

DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-102-115

УДК 621.31

ББК 31.2

А.И. ОРЛОВ, С.В. ВОЛКОВ, И.Х. ГАРИПОВ

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ УСТРОЙСТВ ВЫБОРА ФАЗЫ ДЛЯ ЛИНИЙ 0,4 кВ

Ключевые слова: отклонение напряжения, несимметрия, устройство выбора фазы, потери электроэнергии, линия электропередачи 0,4 кВ, распределительная сеть.

В удаленных от центра питания точках присоединения потребителей протяженных линий электропередачи 0,4 кВ отклонения напряжений могут превышать установленные стандартом значения.

Цель работы состоит в разработке алгоритма управления группой устройств выбора фазы, обеспечивающего минимизацию отклонений напряжений в конце линии и потерь электроэнергии в линии в целом. Научная новизна заключается в определении влияния алгоритмов на показатели несимметрии и потери в линии.

Материалы и методы. В работе применялись методы теории линейных электрических цепей, математического и компьютерного моделирования, индуктивных обобщений. Рассмотрены способы решения проблемы отклонения напряжений в линиях электропередачи 0,4 кВ, к ним относится применение устройств для подключения одно- или двухфазной нагрузки к трехфазной сети, устройств коммутационного типа, полупроводниковых устройств, перераспределяющих мгновенную мощность между фазами электрической сети. Объектом исследования является группа устройств выбора фазы, силовая часть которых включает три дистанционно-управляемых однополюсных контактора, которые позволяют подключать нагрузку к одной из фаз сети.

Результаты исследования. В качестве величин, характеризующих режим работы линии, приняты усредненные за некоторый период времени: токи и напряжения каждой фазы и нейтрального провода в начале линии; напряжения в конце линии; ток каждого потребителя, подключенного через устройство выбора фазы; текущая фаза; фазные напряжения в месте подключения устройства. Разработаны два варианта алгоритма управления группой устройств выбора фазы: первый направлен на минимизацию отклонений напряжения в конце линии; второй – на выравнивание фазных проводимостей в начале линии. В результате численных экспериментов на математической модели линии электропередачи установлено, что минимизация отклонений напряжений в конце линии или выравнивание токов в начале линии не всегда сопровождается снижением потерь в линии в целом; более предпочтительным с точки зрения принятых критериев является алгоритм, направленный на минимизацию отклонений напряжения в конце линии.

Выводы. Предложены классификация способов минимизации отклонений напряжения, схема устройства выбора фазы и схема подключения группы таких устройств к питающей сети 0,4 кВ. Разработаны алгоритмы управления группой устройств выбора фазы, направленные: а) на минимизацию напряжений в конце линии или б) на выравнивание токов в начале линии, а также математическая и компьютерная модель линии и устройств выбора фазы. Показано, что минимизация отклонений напряжения в конце линии или выравнивание токов в начале линии не всегда сопровождается снижением потерь в линии в целом. Исходя из выбранных критериев эффективно более предпочтительным является алгоритм, направленный на минимизацию отклонений напряжения в конце линии.

Введение. Потребители должны получать электроэнергию высокого качества, нормированного стандартом¹. Так, положительные и отрицательные

¹ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10%. Однако на практике это требование не всегда соблюдается, особенно в сельских электрических сетях, характеризующихся большой протяженностью. Основной причиной появления отклонений напряжения является неравномерная загрузка фаз распределительной сети, что связано как с непрерывным изменением мощности самих потребителей, так и с появлением новых вследствие развития населенных пунктов. Распределение однофазных потребителей по фазам сети 0,4 кВ выполняется вручную выездными бригадами при наличии жалоб населения.

Цель работы состоит в разработке алгоритма управления группой устройств выбора фазы, обеспечивающего минимизацию отклонений напряжения в конце линии и потерь электроэнергии в линии в целом.

Научная новизна заключается в определении влияния алгоритмов управления группой устройств выбора фазы, направленных на минимизацию отклонений напряжения в конце линии и на выравнивание токов в начале линии, на показатели несимметрии и потери в линии.

Материалы и методы. В работе применялись методы теории линейных электрических цепей, математического и компьютерного моделирования, индуктивных обобщений. Математическая модель линии электропередачи и устройств выбора фазы построена с использованием модифицированного метода узловых потенциалов в комплексной форме и реализована авторами в виде программы на языке Python.

К подходам, направленным на решение проблемы несимметрии и, как следствие, отклонений напряжения, можно отнести: 1) применение устройств для подключения одно- или двухфазной нагрузки в трехфазную сеть, не изменяющие схему фидера; 2) использование устройств, осуществляющих автоматическое изменение схемы подключения потребителя к питающей электрической сети с целью выравнивания нагрузки по фазам; 3) использование устройств, работающих по принципу перераспределения мгновенной мощности между фазами электрической сети, таких как активные фильтры гармоник или СТАТКОМ.

Большое разнообразие устройств для подключения одно- или двухфазной нагрузки к трехфазной электроэнергетической системе разработано для железнодорожного электротранспорта, поскольку электровагоны получают питание от контактной сети однофазного переменного тока 25 кВ. Типовыми решениями, обеспечивающими присоединение тяговых подстанций на участках переменного тока к трехфазной сети, являются применение: трехфазных трансформаторов 110/27,5 кВ со схемой соединения обмоток Y/Δ, в которых один из выводов соединяется с рельсом, а два других подключены к разным плечам контактной сети; трансформаторов по схеме открытого треугольника, образованных из двух однофазных трансформаторов; трансформаторов, соединенных по схеме Скотта [11, 12]. Группа трансформаторов тяговых подстанций подключаются к ЛЭП с изменением чередования фаз так, чтобы в совокупности обеспечить равномерную загрузку фаз сети. Но в общем случае, когда нагрузка плеч контактной сети неодинаковая, указанные схемы не обеспечивают равномерную нагрузку трехфазной сети.

