

УДК 621.315.1

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ НЕОДНОРОДНОЙ МНОГОЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ РАСЧЕТОВ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ

Е.М. Шишков, Л.И. Шишкова

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Предлагается обобщенная модель структурно неоднородной многоцепной воздушной линии электропередачи. Рассмотрены возможные типы неоднородностей в структуре линии. Предложен способ учета неоднородностей при практических расчетах установившихся режимов. Для этого предлагается искусственное разделение линии на однородные участки дополнительными узлами. Предложен способ формирования однолинейных схем замещения линий на основе схем в фазных координатах. Приведены выражения для вычисления параметров схем замещения. Рассмотрена возможность использования разработанных схем замещения для решения задачи разделения потерь между цепями многоцепной воздушной линии. На основе уравнения состояния линии выведены выражения для вычисления потерь активной мощности в каждой цепи, а также потерь в грозозащитных тросах.

Ключевые слова: многоцепная воздушная линия, фазные координаты, установившийся режим, однолинейная схема замещения.

В условиях жестких территориальных ограничений на развитие электрических сетей в целом ряде случаев экономически целесообразно применение комбинированных многоцепных воздушных линий электропередачи (МВЛ). На их опорах размещаются две и более трехфазные воздушные линии (ВЛ) разных номинальных напряжений, что определяет принципиальную особенность конструкции МВЛ – совмещение на отдельных ее участках в единой конструкции ВЛ большой электрической мощности высокого и сверхвысокого напряжения и ВЛ распределительной сети. Такие ВЛ могут сооружаться и при реконструкции существующих сетей, предполагающей сооружение МВЛ в трассах существующих одноцепных ВЛ [1]. Это является логическим развитием схем глубокого ввода, сокращает расходы на сооружение понизительных подстанций (ПС), позволяет значительно уменьшить площади, отчуждаемые под трассы ВЛ и территории ПС, снизить уровни напряженностей электромагнитного поля вблизи ВЛ, что особенно важно в условиях густонаселенных районов современных мегаполисов [2].

Установившиеся режимы структурно однородных МВЛ наиболее достоверно моделируются в фазных координатах [3]. Однако специфика многоцепных линий практически исключает существование единой совокупности цепей, следующих от узла начала к узлу конца на одних и тех же опорах. Рассмотрим возможные типы структурных неоднородностей в схеме МВЛ.

Евгений Михайлович Шишков (к.т.н.), старший преподаватель кафедры «Электрические станции».

Лариса Ивановна Шишкова, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

На рис. 1 представлена обобщенная схема подключения комбинированной МВЛ с числом цепей различной длины l_i , равным m . Узлы начал i_H и концов i_K каждой i -й цепи одного номинального напряжения могут быть подключены к разным и общим шинам, т. е. электрически соединяться. К каждому из узлов i_H и i_K могут подключены обобщенный источник питания S_i напряжением U_i и обобщенная нагрузка $S_{нагi}$, а следовательно, потоки мощности в цепях МВЛ могут быть направлены как встречно, так и согласно. Кроме того, на каждой из цепей МВЛ могут иметься одна или несколько транзитных подстанций с нагрузками $S_{нагiT}$, а цепи одного класса напряжения могут быть объединены отпайками отбора мощности $S_{наг(i-1)(i)O}$. Поскольку длина каждой цепи представленной на рис. 1 МВЛ различна и определяется географическим положением потребителей, то на разных участках своей трассы количество цепей, объединенных на опорах МВЛ, может быть различным.

