Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 621.39

Расчет переходных процессов при несимметричных и несинусоидальных режимах работы электрических сетей

Мартынов А.П., Головинов В.В., Панченко С.В.

Азово-Черноморский инженерный институт Донской ГАУ

Аннотация

Несимметрия и несинусоидальность токов и напряжений в электрических сетях оказывает негативное влияние на работу электрооборудования, как самих эектрических сетей, так и электроприемников потребителей. В связи с этим весьма актуальной задачей является расчет несимметричных и несинусоидальных режимов работы электрических сетей. В существующих методах расчета таких режимов несимметрия и несинусоидальность рассматриваются отдельно. В данной статье предлагается метод расчета переходных процессов при несимметричных и несинусоидальных режимах работы электрических сетей, который математически сводит в одно целое несимметричный и несинусоидальный режимы работы.

Ключевые слова: ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, НЕСИММЕТРИЯ, НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ, РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ, РЯДЫ ФУРЬЕ

Переходные процессы возникают в электрических системах как при нормальной эксплуатации (включение и отключение нагрузок, источников питания, отдельных цепей, производство испытаний и пр.), так и в аварийных условиях (обрыв нагруженной цепи или отдельной ее фазы, короткое замыкание, выпадение машины из синхронизма и т. д.). Их изучение, разумеется, не может быть самоцелью. Оно необходимо прежде всего для ясного представления причин возникновения и физической сущности этих процессов, а также для разработки практических критериев и методов их количественной оценки, с тем

чтобы можно было предвидеть и заранее предотвратить опасные последствия таких процессов. Короче говоря, важно понимать переходные процессы, но еще важнее уметь сознательно управлять ими [1].

При любом переходном процессе происходит в той или иной мере изменение электромагнитного состояния элементов системы и нарушение баланса между моментом на валу каждой вращающейся машины и электромагнитным моментом.

В результате этого нарушения соответственно изменяются скорости вращения машин, т. е. некоторые машины испытывают торможение, в то время как другие — ускорение. Такое положение существует до тех пор, пока регулирующие устройства не восстановят нормальное состояние, если это вообще осуществимо при изменившихся условиях.

Из сказанного следует, что переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе. Последние взаимно связаны и по существу представляют единое целое. Тем не менее, благодаря довольно большой механической инерции вращающихся машин начальная стадия переходного процесса характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями. В самом деле, вспомним хотя бы процесс пуска асинхронного двигателя. С момента включения его в сеть до момента начала разворота ротора двигателя имеет место только электромагнитный переходный процесс, который затем дополняется механическим переходным процессом. Процесс пуска двигателя значительно усложняется, если учесть возникающую реакцию источника питания и действие его автоматических регулирующих устройств [1, 2].

Также одними из наиболее опасных и частых аварийных режимов в сельском хозяйстве являются несимметричные и неполнофазные режимы. Причины возникновения этих режимов различны. Причиной несимметрии напряжения, в первую очередь, является неравномерное распределение нагрузки по фазам, за счет однофазных потребителей. Разрыв фазной цепи обусловлен механическим обрывом фазного провода, перегоранием одного из предохранителей, нарушением контакта в одной из фаз.

В сельских распределительных сетях 10 и 0,38 кВ всегда существует несимметрия напряжения и высокая вероятность возникновения неполнофазного режима [3]. Интенсивность отказов по причинам обрыва фазного провода составляет в среднем от 3,56 до 4,19 отказа в год на 100 км линий 10 кВ при доверительной вероятности 0,95. Причем,

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

на линии 10 кВ приходится от 65% до 75% от общего числа отказавших элементов электрической сети. В среднем около 30% всех отказов в год приходится на линии 0,38 кВ [4, 5].

Сегодня сельские электрические сети находятся в неудовлетворительном техническом состоянии. Больше половины из них имеют 100% износ [6]. Следовательно, если в ближайшее время финансирование в отрасль не увеличится, число отказов элементов электрических сетей, в том числе и по причинам обрыва фазы, будет возрастать.