Существует большое количество разнообразных устройств с индуктивно-связанными обмотками, позволяющих относительно равномерно нагружать трехфазную сеть при подключении к ней 1-фазной нагрузки, например, трехфазно-однофазные трансформаторы ТСТО [14], аналогичные им трансформаторы фирмы BLOCK [13] или устройства, описанные в работах [5, 7]. Такие устройства не имеют широкого применения по причине усложнения и удорожания распределительной сети; их целесообразно использовать в качестве абонентских трансформаторов при сооружении сетей класса напряжения 0,95 кВ, необходимости обеспечения гальванической развязки или в иных обоснованных случаях.

К устройствам, изменяющим схему подключения потребителей к питающей электрической сети, относятся устройства выбора фазы, действие которых направлено на обеспечение заданной величины напряжения потребителя, подключенного через данное устройство. Типичный алгоритм работы таких устройств заключается в присоединении потребителя к фазе электрической сети, уровень напряжения в которой не выходит за границы предварительно заданного диапазона. Однако, если влияние потребителя на сеть значительно, данный алгоритм может вызвать циклический перебор фаз: переключение потребителя на другую фазу может привести к понижению напряжения в ней и необходимости обратного переключения. Известны следующие пути решения проблемы заклинивания: а) установка достаточно широкой зоны нечувствительности; б) увеличение длительности по времени усредняющего окна или установка разрешенных моментов переключения; в) применение усовершенствованного варианта алгоритма, учитывающего падение напряжения, создаваемое потребителем в линии. В этом случае устройство фиксирует разницу напряжения в данной фазе при включенном и выключенном потребителе. Вычисляется напряжение в каждой фазе с учетом возможного подключения к нему потребителя, после чего осуществляется выбор наиболее подходящей фазы.

Независимая работа устройств выбора фазы не всегда обеспечивает нормализацию отклонений напряжения в линии в целом. Так, при значительной неравномерности нагрузки и высоком сопротивлении нейтрального проводника возможно возникновение несимметрии фазных напряжений, особенно в конце линии. Если напряжение в одной из фаз превысит границы заданного диапазона, устройство может переключить потребителя на более загруженную фазу, что лишь усугубит неравномерность распределения нагрузок по фазам. Следовательно, существует необходимость разработки алгоритма согласованного управления устройствами выбора фаз, обеспечивающего выполнение принятых критериев эффективности.

В настоящей работе рассматривается устройство выбора фазы, блок-схема которого показана на рис. 1. Силовая часть устройства включает три однополюсных контактора КМ1–3, подключенных к фазам линии 0,4 кВ, управляемых системой управления СУ. В любой момент времени включен только один контактор. Потребитель подключается к линии через счетчик Wh с возможностью передачи значений напряжения и тока. Устройство не изменяет сопротивления петли фаза-ноль и не влияет на работоспособность устройств релейной защиты.

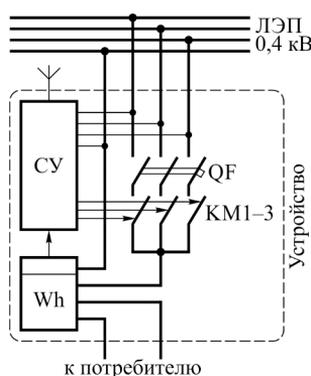


Рис. 1. Схема устройства выбора фазы: СУ – система управления; KM1-3 – 1-фазные контакторы; Wh – счетчик электрической энергии

Через устройство выбора фазы может быть подключено произвольное число потребителей. Устройства управляются по командам блока управления БУ, расположенного в РУ 0,4 кВ ТП, как показано на однолинейной схеме (рис. 2).

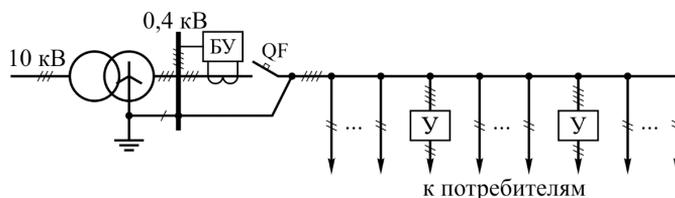


Рис. 2. Однолинейная схема рассматриваемого участка электрической цепи: У – устройства выбора фазы; БУ – блок управления устройствами

Известны способы согласованного управления устройствами выбора фазы коммутационного типа, имеющими аналогичную конструкцию силовой части. Так, в описании патента [6] приведен способ, направленный на симметрирование фазных токов линии. В качестве исходных данных используются лишь фазные напряжения в месте присоединения каждого потребителя и ток в нейтральном проводе. Случай наличия повторных заземлений нейтрального проводника на опорах не рассматривается. В работе [9] предлагается способ симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ, в котором блок симметрирования задействуется только при выходе за границы установленного диапазона отклонения фазных напряжений. Аналогично, в работе [8] исполнительные коммутационные устройства предполагается задействовать при отклонениях фазных токов. Оригинальным решением автора работы [8] является применение в качестве исполнительных устройств 2-позиционных коммутаторов или двух 1-позиционных коммутаторов, переключающих нагрузку между двумя фазами сети.

