

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Отмечены основные особенности распространения электромагнитного поля по линии электропередачи, связанные с понижением качества электрической энергии. Представлены их отличия от традиционных методик.

Ключевые слова: гармонические составляющие напряжения и тока, несимметрия, длина волны, линия с распределенными параметрами, фазные токи, фазные напряжения, постоянная распространения, собственные и взаимные волновые сопротивления.

Своеобразие распределения электрической энергии (ЭЭ) по современной линии электропередачи (ЛЭП) обусловлено, в первую очередь, качеством электрической энергии и зависит, прежде всего, от величины уровней несинусоидальности и несимметрии напряжений и токов.

Электрическую энергию обычно определяют как мощность P , генерируемую за определенный промежуток времени T

$$W = \int_0^T P dt .$$

Вариант 1. Кроме того, следует помнить, что электрическая энергия — это субстанция электромагнитного поля. Электромагнитное поле — физическое поле, посредством которого осуществляется взаимодействие электрически заряженных частиц [1].

Выберем тип и сечение токоведущих частей ЛЭП в соответствии с действующими Правилами эксплуатации электроустановок, на основании чего примем рабочие зоны ЛЭП, соответствующими линейным областям вольтамперных характеристик конструктивных элементов линии. Поэтому в данном случае распространение ЭЭ по ЛЭП следует рассматривать как процесс распространения электромагнитного поля в линейной среде.

В классической электродинамике процесс распространения электромагнитного поля в линейной среде описывается уравнениями Лоренца-Максвелла. Эти уравнения иллюстрируют волновой характер распространения электромагнитного поля. В линейной среде электромагнитное поле распространяется по гармоническим законам. Таким образом, процесс распространения ЭЭ по ЛЭП можно определить как колебательный.

Электрическая энергия в инженерной практике часто оценивается по своим основным характеристикам: напряжению и току. В линейной среде эти характеристики тоже распространяются по гармоническим законам. То есть их распространение также представляет собой колебательный процесс. Частота колебаний в российских электроэнергетических системах (ЭЭС) составляет 50 Гц. Можно сказать, что частота колебаний электромагнитного поля в ЛЭП равна 50 Гц.

Длина волны электромагнитного поля определяется по формуле

$$\lambda = \frac{c}{f_0} , \quad (1)$$

где c — скорость распространения электромагнитного поля в линейной среде; $f_0 = 50$ Гц — основная частота гармонических колебаний в российских ЭЭС.

Ориентировочно скорость распространения электромагнитного поля в ЛЭП определяется как [2]

$$c \approx 3 \cdot 10^{-5} \frac{8x_0^2}{8x_0^2 + R_0^2} ,$$

где x_0 и R_0 — погонные продольные реактивное и активное сопротивления линии электропередачи.

В инженерной практике за скорость распространения электромагнитного поля ЛЭП часто принимают скорость распространения этого поля в вакууме $c \approx 3 \cdot 10^{-5}$ км/с. Тогда, судя по формуле (1), длина электромагнитной волны в ЛЭП оказывается равной

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^5}{50} = 6000 \text{ км.}$$

Графически распределение электрической энергии основной частоты можно представить так, как это сделано на рисунке 1, где видно, что распределение ЭЭ по участкам ЛЭП, протяженностью до 300 км можно считать практически линейным. Поэтому при анализе распределения ЭЭ по линиям такой протяженности их принимают за линии с сосредоточенными параметрами [3].

ЛЭП большей протяженности обычно называют длинными линиями. В процессе анализа распределения по ним электрической энергии их учитывают как линии с распределенными параметрами [2, 3]. Это, что касается ЭЭ хорошего качества.

Ни электрическую энергию пониженного качества, ни ее основные характеристики нельзя считать распределяемыми по гармоническим законам. Особенно при повышенных уровнях несинусоидальности напряжений и токов. Пример временной диаграммы таких характеристик ЭЭ приведен на рисунке 2. Здесь очевидно присутствие высокочастотных составляющих.