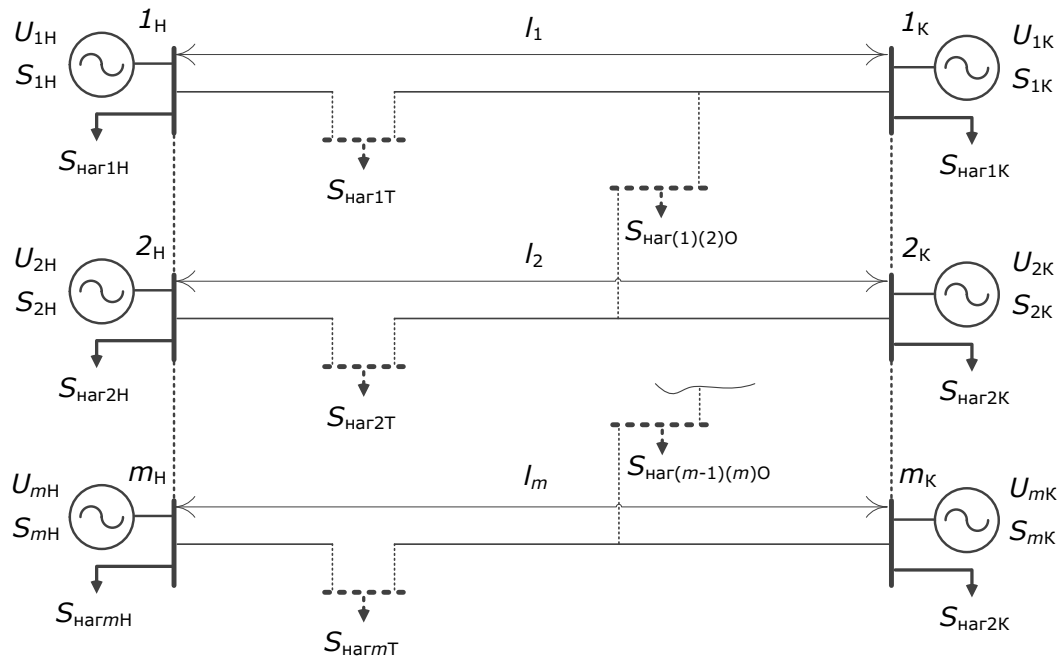


Рис. 1. Обобщенная схема МВЛ

Таким образом, для расчета режима реальной неоднородной линии необходимо искусственное разделение такой линии на однородные участки с помощью вводимых в схему обобщенных фиктивных узлов, характеризующих различные виды неоднородностей в схемной структуре линии.

В структуре МВЛ возможны следующие виды неоднородностей.

1. Окончание одной или нескольких цепей МВЛ. Данный вид неоднородности может возникнуть в случае, если цепи МВЛ имеют различную длину, что чаще всего обусловлено различной величиной номинальных напряжений цепей.

2. Отпайка от двух или нескольких цепей МВЛ одного напряжения. Подразумевает наличие на линии отпаечных опор с отпайками на тупиковые подстанции.

3. Наличие на одной из цепей МВЛ транзитной подстанции. Возникает в случае, если с одной из цепей МВЛ осуществляется непосредственный отбор мощности.

Возникающие структурные неоднородности МВЛ могут быть учтены в расчетном процессе путем представляющих собой коммутационные обобщенные четырехполюсники, осуществляющие соединения моделей однородных участков линии. Расчет режима в общем случае ведется в Y -форме и форме обобщенного четырехполюсника по известным методикам [3, 4]. Расчетная схема при этом модифицируется в соответствии с известными из теории четырехполюсников выражениями, характеризующими каскадное, последовательное и параллельное соединения четырехполюсников.

В настоящее время в абсолютном большинстве программных средств, применяемых в расчетах электросетевыми предприятиями, используются методы анализа стационарных режимов электрических сетей, которые основаны на однопроводном представлении трехфазных цепей. Это обстоятельство ведет к необходимости решения задачи адаптации изложенных в предыдущих параграфах многопроводных математических моделей, учитывающих взаимные связи цепей МВЛ, к используемым в промышленности программным продуктам, основанным на однопроводных моделях воздушных линий и их установившихся режимов [5].