Результаты исследования. Критерием эффективности алгоритмов управления группой устройств является минимизация: а) отклонений напряжения

в конце линии $\Delta U_{\text{кон}}$ и по возможности на каждом ее участке с целью обеспечения нормируемого ГОСТ 32144-2013 уровня напряжения; б) потерь в линии в целом. Важное значение приобретает также вычислительная эффективность алгоритмов в связи с экспоненциальным ростом количества центров обработки данных в России [1] и общей гуманизацией языков программирования за счет расхода вычислительных ресурсов ЭВМ.

Ограничивающим фактором при разработке алгоритма является доступность величин и параметров, характеризующих линию и подключенных к ней потребителей. Авторы работы [10] исходят из полного доступа к параметрам электрической сети вследствие применения интеллектуальных АСКУЭ. Существуют способы параметрической идентификации сопротивлений распределительной сети. Так, приведенный в работах [2, 3] способ предполагает вычисление сопротивлений межабонентских участков ЛЭП по данным АСКУЭ. Однако в сельских распределительных сетях могут встречаться ЛЭП, не полностью оснащенные АСКУЭ. В настоящей работе предполагались известными усредненные за некоторый период времени:

а) токи и напряжения каждой фазы и нейтрального провода в начале линии;
 б) фазные напряжения в конце линии. Определение фазных напряжений в конце линии требует установки отдельного устройства измерения и передачи данных;

в) ток каждого потребителя, подключенного через устройство, выбранная фаза, а также фазные напряжения в месте подключения.

Таким образом, возможностями измерения величин, характеризующих режим работы потребителей, обладают лишь рассматриваемые устройства выбора фазы, режим работы остальных потребителей неизвестен и может быть вычислен лишь косвенно по известным величинам, измеряемым в РУ 0,4 кВ ТП.

Алгоритм № 1 направлен на минимизацию отклонений напряжения в конце линии. Исходными данными являются: фазные напряжения в начале линии $U_{\text{нач}}$ и в конце линии $U_{\text{кон}}$, сила тока $I_{n,i}$ каждого потребителя, подключенного через устройство. Должна быть также известна выбранная фаза сети ϕ_i для каждого устройства. Если M – множество потребителей (их номеров или идентификаторов), подключенных через устройства, то исходный вариант присоединения потребителей, входящих в множество M , к фазам сети обозначим функцией S_0 : $\forall i \in M, \phi_i \in \{A, B, C\}, \phi_i = S_0(i)$. Функция S_0 может быть представлена в форме упорядоченного множества длиной $|M|$, содержащего индексы фаз. Алгоритм включает следующие этапы.

1. Определение падения напряжения в фазном проводнике, создаваемого каждым потребителем, подключенным через устройство выбора фазы:

$$\forall i \in M, \Delta U_i = I_{n,i} \cdot Z_{\text{лин},i},$$

где $Z_{\text{лин},i}$ – полное сопротивление участка линии от РУ 0,4 кВ до потребителя.

Если линия выполнена одним проводом, то $Z_{\text{лин},i} = Z_{\text{лин,уд}} \cdot l_{\text{лин},i}$, где $Z_{\text{лин,уд}}$ – полное удельное сопротивление фазного проводника линии; $l_{\text{лин},i}$ – длина участка линии от РУ 0,4 кВ до потребителя, как показано на рис. 3. Значения ΔU_i образуют упорядоченное множество ΔU мощностью $|M|$.

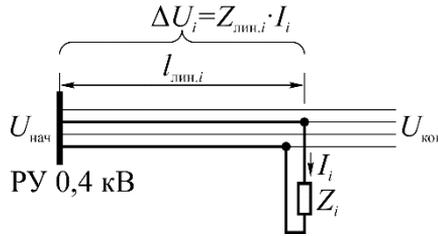


Рис. 3. Определение падения напряжения, создаваемого потребителем в фазном проводнике

2. Определение фазных напряжений в конце линии $U_{\text{кон}}'$, соответствующих отсутствию всех потребителей, подключенных через устройства выбора фазы:

$$\forall i \in M: U_{\text{кон.}\phi}' = U_{\text{кон.}\phi} + \Delta U_{i,\phi},$$

где индекс ϕ обозначает фазу, к которой присоединен i -й потребитель, подключенный через устройство, $\phi_i = S_0(i)$.

3. Определение фазы для каждого устройства, обеспечивающей симметрирование фазных напряжений $U_{\text{кон}}$ в конце линии, т.е. поиск оптимальной функции соответствия: $\exists S_{\text{min}}, f(U_{\text{кон}}) \rightarrow \text{min}$. В качестве целевой функции $f(U_{\text{кон}})$ может быть выбрана функция вычисления:

1) коэффициента неравномерности

$$k_{\text{нер}} = 3 \cdot (U_{\text{кон.}A}^2 + U_{\text{кон.}B}^2 + U_{\text{кон.}C}^2) / (U_{\text{кон.}A} + U_{\text{кон.}B} + U_{\text{кон.}C})^2, \quad (1)$$

где $U_{\text{кон.}A}$, $U_{\text{кон.}B}$, $U_{\text{кон.}C}$ – фазные напряжения в конце линии;

2) коэффициента несимметрии напряжений по обратной или нулевой последовательности. Принимая сдвиги фаз между фазными напряжениями равными $2\pi/3$, получим

$$k_{U_{\text{кон}0}} = U_{\text{кон.}0} / U_{\text{кон.}1} \equiv k_{U_{\text{кон}2}} = U_{\text{кон.}2} / U_{\text{кон.}1}, \quad (2)$$

$$U_{\text{кон.}1} = \frac{1}{3} (U_{\text{кон.}A} + U_{\text{кон.}B} + U_{\text{кон.}C}),$$

$$U_{\text{кон.}0} = U_{\text{кон.}2} = \frac{1}{3} \sqrt{(U_{\text{кон.}A} - \frac{1}{2}U_{\text{кон.}B} - \frac{1}{2}U_{\text{кон.}C})^2 + (\frac{\sqrt{3}}{2}U_{\text{кон.}B} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\text{кон.}C})^2},$$

где $U_{\text{кон.}0}$, $U_{\text{кон.}1}$, $U_{\text{кон.}2}$ – модули симметричных составляющих напряжения $U_{\text{кон}}$ нулевой, прямой и обратной последовательностей соответственно.