* — автор, с которым следует вести переписку.

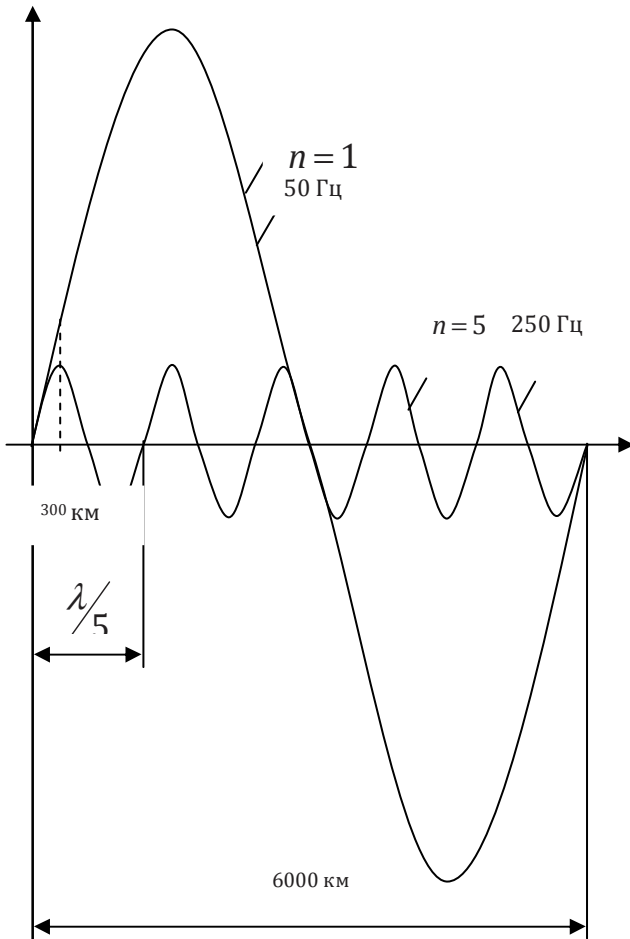


Рис. 1. Графическая интерпретация распространения электромагнитного поля по ЛЭП:

A — количественная характеристика электромагнитного поля;
 l — протяженность ЛЭП

Анализу распределения такой ЭЭ по ЛЭП, как правило, обычно предшествуют процедуры разложения основных характеристик электрической энергии (напряжений и токов) на гармонические составляющие [4, 5]. Таким образом, напряжение и ток, характеризующие ЭЭ пониженного качества, следует рассматривать как совокупность гармонически изменяющихся периодических функций.

Повышение частоты периодически изменяющейся величины означает уменьшение периода ее изменения, а, следовательно, судя по формуле (1), уменьшение длины волны электромагнитного поля.

Результаты предварительных расчетов свидетельствуют о том, что нелинейность распределения ЭЭ вследствие уменьшения длины электромагнитной волны необходимо учитывать: при частоте 150 Гц ($n=3$) на линиях протяженностью 70 км; при частоте 250 Гц ($n=5$) на линиях протяженностью 30 км (рис.1); при частоте 450 Гц ($n=9$) на линиях протяженностью 10 км.

Эти факты свидетельствуют о том, что при анализе распределения ЭЭ даже по непротяженным участкам ЭЭС ЛЭП следует рассматривать как линию с распространенными параметрами.

