

Лекционные материалы

Дисциплина «Электроэнергетические системы и сети»

Разработаны доцентом кафедры «Электроэнергетические системы»
ВятГУ Вычегжаниным А.В.

Особенности расчета ДЛЭПСВН

- Характеристика ЛЭП сверхвысокого напряжения.
- Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима.
- Режим натуральной мощности.

Характеристика ЛЭП сверхвысокого напряжения

- Линии электропередачи номинальным напряжением **330-1150 кВ** имеют несколько различных названий. Их называют дальними линиями, линиями сверхвысокого напряжения, межсистемными линиями, системообразующими линиями. А в случаях, когда необходимо подчеркнуть условия регулирования параметров режима таких линий в процессе эксплуатации их называют **управляемыми линиями**.
- Для таких линий характерны большая протяженность (более **300-500 км**) и значительная передаваемая мощность (более **500 МВт**).

Основные характерные особенности ЛЭП СВН

1. При анализе режимов таких линий необходимо учитывать **распределенность параметров** вдоль длины линии.

Основные характерные особенности ЛЭП СВН

2. Волновой характер передачи мощности на расстояния, характерные для таких линий, предполагает **учет волновых свойств** самой линии.

Основные характерные особенности ЛЭП СВН

3. В процессе эксплуатации таких линий существуют задачи, связанные с необходимостью **повышения пропускной способности линий, регулированием параметров режима по напряжению и т.д.** Для решения таких задач необходимы специальные средства и аппараты, подключаемые к характерным точкам линии. Поэтому алгоритмы расчетов должны учитывать возможность введения в расчетные модели таких элементов.

Основные соотношения параметров режима ЛЭП СВН

Ток и напряжение в линии **непрерывно изменяются** по ее длине. Ток из-за наличия проводимости, а напряжение за счет падения напряжения в сопротивлениях линии.

Изменения напряжения и тока при **волновом характере передачи энергии по линии** описываются известными из курса ТОЭ уравнениями длинной линии.

При конечной длине линии соотношения между напряжениями \underline{U}_1 и \underline{U}_2 и токами \underline{I}_1 и \underline{I}_2 в начале и в конце линии:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot ch(\gamma_0 l) + \sqrt{3} \cdot \underline{I}_2 \cdot \underline{z}_C \cdot sh(\gamma_0 l) \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \cdot ch(\gamma_0 l) + \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \underline{z}_C} \underline{U}_2 \cdot sh(\gamma_0 l) \end{aligned} \right\}$$

Основные соотношения параметров режима ЛЭП СВН

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot ch(\gamma_0 l) + \sqrt{3} \cdot \underline{I}_2 \cdot \underline{z}_C \cdot sh(\gamma_0 l) \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \cdot ch(\gamma_0 l) + \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \underline{z}_C} \underline{U}_2 \cdot sh(\gamma_0 l) \end{aligned} \right\}$$

где l - длина линии электропередачи, км;

\underline{z}_C – волновое сопротивление линии, Ом;

γ_0 – коэффициент распространения, 1/км.

Основные соотношения параметров режима ЛЭП СВН

Волновое сопротивление в общем случае определяется по формуле:

$$\underline{z}_C = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} = \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{y}_0}}$$

Для идеализированной линии без потерь энергии (при $r_0=g_0=0$) волновое сопротивление определяется по формуле:

$$z_C = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

Основные соотношения параметров режима ЛЭП СВН

Коэффициент распространения $\underline{\gamma}_0$ определяется по выражению:

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{\underline{z}_0 \cdot \underline{y}_0} = \alpha_0 + j\beta_0$$

где α_0 – коэффициент затухания амплитуды волны напряжения или тока, 1/км;

β_0 – коэффициент фазы волны напряжения или тока, град/км.

Значения указанных выше коэффициентов при частоте **50 Гц** и традиционном исполнении линии находятся в диапазоне:

$$\alpha_0 = (3 \div 5) \times 10^{-5} \text{ 1/км};$$

$$\beta_0 = 0,06 - 0,065 \text{ град/км.}$$

Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима

Линию любой длины можно представить эквивалентной схемой замещения с сосредоточенными параметрами.