Если $S = \{S_0, S_1, S_2, \dots\}$ – множество возможных вариантов присоединения потребителей к фазам сети (функций соответствия множеств M и $\{A, B, C\}$), то мощность множества S равна $|S| = 3^{|M|}$.

Для каждой функции соответствия $S_j \in S$ определяется напряжение в конце линии

$$\forall i \in M: U_{\text{кон.}\phi} = U_{\text{кон.}\phi}' - \Delta U_i. \quad (3)$$

При небольшом числе устройств $|M|$ возможен полный перебор всех вариантов $S_j \in S$, однако в общем случае предлагается применять следующий способ поиска S_{min} , предполагающий частичный перебор функций S :

а) ранжирование упорядоченного множества ΔU по убыванию ΔU_i ;

б) разбиение упорядоченного множества ΔU на t подмножеств $\Delta U = \{\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_m\}$. В результате упорядоченное подмножество ΔU_1 будет содержать элементы с большими значениями ΔU_i , последующие

подмножества, ΔU_3 , и т.д. – в порядке их уменьшения. Каждому подмножеству ΔU_k , $k = 1, \dots, m$ соответствует подмножество потребителей, подключенных через устройства, M_k ;

в) для каждого подмножества ΔU_k , $k = 1, \dots, m$ последовательно, начиная с первого, выполняется:

– полный перебор всех функций соответствия $S_{k,j} \in S_k$, для каждой из которых вычисляется $U_{\text{кон}}$ по формуле (3) и значение принятой целевой функции $f(U_{\text{кон}})$ по формуле (1) или (2). Здесь S_k – множество возможных вариантов присоединения потребителей из множества M_k к фазам сети;

– поиск оптимальной функции соответствия $S_{k,\text{min}}$, при которой значение целевой функции $f(U_{\text{кон}})$ минимально.

После определения $S_{k,\text{min}}$ для множества ΔU_k ее фиксируют и переходят к поиску оптимальной функции соответствия $S_{k+1,\text{min}}$ для следующего подмножества ΔU_{k+1} и т.д. Оптимальная функция соответствия S_{min} всей совокупности устройств образуется последовательным объединением функций соответствия $S_{k,\text{min}}$ для каждого из подмножеств ΔU_k .

Предлагаемый алгоритм частичного перебора функций $S_j \in S$ не всегда позволяет найти функцию S_{min} , обеспечивающую глобальный минимум целевой функции для генеральной совокупности устройств, однако получаемый результат достаточно близок к ней. Кроме того, алгоритм позволяет значительно снизить число вычислительных операций. Так, если через устройства подключены $|M| = 12$ потребителей, то полный перебор предполагает $3^{12} = 531\,441$ вариантов функций соответствия. При разбиении множества ΔU на 4 подмножества по 3 элемента в каждом потребуется произвести лишь $4 \cdot 3^4 = 324$ итерации для поиска оптимальной функций соответствия.

Алгоритм № 2 отличается тем, что направлен на выравнивание фазных проводимостей в начале линии за счет подключения потребителей, подключенных через устройства, к определенным фазам сети. Под фазной проводимостью понимается отношение силы тока к напряжению в соответствующей точке линии. Выравнивание фазных проводимостей означает выравнивание фазных нагрузок и приводит к выравниванию фазных токов в предположении линейности вольт-амперных характеристик. К исходным данным относятся: фазные токи $I_{\text{нач}}$ и напряжения $U_{\text{нач}}$ в начале линии, а также токи $I_{\text{н.}i}$ каждого потребителя, подключенного через устройство, и фазные напряжения $U_{\text{н.}i}$ в местах их присоединения. Должен быть известен исходный вариант S_0 присоединения потребителей к фазам сети. Алгоритм включает следующие этапы.

1. Определение проводимостей фаз в начале линии:

$$\forall \phi \in \{A, B, C\}, G_{\text{нач.}\phi} = I_{\text{нач.}i} / U_{\text{нач.}i}. \quad (4)$$

2. Определение проводимостей каждого потребителя, подключенного через устройство выбора фазы:

$$\forall i \in M, G_i = I_{\text{н.}i} / U_{\text{н.}i}.$$

3. Определение фазных проводимостей в начале линии при отсутствии всех потребителей, подключенных через устройства:

$$\forall i \in M: G_{\text{нач.}\phi}' = G_{\text{кон.}\phi} - G_i,$$

аналогично п. 2 алгоритма № 1. Влияние проводимости ЛЭП не учитывается.

4. Определение фазы для каждого устройства, обеспечивающее минимальные отклонения фазных проводимостей в начале линии, т.е. поиск оптимальной функции соответствия: $\exists S_{\min}, f(G_{\text{нач}}) \rightarrow \min$, где в качестве целевой функции f может быть принята функция вычисления коэффициента неравномерности $k_{\text{нер}}$ или коэффициента нулевой k_0 или обратной k_2 последовательно, вычисляемая по формулам (1) и (2) для аргументов $G_{\text{нач}}$. Аналогично п. 3 алгоритма № 1 для каждой функций соответствия $S_j \in \mathcal{S}$ вычисляется проводимость в начале линии

$$\forall i \in \mathcal{M}: G_{\text{нач},\phi} = G_{\text{кон},\phi}' + G_i,$$

затем выбирается S_{\min} , соответствующая минимуму целевой функции. Сокращение количества вычислительных операций также можно обеспечить путем применения частичного перебора.