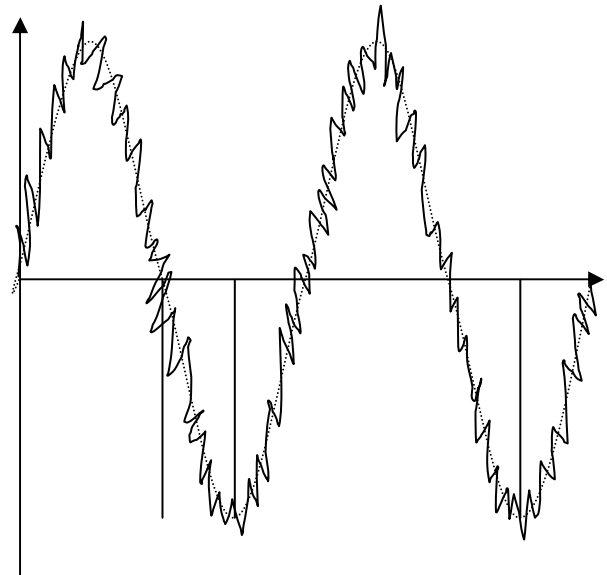


Рис. 2. Временная диаграмма несинусоидальной функции

Электрическая схема замещения ЛЭП представляет собой графическое изображение совокупности продольных и поперечных элементов. На рисунке 3 изображена схема замещения однородного участка однофазной ЛЭП однопроводного исполнения. Символами \underline{Z}_{10n} и \underline{Z}_{20n} обозначены изображения на комплексной плоскости погонных величин продольных и поперечных параметров схемы замещения анализируемого участка ЛЭП на частоте n -й гармонической составляющей. Протяженность выделенного элемента линии равна dl .

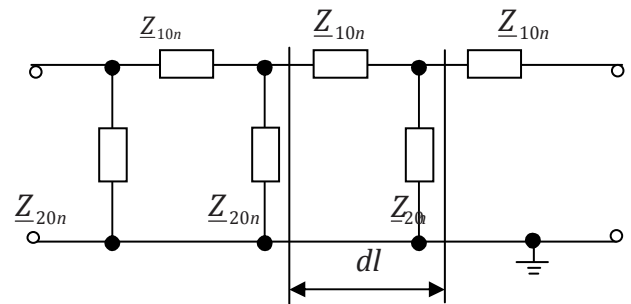


Рис. 3. Схема замещения линии с распределенными параметрами

Продольные параметры линии \underline{Z}_{10n} характеризуют непосредственно однопроводную линию на соответствующей частоте, а поперечные параметры \underline{Z}_{20n} — связь однопроводной линии с находящимися рядом элементами электроэнергетических систем или же с элементами иного рода. В данном случае \underline{Z}_{20n} характеризует связь однопроводной линии протяженностью в 1 км с заземленными элементами ЭЭС, или, проще говоря, с «землей». Причем, продольные параметры обычно представляются резистивными и индуктивными элементами, а поперечные — резистивными и емкостными.

Это традиционный подход к процессу формирования электрической схемы замещения ЛЭП. На рисунке 4 представлена традиционная электрическая схема замещения ЛЭП.

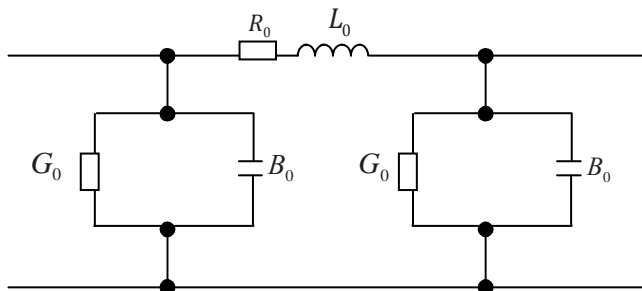


Рис. 4. Традиционная электрическая схема замещения ЛЭП

Однако, экспериментально доказано, что при изменении частоты изменения напряжения и тока в продольных параметрах ЛЭП может проявляться и емкостной характер, а в поперечных — индуктивный [5]. Поэтому в данном случае в состав элементов, характеризующих продольные параметры, должны входить и резистивные, и индуктивные, и емкостные элементы, а поперечные параметры должны иллюстрироваться резистивными, емкостными и магнитными связями. Отличительной чертой здесь является то, что в состав продольных параметров кроме традиционных резистивных и индуктивных элементов входят и собственные емкости проводов.

