

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Изложены алгоритмы определения постоянных распространения волн электромагнитного поля и волновых сопротивлений трехфазной воздушной линии электропередачи четырехпроводного исполнения в условиях пониженного качества электрической энергии с использованием пакета прикладных программ «Matlab».

Ключевые слова: линия электропередачи, электрическая энергия пониженного качества, продольные и поперечные параметры, волновое сопротивление, постоянная распространения электромагнитной волны.

Линии электропередачи участвуют в передаче электрической энергии (ЭЭ) на различные расстояния. Протяженные линии чаще всего выполняются воздушными. Протяженность воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) редко превышает 200-300 км. Вдоль таких линий ЭЭ распределяется практически по линейному закону. Поэтому при анализе распределения ЭЭ такие ВЛЭП принимаются за линии с распределенными параметрами.

На более протяженных ВЛЭП линейность распределения электрической энергии нарушается. Такие ВЛЭП следует принимать за линии с распределенными параметрами.

Отличительная черта ЭЭ, распределяемой по участкам современных электроэнергетических систем, – низкое качество. Нарушены нормативные величины многих показателей качества электрической энергии. И в первую очередь, коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения. В спектральном составе напряжений и токов отмечается большое количество высокочастотных составляющих. При анализе передачи такой энергии ВЛЭП даже сравнительно небольшой протяженности следует принимать за линии с распределенными параметрами [1, 2]. При этом необходимо иметь сведения о вторичных параметрах линии электропередачи, а именно: о постоянных распространения волны электромагнитного поля и о волновых сопротивлениях. Их определение может быть исполнено на основании оптимизации математической модели ВЛЭП.

Нарушение симметрии напряжений и токов в современных электроэнергетических системах обуславливает необходимость математического моделирования ВЛЭП на основании анализа ее полнофазной схемы замещения. Здесь необходимо учитывать все возможные электромагнитные

связи между линейными проводниками, а также между линейными проводниками и заземленными конструкциями ВЛЭП. Магнитная связь индуктивных элементов здесь иллюстрируется взаимной индуктивностью. То есть электрическая схема замещения ВЛЭП представляет собой совокупность резистивных, индуктивных и емкостных элементов (рис. 1). Она включает в свой состав один нейтральный и три линейных проводника со всеми электромагнитными связями и выглядит сравнительно громоздко [3]. Использование разработанной авторами в среде «Matlab» программы FOUR-WIRE значительно упрощает расчеты [4, 5, 6]

В первую очередь определяются продольные активное R и индуктивное сопротивления каждого линейного проводника на частоте n -ой гармонической составляющей. Полное продольное сопротивление фазных проводов находится по формулам типа:

$$\underline{Z}_{0An} = R_{0An} + j\nu\omega L_{0An},$$

где n – номер гармоники, ω – циклическая частота основной гармоники, j – мнимая единица.

Поперечные параметры линейных и фазных проводов определяются по формулам типа:

$$\underline{Y}_{0A0n} = G_{0A0n} + jn\omega C_{0A0n},$$

где G_{0A0n} – погонная активная проводимость между проводом и землей, C_{0A0n} – погонная емкость между проводом и землей.

Взаимные индуктивные сопротивления между проводами следует определять по формулам типа:

$$\underline{Z}_{0ABn} = jn\omega M_{0ABn},$$

где M_{0ABn} – погонная взаимная индуктивность между проводами A и B .

* - автор, с которым следует вести переписку.