Ввиду разнообразия возможных схем линий 0,4 кВ, питающих сельских потребителей, в качестве объекта для моделирования рассматривалась неразветвленная трехфазная линия электропередачи 0,4 кВ, питающая однофазных потребителей. На рис. 4 изображена схема замещения фрагмента электроэнергетической системы, включающая источник ЭДС E_s с линейным напряжением 10 кВ и сопротивление Z_s , величина которого соответствует 1 км провода АС-50. Линию 0,4 кВ с электроэнергетической системой соединяет трансформатор напряжением 10/0,4 кВ, мощностью 250 кВА: $P_0 = 530$ Вт, $P_k = 3700$ Вт, $i_0 = 1,2\%$, $u_k = 4,5\%$; магнитопровод 3-стержневой, обмотки соединены по схеме Δ/Y_0-0 . Параметры схемы замещения трансформатора рассчитаны по методике, приведенной в [4]. Модель линии 0,4 кВ включает последовательно соединенные сопротивления $Z_{\text{лин}}$, величины которых соответствуют проводу СИП-2 $3 \times 50 + 1 \times 54,6$. Через каждые 40 м, чередуя фазы, к линии присоединены 15 однофазных потребителей. Некоторые из них включаются через устройства выбора фазы.

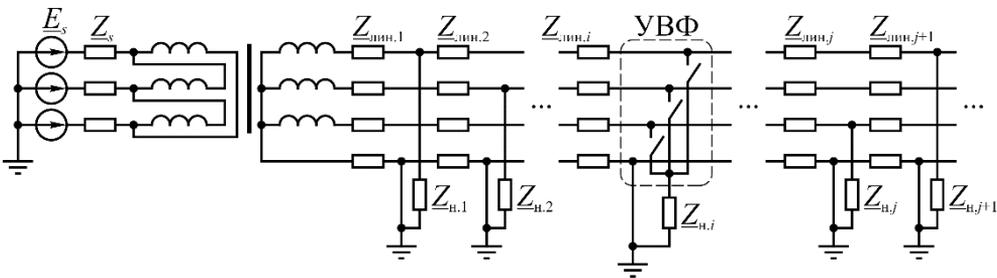


Рис. 4. Схема замещения рассматриваемого участка линии:
УВФ – устройство выбора фазы

Сопротивления нагрузок Z_n в модели определялись исходя из потребляемой мощности и приняты чисто активными. Мощность каждого потребителя выбиралась из нормально распределенного случайного диапазона значений 0–15 кВт с математическим ожиданием 6 кВт, среднеквадратическим отклонением 4 кВт. Плотность вероятности используемого распределения мощностей потребителей показана на рис. 5. На практике значения потребляемой мощности

должны определяться в результате усреднения за некоторый предшествующий интервал времени.

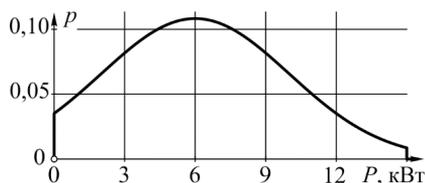


Рис. 5. Принятая в модели плотность вероятности мощности потребителя

В работе принято, что через устройства выбора фазы к линии подключены потребители под номерами 1, 2, 5, 9, 13. Порядок расчета эффективности предложенных алгоритмов управления включает случайный выбор мощностей потребителей и вычисление сопротивлений Z_n ; расчет модели без использования устройств выбора фазы; определение оптимальных функций соответствия S_{\min} в соответствии с рассматриваемыми алгоритмами и расчет модели; сравнение результатов моделирования до и после применения устройств выбора фазы, управляемых по предложенным алгоритмам.

Результаты моделирования представлены в табл. 1 и 2. Рассматривались следующие параметры схемы:

а) суммарная мощность потребителей $\Sigma P_{\text{нагр}}$. Предполагалось, что нагрузка линейная, поэтому изменение тока нагрузки связано прежде всего с изменением напряжения в точках ее присоединения;

б) суммарная мощность потерь в линии и нейтральном проводе $\Sigma P_{\text{э.лин}}$;

в) коэффициенты несимметрии напряжений в конце линии по нулевой и обратной последовательностям $k_0(U_{\text{кон}})$ и $k_2(U_{\text{кон}})$, определяемые по формулам (2), а также коэффициент неравномерности, рассчитанный для напряжения в конце линии $k_{\text{нер}}(U_{\text{кон}})$ по формуле (1);

г) коэффициенты несимметрии фазных токов в начале линии $k_0(I_{\text{нач}})$ и $k_2(I_{\text{нач}})$, коэффициент неравномерности токов $k_{\text{нер}}(I_{\text{нач}})$;

д) коэффициент неравномерности проводимостей в начале линии $k_{\text{нер}}(G_{\text{нач}})$;

В табл. 1 и 2 приведены обобщенные результаты 10 тыс. итераций применения рассматриваемых алгоритмов для различных наборов случайно заданных мощностей нагрузок. Исходные значения суммарных мощностей потребителей и потерь в линии равны соответственно $\Sigma P_{\text{нагр}} = 82\,364$ Вт и $\Sigma P_{\text{э.лин}} = 10\,135$ Вт. Для каждой итерации определялись исходные значения параметров и значения после применения соответствующих алгоритмов, фиксировались случаи увеличения или уменьшения параметров.