Из теории электромагнитного поля следует, что распространение электрической энергии сопровождается изменением электрического и магнитного полей. Известно, что изменение магнитного поля в электрических схемах замещения устройств и элементов характеризуется индуктивным элементом; изменение электрического поля — емкостным; потери электрической энергии — резистивным. Поэтому продольные параметры ЛЭП должны представлять собой совокупность всех трех элементов: резистивного, индуктивного и емкостного.

На промышленной частоте приращение энергии электрического поля в проводах ЛЭП значительно меньше, чем приращение энергии магнитного поля и потери энергии в этих проводах. Поэтому присутствие емкостного элемента в схемах замещения проводов ЛЭП, то есть в продольных параметрах линий электропередач, обычно игнорировалось.

Но при анализе распределения по участкам ЭЭС электрической энергии неидеального качества, когда в спектрах напряжений и токов присутствуют их гармонические составляющие, частоты изменения которых отличны от промышленной частоты, игнорирование присутствия емкостного элемента ЛЭП вносит существенные погрешности.

Поперечные параметры ЛЭП, как уже отмечалось, характеризуют электромагнитную связь между проводами линии электропередач и поверхностью земли или заземленными конструктивными элементами.

Между проводами ЛЭП, по которым передается электрическая энергия, и поверхностью земли существует электрическое поле, о чем обычно свидетельствует разность потенциалов между указанными объектами. Этот факт в электрических схемах замещения ЛЭП обычно иллюстрируется емко-

стой проводимостью, то есть емкостным элементом, входящим в состав поперечных параметров ЛЭП.

Ионизация пространства, окружающего провода ЛЭП, в электрических схемах замещения иллюстрируется активной проводимостью электрической энергии к поверхности земли, то есть резистивным элементом соответствующих поперечных параметров. Резистивный элемент здесь иллюстрирует не только процесс ионизации окружающего провода ЛЭП пространства, но и перенос на поверхность земли элементарных носителей электрической энергии, например, электронов.

Известно, что Земля обладает мощным магнитным полем, ЛЭП также являются его источником.

Процессы образования магнитного поля на электрических схемах замещения иллюстрируются индуктивными элементами. Если несколько индуктивных элементов имеют пересекающиеся магнитные поля, то говорят, что эти элементы магнитно-связанные. Такую магнитную связь обычно иллюстрируют взаимной индуктивностью M_0 .

Следовательно, такая связь должна существовать между проводом ЛЭП и поверхностью земли. И она, безусловно, существует. Но количественно ее определить чрезвычайно сложно в виду ее малости и явной несоразмерности магнитного поля земли и магнитного поля вокруг проводов ЛЭП.

Кроме того, если принять, что структура грунта под ЛЭП однородна и степень распространения индуцированного электромагнитного поля по всему грунту равновелика, то его результирующий поток окажется равным нулю. Поэтому такой параметр, как взаимная индуктивность M_0 , уместно учитывать лишь в многопроводных системах [3].

Судя по изложенному, электрическая расчетная схема замещения элементарного участка однородной линии электропередач однопроводного исполнения на частоте n -й гармонической составляющей может выглядеть так, как представлено на рисунке 5.

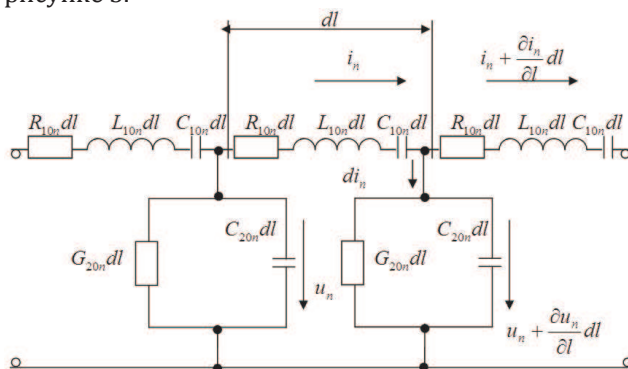


Рис. 1.5. Электрическая расчетная схема замещения элементарного участка однородной линии электропередач однопроводного исполнения на частоте n -й гармонической составляющей.