Поэтому весьма актуальной задачей является разработка таких методов моделирования электроэнергетических систем (ЭЭС), которые отличались бы универсальностью, адекватностью математического описания ЭЭС при любых проявлениях несимметрии в сети. От того, насколько удачен используемый для моделирования математический аппарат формализации, как в смысле его конструктивности, так и в смысле его адекватности, зависит точность решения задач, объективность оценки допустимости функционирования ЭЭС при той или иной несимметрии. Чрезвычайно высокий уровень развития вычислительной техники и языков программирования позволяет существенно расширить область приложения этого аппарата исследования. В то же время ощущается отсутствие единой методологии, как в вопросах построения моделей ЭЭС, так и в выборе метода решения.

В связи со всем выше изложенным, и ввиду ухудшения качества электрической энергии, возникает задача уточнения существующих методик расчета режимов работы электрических сетей, основывающихся на предположении, что качество электрической энергии соответствует требованиям ГОСТ.

В частности расчет токов короткого замыкания и ударных токов короткого замыкания в электрических сетях по классической методике исходит из того, что трехфазная электрическая система строго симметрична.

В настоящее время, ввиду значительного ухудшения качества электрической энергии, первоочередной задачей дальнейших исследований в этой области является разработка новой методики расчета переходных процессов при коротких замыканиях, учитывающей несимметрию и несинусоидальность напряжений электрической сети. Это даст нам возможность точно определять ударный ток короткого замыкания, что в свою

очередь исключит вероятность неправильного выбора электрооборудования по условиям электродинамической и термической стойкости [2].

Как уже упоминалось выше, в настоящее время в сельских низковольтных сетях 0,38 кВ качество напряжения оставляет желать лучшего. Несимметрия напряжения для сельских сетей напряжением 0,38 кВ весьма распространенный режим работы, вызвано это большим количеством однофазных потребителей. Поэтому актуальной задачей становится расчет токов короткого замыкания с учетом несимметрии и несинусоидальности напряжений [7, 8].

Как показывают последние исследования, в сельских электрических сетях 0,38 кВ наблюдается высокий уровень высших гармоник тока. Это вызвано увеличением количества нелинейных потребителей, подключаемых к электрическим сетям. Если учесть, что к тому же сельские электрические сети являются объективно несимметричными, то возникает задача одновременного учета этих явлений при анализе и расчете электрических сетей. Целью таких расчетов является, например, выявление и учет факторов, влияющих на реальные потери электрической энергии при ее транспортировке по электрическим сетям; разработка способов и технических средств, обеспечивающих доставку качественной электрической энергии потребителям и др.

Целью данной работы является попытка разработки нового подхода к расчету и анализу работы электрических цепей при одновременном учете несимметрии и несинусоидальности напряжений и токов. Нужно отметить, что работы в этом направлении давно ведутся отечественными и зарубежными учеными. Вообще любая попытка взглянуть на эту проблему с разных сторон в отличие от «классического» подхода всегда, в конечном итоге, ведет к более глубокому пониманию динамических процессов в реальных электрических сетях.

Рассмотрим «классический» подход к расчету и анализу электрических цепей в случае несимметрии и несинусоидальности напряжений и токов. Основным методом расчета несимметричных цепей является хорошо зарекомендовавший себя метод симметричных составляющих. Для анализа и расчета цепей с несинусоидальными токами используется тригонометрические ряды Фурье. На первом этапе расчетов несинусоидальные кривые напряжения источников питания или напряжения в узле нагрузки (если рассчитывается участок электрической сети) раскладывают в ряд Фурье.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Далее для всех гармоник напряжения определяют значения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей и ведут расчет токов по каждой последовательности и по каждой гармонике. В конце расчета, суммируя полученные результаты, находят мгновенные значения токов в фазных проводах и нулевом проводе. В принципе провести такой расчет не так уж и сложно, правда, если только сопротивления нагрузки линейные и симметричные. Если же сопротивления нагрузки нелинейные и несимметричные, что чаще всего и бывает, то необходимо составлять по законам Кирхгофа и решать систему нелинейных уравнений. Это во много раз усложняет расчет и анализ процессов, происходящих в реальных электрических сетях.

Предлагаемый подход к расчету и анализу работы электрических цепей при несимметрии и несинусоидальности напряжений и токов заключается в следующем.