В результате применения алгоритма № 1, направленного на выравнивание фазных напряжений в конце линии, количество итераций, при которых суммарная мощность, передаваемая потребителям, и мощность потерь в линии увеличиваются, примерно равно количеству итераций, при которых эти величины

снижаются (табл. 1). При этом среднее увеличение мощности потребителей превышает уменьшение, одновременно потери в линии в среднем уменьшаются значительно, чем увеличиваются. Это связано с общим выравниванием напряжений в результате применения алгоритма № 1 не только в конце линии, но и на участках вдоль нее. Симметрия токов или суммарной проводимости нагрузки в начале линии изменяется незначительно.

Таблица 1

Результат применения алгоритма № 1

Параметр	Уменьшение значения		Увеличение значения	
	доля, %	среднее значение	доля, %	среднее значение
$\Sigma P_{\text{нагр}}$	46,3	288,76 Вт	53,7	499,77 Вт
$\Sigma P_{\text{э.лин}}$	48,2	180,98 Вт	51,8	125,72 Вт
$k_0(U_{\text{кон}})$	99,5	0,0155	0,5	0,0012
$k_2(U_{\text{кон}})$	99,0	0,0163	1,0	0,0015
$k_{\text{нер}}(U_{\text{кон}})$	99,7	0,0012	0,3	$2,8 \cdot 10^{-5}$
$k_0(I_{\text{нач}})$	46,0	0,0614	54,0	0,0640
$k_2(I_{\text{нач}})$	46,2	0,0607	53,8	0,0642
$k_{\text{нер}}(I_{\text{нач}})$	46,2	0,0305	53,8	0,0312
$k_{\text{нер}}(G_{\text{нач}})$	46,3	0,0307	53,7	0,0316

Таблица 2

Результат применения алгоритма № 2

Параметр	Уменьшение значения		Увеличение значения	
	доля, %	среднее значение	доля, %	среднее значение
$\Sigma P_{\text{нагр}}$	57,4	544,09 Вт	42,6	453,36 Вт
$\Sigma P_{\text{э.лин}}$	39,4	162,71 Вт	60,6	209,78 Вт
$k_0(U_{\text{кон}})$	53,6	0,0099	46,4	0,0100
$k_2(U_{\text{кон}})$	54,5	0,0102	45,5	0,0097
$k_{\text{нер}}(U_{\text{кон}})$	53,8	0,0010	46,2	0,0009
$k_0(I_{\text{нач}})$	93,8	0,0785	6,2	0,0108
$k_2(I_{\text{нач}})$	94,4	0,0780	5,6	0,0108
$k_{\text{нер}}(I_{\text{нач}})$	94,1	0,0291	5,9	0,0018
$k_{\text{нер}}(G_{\text{нач}})$	94,1	0,0294	5,9	0,0018

Выравнивание суммарных фазных проводимостей в начале линии за счет действия устройств выбора фазы в соответствии с алгоритмом № 2 в целом не приводит к значимому симметрированию напряжений в конце линии (табл. 2). Изменение суммарной мощности нагрузки и потерь в линии также незначительно. Причина недостаточной эффективности алгоритма № 2 в том, что выравнивание фазных нагрузок относительно начала линии не учитывает позиции потребителей и падений напряжения, создаваемого этими потребителями в линии. Следовательно, выравнивание нагрузки в начале линии может произвольно отражаться на напряжении в конце линии и потерях в ней: при расположении i -го потребителя в начале линии падение напряжения в линии ΔU_i и его влияние на $U_{\text{кон}}$ меньше, чем при его расположении в конце линии. Алгоритм № 1 позволяет учесть эти факторы, поэтому его применение в большей мере соответствует выбранным критериям эффективности.

В работе исследовалось также влияние повторного заземления нулевого проводника на опорах линии. Результаты моделирования показывают, что если хотя бы на 1-2 опорах вдоль линии имеется повторное заземление нейтрального проводника, то напряжение смещения нейтрали вдоль всей линии незначительно отличается от нуля и его можно не учитывать: результаты работы рассмотренных алгоритмов изменяются вследствие этого менее чем в 0,1% случаев.

Практическая значимость работы заключается в возможности реализации предложенных алгоритмов для согласованной работы группой устройств выбора фазы с целью минимизации отклонений напряжения в конце линии и одновременного снижения потерь электроэнергии в ней.

Для согласованной работы устройств выбора фазы и снижения числа коммутаций измеряемые значения токов и напряжений, используемых в алгоритмах управления, должны усредняться в течение некоторого интервала времени в прошлом. Использование возможностей нейронных сетей для прогнозирования нагрузки отдельных потребителей и линии в целом может обеспечить более длительную работу группы устройств в оптимальном режиме. Разработка нейросетевой модели прогнозирования потребления электроэнергии для обозначенных целей может составлять перспективу дальнейших исследований по тематике работы.

Выводы. 1. Предложена классификация способов минимизации отклонений напряжения, включающая использование: устройств для подключения одно- или двухфазной нагрузки в трехфазную систему электроснабжения; устройств, изменяющих схему подключения потребителя к питающей электрической сети; полупроводниковых устройств, перераспределяющих мгновенную мощность между фазами электрической сети.

2. Предложены схема устройства выбора фазы и схема включения группы таких устройств к питающей сети 0,4 кВ. Сформулированы критерии эффективности управления группой устройств: а) минимизация отклонений напряжения в конце линии; б) минимизация суммарных потерь в линии. Выбраны параметры, характеризующие режим работы потребителей, доступные для использования в алгоритме управления.

3. Разработаны алгоритмы управления группой устройств выравнивания нагрузки, направленные: а) на минимизацию отклонения напряжения в конце линии или б) на выравнивание токов в начале линии.