R_{10n} , L_{10n} и C_{10n} в приведенной схеме — гонные (удельные) величины, представляющие собой активное сопротивление, индуктивность и емкость линии соответственно, замещающие ее про-

дольные параметры на частоте n -й гармонической составляющей; G_{20n} и C_{20n} — погонные величины, представляющие собой активную проводимость и емкость этой же линии, замещающие ее поперечные параметры на частоте n -й гармонической составляющей.

Необходимо отметить, что поскольку речь идет об однородной линии электропередачи, одноименные параметры ее схемы замещения для каждого элементарного участка dl одинаковы.

Поскольку ЛЭП принята, как уже отмечалось, за линейную среду, то при анализе распределения по ней ЭЭ пониженного качества уместно использовать принцип суперпозиций.

Наиболее распространенные методы анализа распределения ЭЭ по многофазным ЛЭП предполагают рассмотрение процесса распределения электрической энергии по одному из линейных проводов с последующим распространением такого рассмотрения на все токоведущие части ЛЭП. Процедура анализа распределения ЭЭ при этом существенно упрощается. Для ее реализации достаточен анализ однофазной схемы замещения. Основным условием правомочности такого подхода является соблюдение абсолютной симметрии токов и напряжений.

К сожалению, в современных ЭЭС даже относительная симметрия напряжений и токов весьма сомнительна. Тем более, когда речь идет об электрической энергии пониженного качества. Поэтому при анализе распределения ЭЭ пониженного качества по ЛЭП необходимо пользоваться полнофазной схемой замещения с учетом всех электромагнитных связей, включая взаимную индуктивность, между конструктивными элементами линии электропередачи. При симметрии напряжений и токов необходимости в учете таких связей нет.

Таким образом, анализ распределения ЭЭ по ЛЭП предлагается выполнять для каждой составляющей спектров напряжения и тока, а в результате этого анализа обобщить применительно ко всему спектру основных характеристик электрической энергии.

Соответственно, электрическая схема замеще-

ния ЛЭП и математические модели распределения по ним ЭЭ надлежит составлять для каждой составляющей спектров напряжения и тока.

Выводы

1. Электрическая энергия пониженного качества отличается заметными по величине уровнями несинусоидальности, несимметрии, отклонения и колебания напряжений и токов. Такая энергия транспортируется по большинству участков современных ЭЭС.

2. Линия электропередачи принимается за линию с распределенными параметрами.

Для математического моделирования используется полнофазная схема замещения ЛЭП с учетом всех электромагнитных связей между конструктивными элементами линии электропередачи.

Продольные параметры схемы замещения ЛЭП иллюстрируются резистивными, индуктивными и емкостными элементами.

Поперечные параметры схемы замещения ЛЭП иллюстрируются резистивными, емкостными и магнитными связями.

Литература

1. Физический энциклопедический словарь : в 5 т / гл. ред. Б. А. Введенский, Б. М. Вул. — М. : Советская энциклопедия, 1966. — Т. 5. — 576 с.
2. Большанин, Г. А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем : моногр. : [в 2 кн.] / Г. А. Большанин. — Братск : БрГУ, 2006.
3. Способ количественной оценки субгармонической и дробных высших гармонических периодически изменяемых величин : пат. 2122186, Рос. Федерация : МКИ 6 G 01 J 3/28 / Большанин Г. А., Охлопков И. Н., Видерников С. В., Безносос Е. А., Манахов А. В., Зимарев С. А., Алферов М. А.; заявитель Брат. индустр. ин-т. — № 96112228/25; заявл. 14.06.96; опубл. 20.11.98, Бюл. № 32. — 4 с.
4. Буняк, А. М. Использование дискретного преобразования Фурье для определения параметров качества электроэнергии вычислительными устройствами / А. М. Буняк // Изв. высших. учеб. заведений. Энергетика. — 1982. — № 6. — С. 7-12.
5. Арриллага, Дж. Гармоники в электрических системах : пер. с англ. / Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.