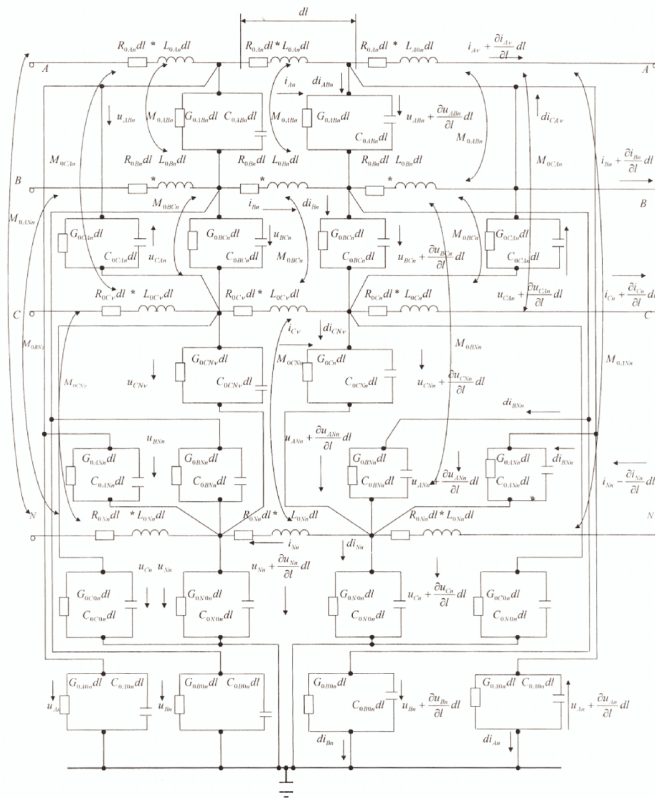


Рис. 1. Расчетная электрическая схема замещения элементарного участка однородной трехфазной четырехпроводной ЛЭП с изолированным нейтральным проводом на частоте n -ой гармонической составляющей.

Математическая модель распределения электрической энергии пониженного качества по однородному участку трехфазной ВЛЭП четырехпроводного исполнения представляет собой систему из дифференциальных однородных уравнений 2-го порядка:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{An}}{dl^2} - [Z_{0An}(Y_{0A0n} + Y_{0ABn} + Y_{0CAn} + Y_{0ANn}) - \\ - Z_{0ABn}Y_{0ABn} - Z_{0CAn}Y_{0CAn} + Z_{0ANn}Y_{0ANn}] \dot{U}_{An} - \\ - [Z_{0ABn}(Y_{0B0n} + Y_{0BCn} + Y_{0ABn} + Y_{0BNn}) - \\ - Z_{0An}Y_{0ABn} - Z_{0CAn}Y_{0BCn} + Z_{0ANn}Y_{0BNn}] \dot{U}_{Bn} - \\ - [Z_{0CAn}(Y_{0C0n} + Y_{0CAn} + Y_{0BCn} + Y_{0CNn}) - \\ - Z_{0An}Y_{0CAn} - Z_{0ABn}Y_{0BCn} + Z_{0ANn}Y_{0CNn}] \dot{U}_{Cn} + \\ + [Z_{0ANn}(Y_{0N0n} + Y_{0ANn} + Y_{0BNn} + Y_{0CNn}) + \\ + Z_{0An}Y_{0ANn} + Z_{0ABn}Y_{0BNn} + Z_{0CAn}Y_{0CNn}] \dot{U}_{Nn} = 0; \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{Bn}}{dl^2} - [Z_{0Bn}(Y_{0B0n} + Y_{0BCn} + Y_{0ABn} + Y_{0BNn}) - \\ - Z_{0ABn}Y_{0ABn} - Z_{0BCn}Y_{0BCn} + Z_{0BNn}Y_{0BNn}] \dot{U}_{Bn} - \\ - [Z_{0ABn}(Y_{0A0n} + Y_{0ABn} + Y_{0CAn} + Y_{0ANn}) - \\ - Z_{0Bn}Y_{0ABn} - Z_{0BCn}Y_{0CAn} + Z_{0BNn}Y_{0ANn}] \dot{U}_{An} - \\ - [Z_{0BCn}(Y_{0C0n} + Y_{0CAn} + Y_{0BCn} + Y_{0CNn}) - \\ - Z_{0Bn}Y_{0BCn} - Z_{0ABn}Y_{0CAn} + Z_{0BNn}Y_{0CNn}] \dot{U}_{Cn} + \\ + [Z_{0BNn}(Y_{0N0n} + Y_{0ANn} + Y_{0BNn} + Y_{0CNn}) + \\ + Z_{0Bn}Y_{0BNn} + Z_{0ABn}Y_{0ANn} + Z_{0BCn}Y_{0CNn}] \dot{U}_{Nn} = 0; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -Z_{0Bn}Y_{0BCn} - Z_{0ABn}Y_{0CAn} + Z_{0BNn}Y_{0CNn}] \dot{U}_{Cn} + \\ + [Z_{0BNn}(Y_{0N0n} + Y_{0ANn} + Y_{0BNn} + Y_{0CNn}) + \\ + Z_{0Bn}Y_{0BNn} + Z_{0ABn}Y_{0ANn} + Z_{0BCn}Y_{0CNn}] \dot{U}_{Nn} = 0; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{Cn}}{dl^2} - [Z_{0Cn}(Y_{0C0n} + Y_{0CAn} + Y_{0BCn} + Y_{0CNn}) - \\ - Z_{0CAn}Y_{0CAn} - Z_{0BCn}Y_{0BCn} + Z_{0CNn}Y_{0CNn}] \dot{U}_{Cn} - \\ - [Z_{0CAn}(Y_{0A0n} + Y_{0ABn} + Y_{0CAn} + Y_{0ANn}) - \\ - Z_{0Cn}Y_{0CAn} - Z_{0BCn}Y_{0ABn} + Z_{0CNn}Y_{0ANn}] \dot{U}_{An} - \\ - [Z_{0BCn}(Y_{0B0n} + Y_{0BCn} + Y_{0ABn} + Y_{0BNn}) - \\ - Z_{0Cn}Y_{0BCn} - Z_{0CAn}Y_{0ABn} + Z_{0CNn}Y_{0BNn}] \dot{U}_{Bn} + \\ + [Z_{0CNn}(Y_{0N0n} + Y_{0ANn} + Y_{0BNn} + Y_{0CNn}) + \\ + Z_{0Cn}Y_{0CNn} + Z_{0CAn}Y_{0ANn} + Z_{0BCn}Y_{0BNn}] \dot{U}_{Nn} = 0; \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{Nn}}{dl^2} - [Z_{0ANn}(Y_{0A0n} + Y_{0ABn} + Y_{0CAn} + Y_{0ANn}) + \\ + Z_{0Nn}Y_{0ANn} - Z_{0BNn}Y_{0ABn} - Z_{0CNn}Y_{0CAn}] \dot{U}_{An} - \\ - [Z_{0BNn}(Y_{0B0n} + Y_{0BCn} + Y_{0ABn} + Y_{0BNn}) + \\ + Z_{0Nn}Y_{0BNn} - Z_{0ANn}Y_{0ABn} - Z_{0CNn}Y_{0BCn}] \dot{U}_{Bn} - \\ - [Z_{0CNn}(Y_{0C0n} + Y_{0CAn} + Y_{0BCn} + Y_{0CNn}) + \\ + Z_{0Nn}Y_{0CNn} - Z_{0ANn}Y_{0CAn} - Z_{0BNn}Y_{0BCn}] \dot{U}_{Cn} + \\ + [Z_{0Nn}(Y_{0N0n} + Y_{0ANn} + Y_{0BNn} + Y_{0CNn}) + \\ + Z_{0Nn}Y_{0Nn} - Z_{0ANn}Y_{0ANn} - Z_{0BNn}Y_{0BNn} - Z_{0CNn}Y_{0CNn}] \dot{U}_{Nn} = 0; \end{aligned}$$