- Наиболее часто линию представляют **Π-образной схемой замещения** с сопротивлением звена $\underline{z}=r+jx$ и проводимостями $\underline{y}/2=g/2+jb/2$.
- При расчете линии по такой схеме замещения необходимо вводить поправочные коэффициенты:

$$K_z = \frac{sh(\gamma_0 l)}{\gamma_0 l} \quad K_y = \frac{2 \cdot (ch(\gamma_0 l) - 1)}{\gamma_0 l}$$

Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима

Эти коэффициенты представляют собой связь между параметрами линии, представленной уравнениями длинной линии и параметрами ее схемы замещения. Численные значения этих коэффициентов можно получить с той или иной степенью точности путем разложения гиперболических функций в бесконечные ряды:

$$K_z = 1 + \frac{(\gamma_0 l)^2}{6} + \frac{(\gamma_0 l)^4}{120} + \dots$$

$$K_y = 1 - \frac{(\gamma_0 l)^2}{12} + \frac{(\gamma_0 l)^4}{120} + \dots$$

Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима

$$K_z = 1 + \frac{(\gamma_0 l)^2}{6} + \frac{(\gamma_0 l)^4}{120} + \dots$$

$$K_y = 1 - \frac{(\gamma_0 l)^2}{12} + \frac{(\gamma_0 l)^4}{120} + \dots$$

Очевидно, что **при малых длинах** (до 300 км для ВЛ и 50 км для КЛ) значения поправочных коэффициентов очень близки к единице.

Поэтому при расчетах линий «малой» длины распределенностью параметров линии можно пренебречь.

Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима

При расчетах линий «большой» протяженности допускается применение **Π-образной схемы замещения ко всей длине линии, если вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие распределенность параметров:**

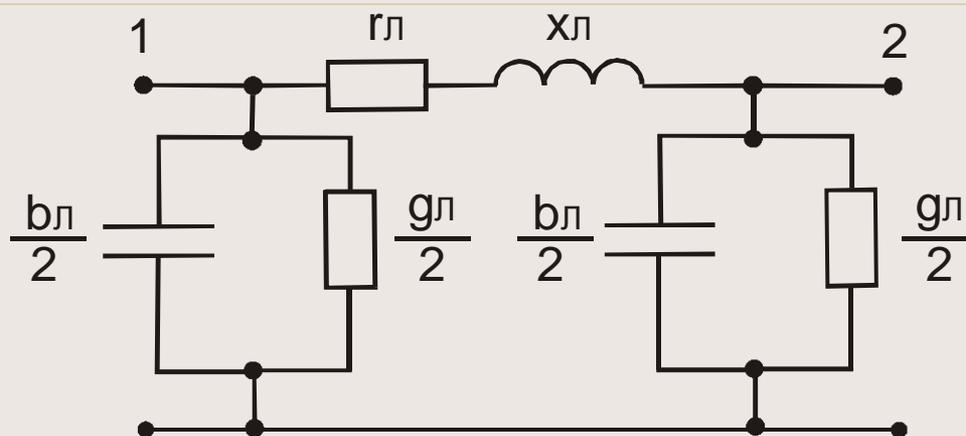
$$r_{Л} = r_0 \cdot l \cdot K_r, \quad K_r = 1 - \frac{1}{3} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0,$$

$$x_{Л} = x_0 \cdot l \cdot K_x, \quad K_x = 1 - \frac{1}{6} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{x_0^2}\right),$$

$$b_{Л} = b_0 \cdot l \cdot K_b, \quad K_b = 1 + \frac{1}{12} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0,$$

$$g_0 = 0.$$

Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима



$$r_{\text{Л}} = r_0 \cdot l \cdot K_r, \quad K_r = 1 - \frac{1}{3} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0,$$

$$x_{\text{Л}} = x_0 \cdot l \cdot K_x, \quad K_x = 1 - \frac{1}{6} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{x_0^2}\right),$$

$$b_{\text{Л}} = b_0 \cdot l \cdot K_b, \quad K_b = 1 + \frac{1}{12} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0,$$

$$g_0 = 0.$$

Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима

Как указывалось выше, при «малых» протяженностях линий поправочные коэффициенты обращаются в единицу. Используя данное обстоятельство, можно **разбить линию на несколько участков**, на которых выполняется указанное условие.