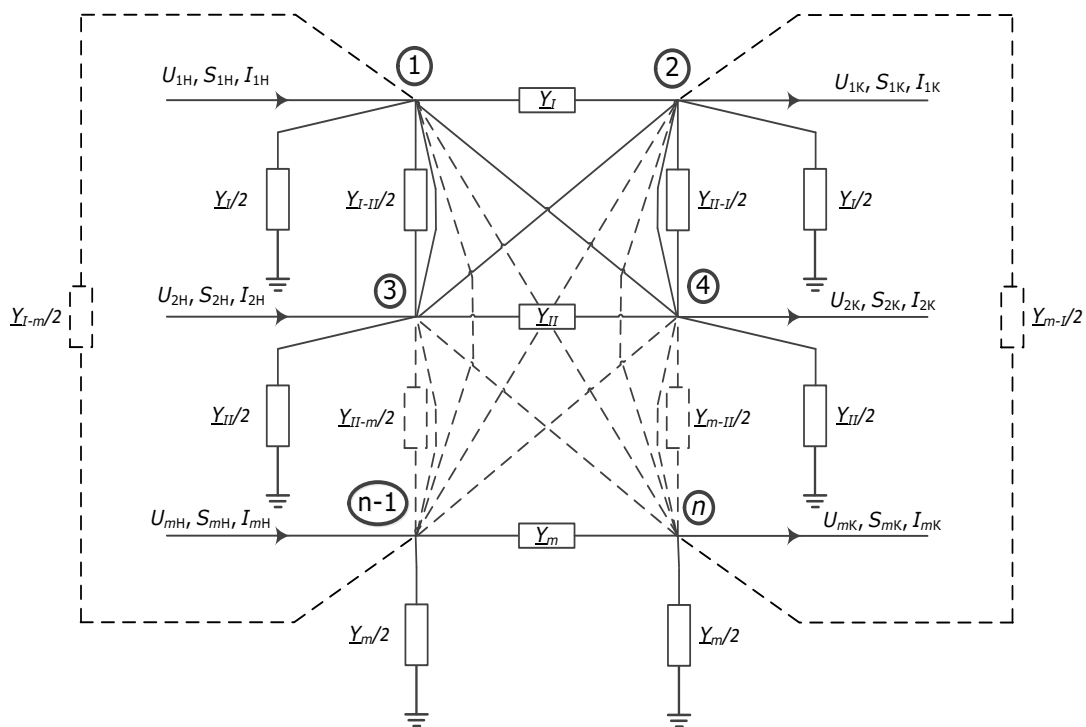


Рис. 2. Однолинейная схема МВЛ с продольной частью, представленной в Y -форме

С этой целью предлагается обобщить с учетом специфики m -цепных ВЛ методики, сформированные в [6] для двухцепных ВЛ. Результатом этого обобщения является однолинейная Π -образная схема замещения ВЛ, представленная на рис. 2. На данном рисунке сплошными и пунктирными линиями показаны эквивалентные взаимные активно-индуктивные проводимости узлов $1..n$. Здесь $Y_{i,j}/2$ –

половина поперечной взаимной емкостной проводимости i -й и j -й цепей; U_{iH} , U_{iK} – напряжения узла начала и узла конца i -й цепи; S_{iH} , S_{iK} – поток мощности вблизи узла начала и узла конца i -й цепи; I_{iH} , I_{iK} – токи вблизи узла начала и узла конца i -й цепи; $\underline{Y}_i$ – продольная активно-индуктивная проводимость i -й цепи; $\underline{Y}_i/2$ – половина поперечной собственной емкостной проводимости i -й цепи.

При этом параметры схемы замещения – собственные и взаимные проводимости цепей – определяются по выражениям

$$\begin{aligned}\underline{Y}_i &= \left[(\underline{Y}_{AiAi} + a^2 \underline{Y}_{AiBi} + a \underline{Y}_{AiCi}) + (a \underline{Y}_{BiAi} + \underline{Y}_{BiBi} + a^2 \underline{Y}_{BiCi}) + (a^2 \underline{Y}_{CiAi} + a \underline{Y}_{CiBi} + \underline{Y}_{CiCi}) \right] / 3; \\ \underline{Y}_{i-j} &= \left[(\underline{Y}_{AiAj} + a^2 \underline{Y}_{AiBj} + a \underline{Y}_{AiCj}) + (a \underline{Y}_{BiAj} + \underline{Y}_{BiBj} + a^2 \underline{Y}_{BiCj}) + (a^2 \underline{Y}_{CiA2} + a \underline{Y}_{CiBj} + \underline{Y}_{CiCj}) \right] / 3,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\underline{Y}_{AiAi}$, $\underline{Y}_{BiBi}$, $\underline{Y}_{CiCi}$ – собственные проводимости фаз A , B и C i -й цепи;
 $\underline{Y}_{AiBi}$, $\underline{Y}_{AiCi}$, $\underline{Y}_{BiAi}$, $\underline{Y}_{BiCi}$, $\underline{Y}_{CiAi}$, $\underline{Y}_{CiBi}$ – взаимные проводимости фаз в i -й цепи;
 $\underline{Y}_{AiAj}$, $\underline{Y}_{AiBj}$, $\underline{Y}_{AiCj}$, $\underline{Y}_{BiAj}$, $\underline{Y}_{BiBj}$, $\underline{Y}_{BiCj}$, $\underline{Y}_{CiAj}$, $\underline{Y}_{CiBj}$, $\underline{Y}_{CiCj}$ – взаимные проводимости фаз i -й и j -й цепей;
 a – поворотный множитель, равный e^{j120° .