$$+Z_{0An}Y_{0An} + Z_{0Bn}Y_{0Bn} + Z_{0Cn}Y_{0Cn} \dot{U}_{Nn} = 0, \quad (4)$$

где \dot{U}_{An} , \dot{U}_{Bn} , \dot{U}_{Cn} – фазные напряжения на частоте n -ой гармонической составляющей, l – протяженность участка ВЛЭП; элементы в квадратных скобках представляют продольные и поперечные параметры ВЛЭП.

Систему уравнений (1) – (4) можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_{An}}{dl^2} - a1 \dot{U}_{An} + a12 \dot{U}_{Bn} + a13 \dot{U}_{Cn} + a14 \dot{U}_{Nn} &= 0, \\ a21 \dot{U}_{An} + \frac{d^2 \dot{U}_{Bn}}{dl^2} - a22 \dot{U}_{Bn} + a23 \dot{U}_{Cn} + a24 \dot{U}_{Nn} &= 0, \\ a31 \dot{U}_{An} + a32 \dot{U}_{Bn} + \frac{d^2 \dot{U}_{Cn}}{dl^2} - a33 \dot{U}_{Cn} + a34 \dot{U}_{Nn} &= 0, \\ a41 \dot{U}_{An} + a42 \dot{U}_{Bn} + a43 \dot{U}_{Cn} + \frac{d^2 \dot{U}_{Nn}}{dl^2} - a44 \dot{U}_{Nn} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $a11$, $a12$, $a13$, $a14$, $a21$, $a22$, $a23$, $a24$, $a31$, $a32$, $a33$, $a34$, $a41$, $a42$, $a43$ и $a44$ – коэффициенты, представляющие собой совокупность продольных и поперечных параметров ВЛЭП.

Символьные обозначения фазных напряжений можно упростить, используя промежуточную переменную y :

$$\dot{U}_{An} = y_1, \dot{U}_{Bn} = y_2, \dot{U}_{Cn} = y_3, \dot{U}_{Nn} = y_4. \quad (6)$$

Из курса математики известно [7], что общее решение однородных дифференциальных уравнений имеет вид:

$$y = A \cdot e^{pt}, \quad (7)$$

где A – постоянная интегрирования, p – коэффициент затухания электромагнитной волны.