$$r_{Л} = r_0 \cdot l \cdot K_r, \quad K_r = 1 - \frac{1}{3} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0,$$

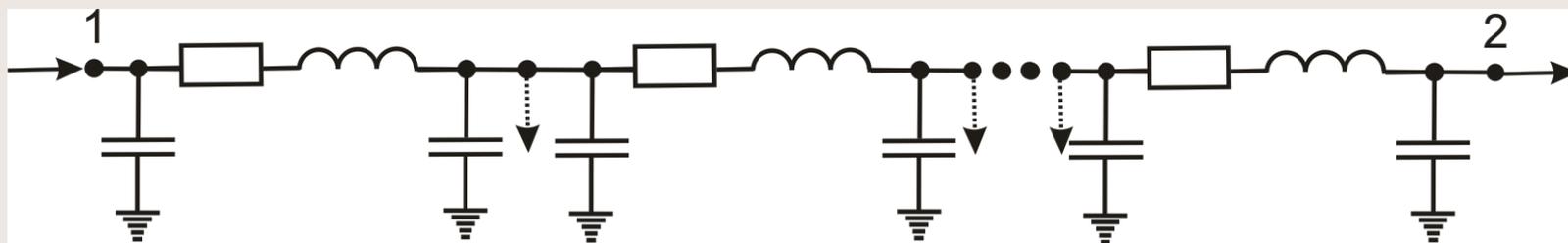
$$x_{Л} = x_0 \cdot l \cdot K_x, \quad K_x = 1 - \frac{1}{6} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{x_0^2}\right),$$

$$b_{Л} = b_0 \cdot l \cdot K_b, \quad K_b = 1 + \frac{1}{12} \cdot l^2 \cdot x_0 \cdot b_0,$$

$$g_0 = 0.$$

Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима

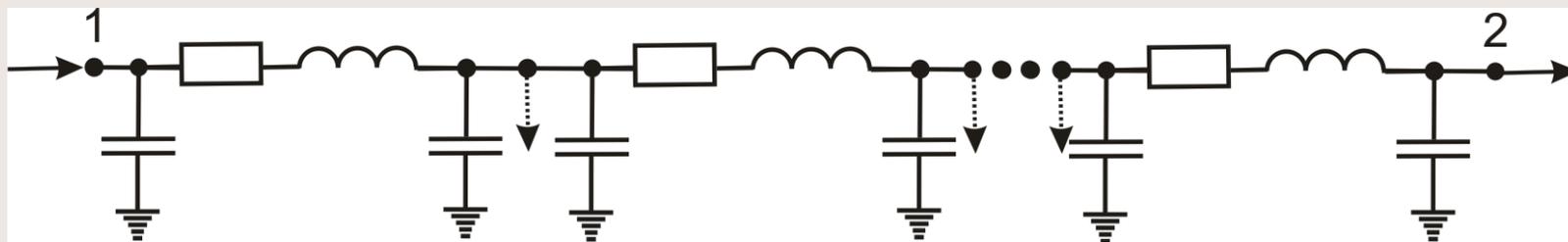
Отказ от учета распределенности параметров в таком случае не вызовет значительной погрешности в расчетах. **Каждый такой участок моделируется Π -образной схемой замещения без каких-либо поправочных коэффициентов** и в результате образуется «цепочечная» схема замещения длинной линии



Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима

Расчет такой схемы ведется последовательно от одного участка к другому с использованием известных методик, применяемых для расчета «районных» линий.

Потери мощности, обусловленные активной проводимостью линии (коронный разряд и утечки через изоляцию) можно представлять в виде активной нагрузки, включаемой в конце каждого участка линии.