Одной из задач, для решения которой может быть применена предложенная выше схема, является разделение потерь электрической мощности в цепях МВЛ, которые могут быть вызваны протеканием тока как в самой рассматриваемой цепи, так и в соседней.

Предположим, что для m -цепного участка МВЛ с k грозозащитными тросами сформирована $(3m+k)$ -проводная n -узловая схема замещения в Y -форме. Предположим также, что параметры режима рассматриваемого участка МВЛ в виде векторов фазных токов и напряжений I_H и U_H в узлах начала участка с нечетными номерами $1 \dots n-1$, а также векторов фазных токов и напряжений I_K и U_K в узлах конца участка с четными номерами $2 \dots n$ известны из исходных данных и результатов предварительно произведенного расчета установившегося режима рассматриваемого участка МВЛ.

Запишем уравнение ее состояния для вектора токов I_Π ветвей и вектора падений напряжений ΔU в следующем виде:

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} I_{A1\Pi} \\ \vdots \\ I_{Cm\Pi} \\ I_{T1\Pi} \\ \vdots \\ I_{Tk\Pi} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \underline{Y}_{A1A1} & \dots & \underline{Y}_{A1Cm} & \underline{Y}_{A1T1} & \dots & \underline{Y}_{A1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{CmA1} & \dots & \underline{Y}_{CmCm} & \underline{Y}_{CmT1} & \dots & \underline{Y}_{CmTk} \\ \underline{Y}_{T1A1} & \dots & \underline{Y}_{T1Cm} & \underline{Y}_{T1T1} & \dots & \underline{Y}_{T1Tk} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{TkA1} & \dots & \underline{Y}_{TkCm} & \underline{Y}_{TkT1} & \dots & \underline{Y}_{TkTk} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK} \\ \dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K} \\ \vdots \\ \dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \underline{Y}_{A1A1} \cdot (\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K}) + \dots + \underline{Y}_{A1Cm} \cdot (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK}) + \underline{Y}_{A1T1} \cdot (\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K}) + \dots + \underline{Y}_{A1Tk} \cdot (\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK}) \\ \vdots \\ \underline{Y}_{CmA1} \cdot (\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K}) + \dots + \underline{Y}_{CmCm} \cdot (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK}) + \underline{Y}_{CmT1} \cdot (\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K}) + \dots + \underline{Y}_{CmTk} \cdot (\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK}) \\ \underline{Y}_{T1A1} \cdot (\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K}) + \dots + \underline{Y}_{T1Cm} \cdot (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK}) + \underline{Y}_{T1T1} \cdot (\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K}) + \dots + \underline{Y}_{T1Tk} \cdot (\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK}) \\ \vdots \\ \underline{Y}_{TkA1} \cdot (\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K}) + \dots + \underline{Y}_{TkCm} \cdot (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK}) + \underline{Y}_{TkT1} \cdot (\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K}) + \dots + \underline{Y}_{TkTk} \cdot (\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK}) \end{pmatrix}\end{aligned}$$