4. Разработаны математическая и компьютерная модели линии и устройств выбора фазы. В результате численных экспериментов установлено, что оба алгоритма могут эффективно использоваться для решения обозначенных задач. Однако минимизация отклонений напряжения в конце линии или выравнивание токов в начале линии не всегда сопровождаются снижением потерь в линии в целом. Исходя из выбранных критериев эффективности более предпочтительным является алгоритм, направленный на минимизацию отклонений напряжения в конце линии.

Литература

1. Мощность российских дата-центров выросла более чем на 20% в 2023 году [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2023/09/14/995074-moschnost-rossiiskih-data-tsentrov-virosla> (дата обращения: 03.03.2024).
2. *Оморов Т.Т., Осмонова Р.Ч., Койбагаров Т.Ж.* Параметрическая идентификация распределительной сети в составе АСКУЭ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2018. № 1. С. 46–52.
3. *Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч.* К проблеме моделирования несимметричных распределительных электрических сетей в составе АСКУЭ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2017. № 1. С. 21–28.
4. *Орлов А.И., Волков С.В., Гарипов И.Х.* Расчет матрицы индуктивностей силового трансформатора // Вестник Чувашского университета. 2023. № 4. С. 120–129. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-120-129.
5. Пат. РФ № ВУ 16121 С1, МПК H02J3/26. Устройство для симметрирования напряжения при несимметричной нагрузке фаз / *Янукович Г.И., Королевич Н.Г., Селицкая О.Ю., Збродыга В.М.*; заявитель и патентообладатель: Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет». № a20100124; заявл. 01.02.2010; опубл. 30.08.2012.
6. Пат. РФ № ЕА 28431 В1, МПК H02J3/26. Способ симметрирования фазных токов трёхфазной четырёхпроводной линии и устройство для его осуществления / *Самокиш В.В.*; заявитель и патентообладатель: Самокиш Вячеслав Васильевич. № 201401340; заявл. 26.12.2014; опубл. 30.11.2017.
7. Пат. РФ № RU 2674753 С2, МПК H02J3/26. Устройство для равномерного распределения однофазной нагрузки по фазам трехфазной сети / *Василенко В.Д.*; заявитель и патентообладатель: Василенко Валерий Дмитриевич. № 2016145155; заявл. 17.11.2016; опубл. 13.12.2018.
8. Пат. РФ № RU 2678190 С1, МПК H02J3/24. Способ симметрирования токов трёхфазной сети 0,4 кВ / *Новикова А.А.*; заявитель и патентообладатель: Новикова Анастасия Анатольевна. № 2017127337; заявл. 31.07.2017; опубл. 24.01.2019.
9. Пат. РФ № RU 2784455 С1, МПК H02J3/26. Способ регулируемого симметрирования токов и напряжений в сельской электрической сети 0,4 кВ / *Дулепов Д.Е., Кондартенкова Т.Е., Сорокин И.А.*; заявитель и патентообладатель: Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет (НГИЭУ)». № 2022116879; заявл. 23.06.2022; опубл. 25.11.2022.
10. Разработка алгоритма симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кВ при распределенной нагрузке вдоль линии / *Куюк Кыюнг Лыу, А.М. Маклецов., А. Альзаккар и др.* // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2022. № 2. С. 86–97.
11. *Пышкин А.А.* Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: УрГУПС, 2016. 373 с.
12. *Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А.* Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. 432 с.
13. Трансформатор 3U11 1000 (3x400/1x230) BLOCK Transformatoren [Электронный ресурс]. URL: https://www.mege.ru/catalog/transformatory_3ui_obedinyayushchie_3_fazy_v_1_fazu/-3ui1_1000_3kh400_1kh230/ (дата обращения: 03.03.2024).
14. Трансформаторы симметрирующие трёхфазно-однофазные (ТСТО, 3 в 1) [Электронный ресурс]. URL: <https://tula-transformator.ru/info.html> (дата обращения: 03.03.2024).

ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (a.i.orlov@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

ВОЛКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – кандидат технических наук, декан электроэнергетического факультета, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (svedin2011@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

ГАРИПОВ ИЛЬСУР ХАЛИЛЕВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (ilsur@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3037-7365>).

Aleksandr I. ORLOV, Sergei V. VOLKOV, Il'sur Kh. GARIPOV
CONTROL ALGORITHM FOR GROUP OF PHASE SELECTION DEVICES
IN 0.4 KV ELECTRIC MAINS

Key words: voltage deviation, unbalance, phase selection device, power loss, 0.4 kV transmission line, 0.4 kV electric mains, distribution network.

In long 0.4 kV power transmission lines, at areas located far from the power supply center, voltage deviations may exceed the values set by the standard.

The purpose of the work is to develop an algorithm for controlling a group of phase selection devices that minimizes voltage deviations at the end of the line and losses in the line as a whole. The scientific novelty lies in determining the effect of algorithms on the indicators of asymmetry and loss in the line.

Materials and methods. The methods of the theory of linear electrical circuits, mathematical and computer modeling, and inductive generalizations were used in the paper. The ways of solving the problem of voltage deviations in 0.4 kV power transmission lines are considered, these include: the use of devices for connecting a single- or two-phase load to a three-phase network; switching type devices; semi-conductor devices that redistribute instantaneous power between phases of the electrical network. The object of the study is a group of phase selection devices, the power part of which includes three remotely controlled single-pole contactors that allow one to connect the load to one of the phases of the network.

