grid losses and behavior of PV system owners. 22nd International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'24), Bilbao, (Spain), 26-28th of June 2024. ISSN 2172-038 X, Volume No.22, September 2024. DOI: <https://doi.org/10.52152/4033>
- [17] Wen-Chih Yang, Kuo-Fen Liu Chen-Hong Lin, Zih-Yuan Lin. Analysis of Voltage Unbalance due to Single-Phase Dispersed Generation Systems in Three-Phase Low-Voltage Distribution Feeders. Department of Electrical Engineering Taipei City University of Science and Technology Taiwan. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). ISSN: 2278-0181. Vol. 8. Issue 09, September-2019. www.ijert.org. DOI:10.17577/IJERTV8IS090149.
- [18] Silva G.M.D., Tonkoski R., Leão R.P.S.. Real-Time Monitoring and Control of Voltage Unbalance in LV Grids with Single-Phase PV Systems. Renewable Energy (2022). DOI: 10.1016/j.renene.2021.08.102
- [19] Yongheng Yang, Frede Blaabjerg, Huai Wang, Prasad Enjeti, “Suggested Grid-Code Modifications to Ensure Wide-Scale Adoption of Photovoltaic Energy in Distributed Power Generation Systems”, IEEE Industry Applications Magazine, Volume: 21, Issue: 5, Sep/Oct 2015, pp. 21-31. DOI:10.1109/MIAS.2014.2345837.
- [20] Svergun U., Miroshnyk A. Design of asymmetrical mode of rural air electric network 0,38/0,22 kv. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE, 3(14), 2010. (In Russian).
- [21] Naumov I.V. K voprosu upravleniya nesimmetrichnimi regimami raboti raspredelitelnykh elektricheskikh setei 0,38 kV. [About the control of asymmetric modes of distribution electrical networks 0.38 kV.] Promishlennaya energetika, 2022, № 5, pp. 2-14. DOI 10.34831/EP.2022.25.51.001. (In Russian).
- [22] Naumov I.V. Programmnoye obespechenie raschetov nesbalansirovannykh regimov raboti v elektricheskikh seteah nizkogo napreajeniya. [Software for calculation of unbalanced modes in electrical networks of low voltages.]. Energetik, 2024. № 1. pp. 24-30. (In Russian).
- [23] Ded A.V. K voprosu o klassifikatsii nesimmetrichnykh regimov v elektricheskikh seteah. [To the question of classification of asymmetrical modes in electric networks]. Mejdunarodnii jurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. 2016. № 10 (chasti 2). Pp. 183-185. URL:<https://applied-research.ru/ru/article/view?id=10312>. (дата обращения:31.03.2025). (In Russian).
- [24] Fernández Gregorio, Galan Noemi, Daniel Marquina, Martínez Diego, Alberto Sanchez, Pablo López, Hans Bludszweit, Jorge Rueda. Photovoltaic Generation Impact Analysis in Low Voltage Distribution Grids. Energies 2020, 13, 4347; doi:10.3390/en13174347.
- [25] Astashev M.G., Panfilov D.I., Chasov A.V.. Tehnologiya upravleniya regimami raboti raspredelitelnykh setei s nesimmetrichnimi nagruzkami dlea snizheniya poteri i uluchsheniya pokazatelei kachestva elektricheskoi energii. [Technologies for managing operating modes of distribution networks with asymmetric for reduction losses and improving quality of electrical energy.]. Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. №6(81), noiabri-dekabri 2023.

- <https://cepir.ru/release/elektroenergiya-peredacha-i-nbsp-raspredelenie-nbsp-6-81-noyabr-dekabr-2023/>. (In Russian)
- [26] Máslo Karel, Koudelka Jan, Bátora Branislav, Vyčítal Václav. Asymmetrical, Three-phase Power System Model: Design and Application. Acta Polytechnica Hungarica Vol. 20, No. 11, 2023. https://acta.uni-obuda.hu/Maslo_Koudelka_Batora_Vycital_140.pdf
- [27] Papachristou Anastasios C., Awad Ahmed S. A., Turcotte Dave, Wong Steven, Prieur Alexandre. Impact of DG on Voltage Unbalance in Canadian Benchmark Rural Distribution Networks. CanmetENERGY, Natural Resources Canada, Varennes, Québec, Canada. 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). 978-1-5386-5419-4/18/\$31.00 ©2018 IEEE. DOI:10.1109/EPEC.2018.8598420.
- [28] Naumov I. V., Podyachih S. V., Yakubova M. A., Fedorinova E. S., Tretyakov A. N. Issledovanie regimov raboti deistvyuschchih elektricheskikh setei sel'skohozyastvennih predpriyatii. [Study of operating modes of existing electrical networks of agricultural enterprises]. Vestnik NGIEI. 2024, № 1 (152). pp. 72–90. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-1-72-90. (In Russian).
- [29] Rotaru Adrian, Rotari Iulian, Stratan Ion. The analysis of the load asymmetry influence on the transformers with various connections operating modes. 14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL AND ENERGY SYSTEMS, 12 – 13 October 2023, Chişinău, Rep. of Moldova.
- [30] Ramos Angel, Burgos Juan Carlos, Moreno Alejandro, Sorrentino Elmer. «Determination of Parameters of Zero-Sequence Equivalent Circuits for Three-Phase Three-Legged YNyn Transformers Based on Onsite Low-Voltage Tests». IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 28, NO. 3, JULY 2013, pp.1618-1625.
- [31] Moldova Standard SM EN 50160:2014. Caracteristici ale tensiunii în rețelele electrice publice de distribuție. INS: Chisinau, 2014, pp.11-12. (In Romanian)

Сведения об авторах.



Бошняга Валерий Анатольевич, к.т.н.
Основные научные интересы лежат в области расчета несимметричных режимов работы электрических сетей.
E-mail: valeriu.osneaga@gmail.com



Суслов Виктор Миронович, научный сотрудник, научные интересы связаны с режимами энергетических систем, как установившимися, так и переходными, моделированием элементов энергосистем, в том числе с учетом нелинейности. E-mail: svictorm46@gmail.com