Рассмотрим преобразование по методу симметричных составляющих. В матричной форме формулы для преобразования фазных напряжений или токов в составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей и обратно имеют вид

$$\mathbf{A_c^{(s)}} = \mathbf{T}\cdot\mathbf{A_ф^{(n)}} \text{ и } \mathbf{A_ф^{(n)}} = \mathbf{T^{-1}}\cdot \mathbf{A_c^{(s)}},$$

где $\mathbf{A_ф^{(n)}}$ – матрица-столбец фазных напряжений или токов;

$\mathbf{A_c^{(s)}}$ – матрица-столбец симметричных составляющих напряжения или токов;

T – матрица преобразования.

Зададимся фазным множителем $k = e^{j\cdot\frac{2\pi}{N}}$, где N – число фаз, и представим матрицу преобразования в удобном для анализа виде

$$\mathbf{T} = \frac{1}{N}\cdot\begin{bmatrix} k^0 & k^1 & k^2 \\ k^0 & k^2 & k^4 \\ k^0 & k^3 & k^6 \end{bmatrix}.$$

Если транспонировать матрицу **T**, а затем заменить каждый ее элемент комплексно-сопряженным числом, то получим обратную матрицу $\mathbf{T^{-1}}$

$$\mathbf{T^{-1}} = \begin{bmatrix} k^0 & k^0 & k^0 \\ k^{-1} & k^{-2} & k^{-3} \\ k^{-2} & k^{-4} & k^{-6} \end{bmatrix}.$$

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Эти матрицы можно также использовать в более симметричном, нормированном виде

$$\mathbf{T}=\frac{1}{\sqrt{N}}\cdot\begin{bmatrix}k^0 & k^1 & k^2\\ k^0 & k^2 & k^4\\ k^0 & k^3 & k^6\end{bmatrix} \text{ и } \mathbf{T^{-1}}=\frac{1}{\sqrt{N}}\cdot\begin{bmatrix}k^0 & k^0 & k^0\\ k^{-1} & k^{-2} & k^{-3}\\ k^{-2} & k^{-4} & k^{-6}\end{bmatrix}.$$

Как видно в таких матрицах преобразования хорошо проявляется определенная закономерность, и они очень удобны для запоминания. Каждый элемент матрицы **T** представляет собой фазный множитель в некоторой степени. Показатель степени фазного множителя определяем как $k^{n\cdot s}$. Здесь n – порядковый номер фазы ($n = 0,1,2$), а s – порядковый номер симметричных составляющих ($s = 1,2,3$). Например, если вести преобразование относительно фазы *A*, то

$$\begin{matrix}A & B & C\\ 0 & 1 & 2\end{matrix}\quad\text{последовательности}$$

$$\mathbf{T}=\frac{1}{N}\cdot\begin{bmatrix}k^0 & k^1 & k^2\\ k^0 & k^2 & k^4\\ k^0 & k^3 & k^6\end{bmatrix}\begin{matrix}1 & \text{прямая}\\ 2 & \text{обратная}\\ 3 & \text{нулевая}\end{matrix}.$$

А если, например, относительно фазы *B*, то

$$\begin{matrix}-1 & 0 & 1\end{matrix}$$

$$\mathbf{T}=\frac{1}{N}\cdot\begin{bmatrix}k^{-1} & k^0 & k^1\\ k^{-2} & k^0 & k^2\\ k^{-3} & k^0 & k^3\end{bmatrix}\begin{matrix}1\\ 2\\ 3\end{matrix}.$$

Кроме того, в таком виде можно очень просто составить матрицы преобразования для электрических сетей с любым числом фаз.

Далее от полученных матриц преобразования перейдем к несколько иной форме записи уравнений по методу симметричных составляющих

$$A_c^{(s)}=\frac{1}{N}\cdot\sum_{n=0}^{N}A_\phi^{(n)}\cdot e^{j\cdot s\cdot\frac{2\pi}{N}\cdot n}=\frac{1}{M}\cdot\sum_{n=0}^{N}A_\phi^{(n)}\cdot e^{j\cdot s\cdot q\cdot n},$$

$$A_\phi^{(n)}=\sum_{s=1}^{N}A_c^{(s)}\cdot e^{-j\cdot s\cdot\frac{2\pi}{N}\cdot n}=\sum_{s=1}^{N}A_c^{(s)}\cdot e^{-j\cdot s\cdot q\cdot n}.$$

Анализ этих выражений показывает, что они представляют собой не что иное, как формулы прямого и обратного преобразования Фурье в комплексном виде. Следовательно, можно сделать вывод, что преобразование по методу симметричных составляющих формально аналогично преобразованию Фурье относительно переменной qn (здесь $q = \frac{2\pi}{N}$ – аналог угловой частоты ω , n – фазная переменная). И можно считать, что прямая последовательность – это основная фазная гармоника, а обратная и нулевая последовательности – высшие фазные гармоники.