Results. The following values are taken as values characterizing the operating mode of the line, averaged over a certain period of time: currents and voltages of each phase and neutral wire at the beginning of the line; voltages at the end of the line; current of each consumer connected through a phase selector device; current phase; phase voltages at the connection point of the device. Two variants of the algorithm for controlling a group of phase selection devices have been developed: the first is aimed at minimizing voltage deviations at the end of the line; the second is aimed at equalizing phase conductivities at the beginning of the line. As a result of numerical experiments on a mathematical model of the line, it was found that minimizing voltage deviations at the end of the line or equalizing currents at the beginning of the line is not always accompanied by a decrease in line losses in the end; an algorithm aimed at minimizing voltage deviations at the end of the line is more preferable from the point of view of accepted criteria.

Conclusions. A classification of methods for minimizing voltage deviations is proposed. A scheme of a phase selection device and a scheme for connecting a group of such devices to a 0.4 kV supply network are proposed. Algorithms have been developed for controlling a group of phase selection devices aimed at: a) minimizing voltages at the end of the line or b) equalizing currents at the beginning of the line. A mathematical and computer model of the line and phase selection devices has been developed. It is shown that minimizing voltage fluctuations at the end of the line or equalizing currents at the beginning of the line is not always accompanied by a decrease in losses in the line as a whole. Based on the selected efficiency criteria, an algorithm aimed at minimizing voltage deviations at the end of the line is more preferable.

References

1. Moshchnost' rossiiskikh data-tsentrov vyroslo bolee chem na 20% v 2023 godu [The capacity of Russian data centers increased by more than 20% in 2023]. Available at: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2023/09/14/995074-moschnost-rossiiskih-data-tsentrov-viroslo> (Accessed Date: 2024, March 3).
2. Omorov T.T., Osmonova R.Ch., Koibagarov T.Zh. Parametricheskaya identifikatsiya raspredelitel'noi seti v sostave ASKUE [Parametric identification of the distribution network as part of the ASKUE]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta, seriya Energetika*, 2018, no. 1, pp. 46–52.
3. Omorov T.T., Takyrbashev B.K., Osmonova R.Ch. K probleme modelirovaniya nesimmetrichnykh raspredelitel'nykh elektricheskikh setei v sostave ASKUE [On the problem of modeling asymmetric distribution electric networks as part of the ASKUE]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta, seriya Energetika*, 2017, no. 1, pp. 21–28.

4. Orlov A.I., Volkov S.V., Garipov I.Kh. *Raschet matritsy induktivnosti silovogo transformatora* [Calculation of power transformer inductance matrix]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2023, no. 4, pp. 120–129. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-120-129.
5. Yanukovich G.I., Korolevich N.G., Selitskaya O.Yu., Zbrodyga V.M. *Ustroistvo dlya simmetrirovaniya napryazheniya pri nesimmetrichnoi nagruzke faz* [A device for voltage balancing with an unbalanced phase load]. Patent RF, no. BY 16121 C1, 2010.
6. Samokish V.V. *Sposob simmetrirovaniya faznykh tokov trekhfaznoi chetyrekhprovodnoi linii i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for balancing phase currents of a three-phase four-wire line and a device for its implementation]. Patent RF, no. EA 28431 B1, 2014.
7. Vasilenko V.D. *Ustroistvo dlya ravnomernogo raspredeleniya odnofaznoi nagruzki po fazam trekhfaznoi seti* [A device for uniform distribution of a single-phase load across the phases of a three-phase network]. Patent RF, no. RU 2674753 C2, 2016.
8. Novikova A.A. *Sposob simmetrirovaniya tokov trekhfaznoi seti 0,4 kV* [A method for balancing currents of a three-phase 0.4 kV network]. Patent RF, no. RU 2678190 C1, 2019.
9. Dulepov D.E., Kondartenkova T.E., Sorokin I.A. *Sposob reguliruemogo simmetrirovaniya tokov i napryazhenii v sel'skoi elektricheskoi seti 0,4 kV* [A method for controlled symmetry of currents and voltages in a rural 0.4 kV electric grid]. Patent RF, no. RU 2784455 C1, 2022.
10. *Razrabotka algoritma simmetrirovaniya nagruzok v setyakh 0,4 kV pri raspredelennoi nagruzke vdol' linii* [Development of an algorithm for load balancing in 0.4 kV networks with distributed load along the line]. Kuok Kyong Lyu, Makletsov A.M., Al'zakkari A. et al. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2022, no 2, pp. 86–97.
11. Pyshkin A.A. *Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog* [Power supply of railways]. Ekaterinburg, 2016, 373 p.
12. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A. *Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog* [Electric power supply of railways]. Ekaterinburg, 2014, 432 p.
13. *Transformator 3UII 1000 (3kh400/1kh230) BLOCK Transformatoren* [Transformer 3UII 1000 (3x400/1x230) BLOCK Transformatoren]. Available at: https://www.mege.ru/catalog/transformatory_3ui_obedinyayushchie_3_fazy_v_1_fazu/3ui1_1000_3kh400_1kh230 (Accessed Date: 2024 March 3).
14. *Transformatory simmetriruyushchie trekhfazno-odnofaznye (TSTO, 3 v 1)* [Symmetrical three-phase-single-phase transformers (TSTO, 3 in 1)]. Available at: <https://tula-transformator.ru/info.html> (Accessed Date: 2024, March 3).

ALEKSANDR I. ORLOV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Electromechanics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (a.i.orlov@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

SERGEI V. VOLKOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Electroenergy Faculty, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (svedin2011@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

ILSUR Kh. GARIPOV – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Power Supply and Technical Diagnostics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (ilsur@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3037-7365>).

Формат цитирования: Орлов А.И., Волков С.В., Гарипов И.Х. Алгоритм управления группой устройств выбора фазы для линий 0,4 кВ // Вестник Чувашского университета. – 2024. – № 2. – С. 102–115. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-2-102-115.