Сгруппировав элементы предыдущего выражения, соответствующие цепям участка МВЛ от 1 до m , сформируем m -мерный вектор потерь активной мощности $\Delta P = \text{Re} \left[\Delta \dot{U} \cdot I_\Pi^* \right]$:

$$\begin{pmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{Re} \left[(\dot{U}_{A1H} - \dot{U}_{A1K})^* I_{A1\Pi} + (\dot{U}_{B1H} - \dot{U}_{B1K})^* I_{B1\Pi} + (\dot{U}_{C1H} - \dot{U}_{C1K})^* I_{C1\Pi} \right] \\ \operatorname{Re} \left[(\dot{U}_{A2H} - \dot{U}_{A2K})^* I_{A2\Pi} + (\dot{U}_{B2H} - \dot{U}_{B2K})^* I_{B2\Pi} + (\dot{U}_{C2H} - \dot{U}_{C2K})^* I_{C2\Pi} \right] \\ \vdots \\ \operatorname{Re} \left[(\dot{U}_{AmH} - \dot{U}_{AmK})^* I_{Am\Pi} + (\dot{U}_{BmH} - \dot{U}_{BmK})^* I_{Bm\Pi} + (\dot{U}_{CmH} - \dot{U}_{CmK})^* I_{Cm\Pi} \right] \end{pmatrix}$$

Аналогичным образом сформируем вектор ΔP_T потерь в грозозащитных тросах:

$$\begin{pmatrix} \Delta P_{T1} \\ \Delta P_{T2} \\ \vdots \\ \Delta P_{Tk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \operatorname{Re} \left[(\dot{U}_{T1H} - \dot{U}_{T1K})^* I_{T1\Pi} \right] \\ \operatorname{Re} \left[(\dot{U}_{T2H} - \dot{U}_{T2K})^* I_{T2\Pi} \right] \\ \vdots \\ \operatorname{Re} \left[(\dot{U}_{TkH} - \dot{U}_{TkK})^* I_{Tk\Pi} \right] \end{pmatrix}$$

Таким образом, величины электрической мощности, теряемые при ее передаче по каждой из цепей рассматриваемого участка МВЛ, однозначно определяются по приведенным выше выражениям.

Выводы:

1. Описана обобщенная схема МВЛ с различными типами структурных неоднородностей. Предложен способ их учета в расчетах режимов путем введения в схему замещения сети дополнительных узлов.
2. Предложена эквивалентная однолинейная схема МВЛ, учитывающая несимметрию первичных параметров фаз и цепей.
3. Предложен способ разделения потерь между цепями МВЛ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костилов В.И., Семенко О.В. Идеология проектирования воздушных линий в стесненных условиях. Критерии применимости опор на МГС // Воздушные линии. – 2010. – № 1. – С. 3-13.
2. Кузнецов Д.В., Гольдштейн В.Г. Совершенствование концепции и методов организации энергообеспечения мегаполисов // Промышленная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 7-12.
3. Шишков Е.М. Анализ установившихся режимов многоцепных воздушных линий электропередачи // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2013. – № 3. – С. 47-52.
4. Ведерников А.С., Гайнуллин Р.А., Шишков Е.М. Применение теории обобщенных четырехполюсников для расчета установившихся режимов двухцепных воздушных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 5-6. – С. 86-90.
5. Гольдштейн В.Г., Ведерников А.С., Шишков Е.М., Шишков М.А. О необходимости совершенствования программного обеспечения анализа установившихся режимов электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 112-117.
6. Альмендеев А.А., Косорлуков И.А., Шишков Е.М. Математическая модель для расчета установившихся режимов двухцепных воздушных линий // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 2(24). – С. 212-214.

Статья поступила в редакцию 12 января 2015 г.

GENERALIZED MODEL OF HETEROGENEOUS MULTICIRCUIT OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES FOR STEADY STATES CALCULATION

E.M. Shishkov, L.I. Shishkova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

The paper proposes a generalized model of a structurally heterogeneous multicircuit overhead power transmission line. Possible types of heterogeneities in the structure of the line are discussed. A method for taking account of heterogeneities in practical steady states mode calculations is proposed. It is suggested that the line should be divided artificially to homogeneous sections with additional nodes. A method for forming single-line equivalent circuits on the basis of schemes in phase coordinates is proposed. Expressions for calculating the equivalent-circuit parameters are given. The possibility of using the designed equivalent circuits for solving the problem of the loss division between the circuits of a multicircuit overhead line is discussed. On the basis of the line state equation, expressions for the calculation of the active power losses in each circuit and the losses in ground wires are derived.

Keywords: multicircuit overhead line, phase coordinates, steady state, single-line equivalent circuit.