Если перейти к выражениям мгновенных значений напряжений или токов, то получим (сейчас и в дальнейшем для примера возьмем напряжение, однако все полученные выражения справедливы и для ЭДС и токов электрической цепи) [9]

$$u(n) = \sum_{s=1}^{N} U_{m_s} \cdot \sin(-s \cdot qn + \phi_s) \ .$$

В полученном выражение время в явном виде отсутствует, потому что при переходе к комплексам синусоидального напряжения и тока обычно принимают $\omega t = 0$.

Если же учитывать изменения напряжений и токов во времени при наличии высших гармонических составляющих и симметричных составляющих, то выражение для мгновенных значений будет представлять собой двойной ряд Фурье [9, 10]

$$u(t,n) = \sum_{g=0}^{\infty} \sum_{s=1}^{N} U_{m_{gs}} \cdot \sin(g \cdot \omega t - s \cdot qn + \phi_{gs}) \ ,$$

где g – порядковый номер гармонической составляющей

при g = 0 $U_{m_{gs}} = U_{0s}$, а $\phi_{gs} = \phi_s + \frac{\pi}{2}$,

$U_{m_{gs}}$ – амплитуда напряжения g-ой гармонической составляющей и s-ой симметричной составляющей.

Для каждой фазы в отдельности мгновенные значения напряжения можно получить, если принимать $qn = 0$ – для первой фазы, $qn = 2\pi / 3$ – для второй фазы и $qn = 4\pi / 3$ – для третьей фазы.

Основным преимуществом данного подхода к расчету электрических цепей является то, что два основных режима работы: несимметричный и несинусоидальный, которые до этого формально рассматривались отдельно, математически сводятся в одно

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

целое. Использование рядов Фурье в конечном итоге приводит к эквивалентному преобразованию по мощности многофазной несимметричной электрической цепи в однофазную цепь с высшими фазными гармониками, что сокращает число расчетных уравнений практически до одного.

Периодически изменяющаяся несимметричная и несинусоидальная величина характеризуется максимальным, средним и действующим значением.

Действующее значение несимметричной и несинусоидальной величины определяется как [9, 10]

$$U = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N}\frac{1}{T}\int_{0}^{T}u^2(t,n)dt} = \sqrt{\sum_{g=0}^{\infty}\sum_{s=1}^{N}\frac{U_{m}{}^{2}{}_{gs}}{2}} .$$

Мгновенная мощность равна

$$p(t,n) = u(t,n)\cdot i(t,n) =$$

$$= \left(\sum_{g=0}^{\infty}\sum_{s=1}^{N}U_{m_{gs}}\cdot\sin(g\cdot\omega t - s\cdot qn + \phi_{gs})\right)\cdot\left(\sum_{g=0}^{\infty}\sum_{s=1}^{N}I_{m_{gs}}\cdot\sin(g\cdot\omega t - s\cdot qn + \varphi_{gs})\right) .$$

Активная мощность как среднее значение мгновенной мощности равна

$$P = \sum_{n=0}^{N}\frac{1}{T}\int_{0}^{T}p(t,n)dt = N\cdot\sum_{g=0}^{\infty}\sum_{s=1}^{N}\frac{U_{m_{gs}}\cdot I_{m_{gs}}}{2}\cdot\cos(\phi_{gs}-\varphi_{gs}) .$$

Полная мощность определяется как произведение действующих значений напряжения и тока

$$S = N\cdot U\cdot I = N\cdot\sqrt{\sum_{g=0}^{\infty}\sum_{s=1}^{N}\frac{U_{m}{}^{2}{}_{gs}}{2}\cdot\sum_{g=0}^{\infty}\sum_{s=1}^{N}\frac{I_{m}{}^{2}{}_{gs}}{2}} .$$

Отношение активной мощности к полной дает значение условного коэффициента мощности

$$\cos\chi = \frac{P}{S} .$$

Нужно отметить, что при синусоидальных напряжениях и токах в многофазной электрической цепи, но при несимметричной нагрузке, значение полной мощности, рассчитанной по приведенной выше формуле, будет больше значения полной мощности, рассчитанной обычным способом. В случае симметричной нагрузки результаты одинаковы.