Тогда первая производная промежуточной переменной y по переменной времени t примет вид:

$$y' = (Ae^{pt})' = pAe^{pt} = py. \quad (8)$$

Вторая производная промежуточной переменной y по переменной времени t :

$$\begin{aligned} y'' &= (Ae^{pt})'' = (pAe^{pt})' = \\ &= Ae^{pt} + p^2 Ae^{pt} = y + p^2 y. \end{aligned} \quad (9)$$

Система уравнений (5) с учетом равенств (6) – (9) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} (p^2 + 1 - a11)y_1 + a12y_2 + a13y_3 + a14y_4 &= 0, \\ a21y_1 + (p^2 + 1 - a22)y_2 + a23y_3 + a24y_4 &= 0, \\ a31y_1 + a32y_2 + (p^2 + 1 - a33)y_3 + a34y_4 &= 0, \\ a41y_1 + a42y_2 + a43y_3 + (p^2 + 1 - a44)y_4 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Коэффициенты $a11$, $a12$, $a13$, $a14$, $a21$, $a22$, $a23$, $a24$, $a31$, $a32$, $a33$, $a34$, $a41$, $a42$, $a43$, $a44$ и переменную p в системе «Matlab» следует

задать в символьном виде, используя оператор *syms*.

Матрица, описывающая систему (10), в этой операционной системе имеет вид:

$$\gg A = [p^2 + 1 - a11 \quad a12 \quad a13 \quad a14; a21 \quad p^2 + 1 - a22 \quad a23 \quad a24; a31 \quad a32 \quad p^2 + 1 - a33 \quad a34; a41 \quad a42 \quad a43 \quad p^2 + 1 - a44].$$

Ее детерминант вычисляется при помощи оператора $\gg f = \det(A)$.

Упрощаем полученное выражение, приводя подобные:

$$\gg q = \text{collect}(f, 'p');$$

После сортировки

$$\gg s = \text{sort}(q)$$

получается характеристическое уравнение системы (10) типа:

$$p^8 + ap^6 + bp^4 + cp^2 + d = 0. \quad (11)$$

Падающая и отраженная волны каждой пары волн электрической энергии в каждом линейном проводе ВЛЭП распространяются с одинаковой фазовой скоростью, с одним и тем же затуханием. Величины постоянных распространения каждой пары электромагнитных волн определяются как корни характеристического уравнения (11).

Задача электрической энергии по однородному участку трехфазной ЛЭП четырехпроводного исполнения на частоте каждой гармонической составляющей обеспечивается четырьмя парами электромагнитных волн: падающими и отраженными.

На транспортировку электрической энергии по каждому проводу оказывают влияние и соседние провода. Это неизбежно при наличии заметных и разновеликих электромагнитных связей между токоведущими частями ВЛЭП.

Распространение каждой пары электромагнитных волн в каждом проводе ВЛЭП на каждой частоте гармонической составляющей характеризуется волновым сопротивлением. При анализе передачи ЭЭ каждой гармонической составляющей следует учитывать четыре собственных и двенадцать взаимных волновых сопротивлений [1].

Алгоритм определения собственных и взаимных волновых сопротивлений изложен в [1]. В системе «Matlab» можно определить вторичные параметры ЛЭП, используя разработанную авторами программу FOUR-WIRE [5].

Ввод первичных параметров ЛЭП производится в файле Dan.m в виде элементов глобальных матриц D , $D1$, $D2$.

Погонные активные сопротивления линейных проводов: $R_{0A} = 0,33$ Ом/км; $R_{0B} = 0,332$ Ом/км; $R_{0C} = 0,327$ Ом/км, $R_{0N} = 0,4$ Ом/км.

Погонные собственные индуктивности проводов: $L_{0A} = 0,001$ Гн/км; $L_{0B} = 0,001$ Гн/км; $L_{0C} = 0,0011$ Гн/км, $L_{0N} = 0,00011$ Гн/км.

Погонные взаимные индуктивности между линейными проводами: $M_{0AB} = 0,0005$ Гн/км; $M_{0BC} = 0,001$ Гн/км; $M_{0CA} = 0,008$ Гн/км, $M_{0AN} = 0,0002$ Гн/км; $M_{0BN} = 0,0005$ Гн/км; $M_{0CN} = 0,0007$ Гн/км.

Величины погонных емкостей между линейными проводами: $C_{0AB} = 10^{-11}$ Ф/км; $C_{0BC} = 9 \cdot 10^{-12}$ Ф/км; $C_{0CA} = 11 \cdot 10^{-12}$ Ф/км, $C_{0AN} = 4 \cdot 10^{-13}$ Ф/км; $C_{0BN} = 5 \cdot 10^{-13}$ Ф/км; $C_{0CN} = 8 \cdot 10^{-13}$ Ф/км.

Величины погонных емкостей между линейными проводами и заземленными конструкциями линии: $C_{0A0} = 10^{-11}$ Ф/км; $C_{0B0} = 9,5 \cdot 10^{-12}$ Ф/км; $C_{0C0} = 10,5 \cdot 10^{-12}$ Ф/км, $C_{0N0} = 3 \cdot 10^{-12}$ Ф/км.

При заданных первичных параметрах линии определяем вторичные. Для этого сначала вызывается файл исходных данных

```
>> Dan;
задаются протяженность линии и номер гармоника
>> l=1:1000;
>> n=15;
задается функция
>> ZA1 = Asopr4Al(n).
```

Затем определяется собственное волновое сопротивление, например, фазы А для 1-й пары электромагнитных волн в трехфазной четырехпроводной ЛЭП:

```
>> ZA1=(delta4(n))./(Apost4A(n)).*((prodol4B(n)).*(prodol4C(n)).*(prodol4N(n))-...
(prodol4B(n)).*(bindung4CN(n)).^2-...
(prodol4N(n)).*(bindung4BC(n)).^2+...
2*(bindung4BC(n)).*(bindung4BN(n)).*(bindung4CN(n))-...
(prodol4C(n)).*(bindung4BN(n)).^2),
```

где $\delta4(n)$ – расчетный коэффициент для трехфазной четырехпроводной ЛЭП, зависящий от первоначальных параметров ЛЭП; $Apost4A(n)$ – постоянная распространения 1-й пары электромагнитной волны; $prodol4B$, $prodol4C$, $prodol4N$ – продольные параметры соответственно фаз B , C и N ; $bindung4BC(n)$, $bindung4BN(n)$ – взаимная индукция, соответственно, между проводами $B - C$ и $B - N$.

Получаем комплексную величину:

```
ZA1 = 7.4324e+003 + 3.8605e+003i.
```

Здесь же можем определить постоянную распространения 1-й пары электромагнитных волн:

```
>> yA1=Apost4A(n)
yA1 = -0.0150 + 0.9745i.
```

Аналогично определяются и взаимные волновые сопротивления, например, между фазой B и

нейтральным проводом N для 3-й пары электромагнитных волн:

```
>> ZBN3=Asopr4BN3(n);
ZBN3 = -2.3262e+007 -1.5443e+006i.
```

Подобным образом при известных первичных параметрах анализируемой ЛЭП появляется возможность определить ее вторичные параметры и другие характеристики электрической энергии [1, 2, 5].

Вывод. Использование пакета программ, созданных на основе системы «Matlab», позволяет определять вторичные параметры ВЛЭП, а именно: величины постоянных распространения волн электромагнитного поля и волновых сопротивлений.

Литература

1. Большанин Г. А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем: монография. В 2 кн. Братск: Брат. ун-т. 2006. Кн. 2. 807 с.
2. Большанин Г. А. Большанина Л. Ю. Особенности распространения электромагнитного поля по линиям электропередачи в условиях пониженного качества электрической энергии. Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С.56-59
3. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Распределение электрической энергии пониженного качества по однородному участку линии электропередачи четырехпроводного исполнения. Электро. 2008. № 4. С. 17-20.
4. Большанин Г.А., Марьясова Е.Г. Расчет параметров электрической энергии в трехфазной линии электропередачи четырехпроводного исполнения в операционной системе «Matlab»// Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: материалы IX (XXXI) Всерос. науч.-техн. конф. Братск, 2010. С. 84.
5. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Применение операционной системы «MATLAB» для расчета параметров электрической энергии трехфазной линии электропередачи четырехпроводного исполнения // Труды/ Брат. гос. ун-та: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2010. Т.2. С 73-79.
6. Расчет параметров трехфазной четырехпроводной линии электропередачи (FOUR-WIRE v. 1.00) (Программа для ЭВМ) / Л. Ю. Большанина, Г. А. Большанин, Е.Г. Марьясова. Св. ГР. № 2010615868; зарег. в реестре программ 08.09.2010.
7. Корн Г., Крон Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1973. 832 с.