Для анализа несимметричных и несинусоидальных режимов в многофазных электрических сетях, в дополнении к показателям ГОСТ 32144-2013, можно предложить следующие коэффициенты (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты, характеризующие степень несимметрии и несинусоидальности напряжения

Однофазная сеть Напряжение несинусоидальное	Многофазная сеть Напряжение синусоидальное, несимметричное	Многофазная сеть Напряжение несинусоидальное, несимметричное
коэффициент g-ой гармонической составляющей напряжения $k_{U(g)} = \frac{U_g}{U_1} \cdot 100\%.$	коэффициент несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности (коэффициент s-ой симметричной составляющей напряжения) $k_{U(s)} = \frac{U_s}{U_1} \cdot 100\%.$	**коэффициент g-ой гармонической и s-ой симметричной составляющих напряжения** $k_{U(gs)} = \frac{U_{gs}}{U_1} \cdot 100\%$
коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения $k_{Ut} = \frac{\sqrt{\sum_{g=2}^{40} U_g^2}}{U_1} \cdot 100\%.$	**коэффициент искажения симметрии напряжения** $k_{Un} = \frac{\sqrt{\sum_{s=2}^{N} U_s^2}}{U_1} \cdot 100\%.$	**коэффициент искажения синусоидальности и симметрии напряжения** $k_{Un} = \frac{\sqrt{\sum_{g=2}^{40}\sum_{s=2}^{N} U_{gs}^2}}{U_1} \cdot 100\%$

Примечание. 1) В таблице жирным шрифтом показаны предлагаемые коэффициенты, характеризующие степень несимметрии и несинусоидальности напряжения.
2) U_1 – напряжение прямой последовательности основной гармоники.

Таким образом, предлагаемый подход позволит совместить расчет несинусоидальных и несимметричных режимов работы электрических сетей, а не рассматривать их по отдельности.

Список использованных источников:

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах – М.: «Энергия», 1970. – 520 с.

2. Мартынов А.П., Бирюков М.И., Арженовсков А.М. Исследование переходных процессов в электрических сетях // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2023. – № 12 (38) – С. 150-155.

3. Волков В.И. Выбор установок защиты от перегрузки асинхронных двигателей в сельских сетях 380/220 // Промышленная энергетика. – 1984. – №4. – С. 17-18.

4. Куценко Г.Ф. Расчетные показатели надежности электроснабжения потребителей АПК // Техника в сельском хозяйстве. – 1997. – №3. – С. 14-16.

5. Мамедов Ф.А., Литвин В.И., Мамедова Л.Ф. О выборе оптимальной защиты электродвигателей от аварийных режимов // Техника в сельском хозяйстве. – 1999. – №1. – С. 15-18.

6. Губанов М.В., Лещинская Т.Б. Состояние сельской электрификации и ее перспективы // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. – №3. – С. 2-4.

7. Мартынов А.П., Постельный В.Е., Бегиджонов Д.Д. Зависимость ударного тока короткого замыкания от несимметрии // Научный Альманах ассоциации France-Kazakhstan. – 2023. – № 1 – С. 114-119.

8. Мартынов А.П., Постельный В.Е., Бегиджонов Д.Д. Программно-вычислительный комплекс для расчета токов короткого замыкания // Научный Альманах ассоциации France-Kazakhstan. – 2023. – № 1 – С. 93-98.

9. Кобзистый О.В. Анализ несимметричных и несинусоидальных режимов работы многофазных электрических цепей // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 2013. – №5.

10. Кобзистый, О.В. О расчете несимметричных режимов работы многофазных электрических цепей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика – 2014. – №4.

Цитирование:

Мартынов А.П., Головинов В.В., Панченко С.В. Расчет переходных процессов при несимметричных и несинусоидальных режимах работы электрических сетей [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2024. – № 3. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/3/st_332.pdf