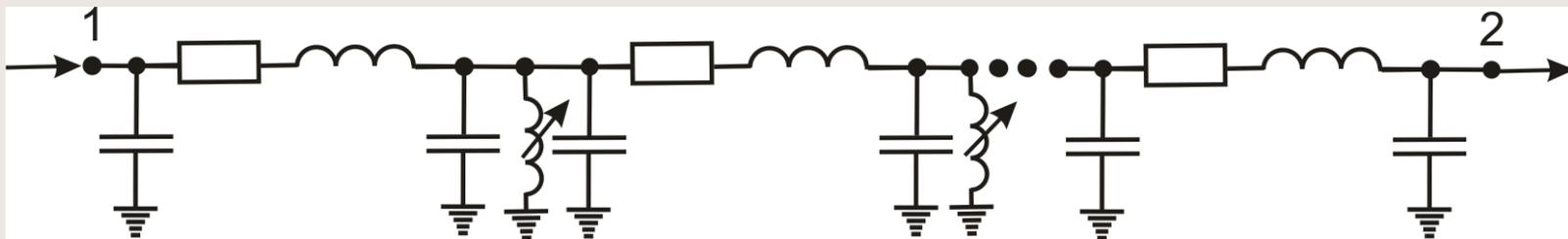


Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима

- Линии электропередачи напряжением **330 кВ** и выше в некоторых режимах (например, в режиме **минимальных нагрузок**) нуждаются в регулировании параметров.
- Для режима минимальных нагрузок таких линий характерна **повышенная генерация** реактивной мощности Q_c .

Основные способы представления дальних ЛЭП и расчета их режима

- Для компенсации этой избыточной реактивной мощности по концам линии и вдоль нее на специально организованных переключательных пунктах **устанавливают шунтовые реакторы**. Эти аппараты в схему замещения линии могут вводиться в виде индуктивных проводимостей.



Режим натуральной мощности

- На величину реактивной мощности в линии электропередачи оказывает влияние ее **зарядная мощность Q_C** , определяемая по формуле:

$$Q_C = U^2 \cdot b_0 \cdot l$$

- Очевидно, что при сравнительно невысоких значениях напряжения величина Q_C также относительно невелика.
- При увеличении номинального напряжения и длины линии значение Q_C **достигает значительных величин** и оказывает существенное влияние на параметры режима.

Режим натуральной мощности

$$Q_C = U^2 \cdot b_0 \cdot l$$

- Из формулы следует, что величину Q_C можно считать **условно независимой от нагрузки линии**, т.к. ее значение определяется напряжением.
- В тоже время, в индуктивном сопротивлении линии имеют место **потери реактивной мощности ΔQ** , которые можно определить по выражению:

$$\Delta Q = \frac{S_{\text{НАГР}}^2}{U^2} \cdot x_0 \cdot l = \frac{P_{\text{НАГР}}^2 + Q_{\text{НАГР}}^2}{U^2} \cdot x_0 \cdot l$$

Режим натуральной мощности

$$Q_C = U^2 \cdot b_0 \cdot l$$

- Из формулы следует, что величину Q_C можно считать **условно независимой от нагрузки линии**, т.к. ее значение определяется напряжением.
- Следовательно, величина ΔQ **пропорциональна квадрату передаваемой по линии мощности**.

$$\Delta Q = \frac{S_{\text{НАГР}}^2}{U^2} \cdot x_0 \cdot l = \frac{P_{\text{НАГР}}^2 + Q_{\text{НАГР}}^2}{U^2} \cdot x_0 \cdot l$$

Режим натуральной мощности

$$Q_C = U^2 \cdot b_0 \cdot l$$

$$\Delta Q = \frac{S_{\text{НАГР}}^2}{U^2} \cdot x_0 \cdot l = \frac{P_{\text{НАГР}}^2 + Q_{\text{НАГР}}^2}{U^2} \cdot x_0 \cdot l$$

- Можно предположить, что при некотором значении передаваемой по линии мощности, сложится ситуация, когда потери реактивной мощности в индуктивном сопротивлении линии ΔQ окажутся равны величине реактивной мощности, генерируемой в емкостной проводимости линии Q_C . Т.е. они будут полностью **компенсировать друг друга**. В этом случае можно записать:

$$3 \cdot I^2 \cdot x_0 = 3 \cdot U_{\Phi}^2 \cdot b_0$$

Режим натуральной мощности

- Если в указанной ситуации по линии будет передаваться исключительно активная мощность ($\cos \varphi = 1$), то передача будет происходить с наименьшими потерями мощности.
- Такой режим работы линии называют режимом натуральной мощности.
- Численно величина натуральной мощности может быть определена по выражению:

$$P_C = \frac{U^2}{\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}} = \frac{U^2}{z_C}$$

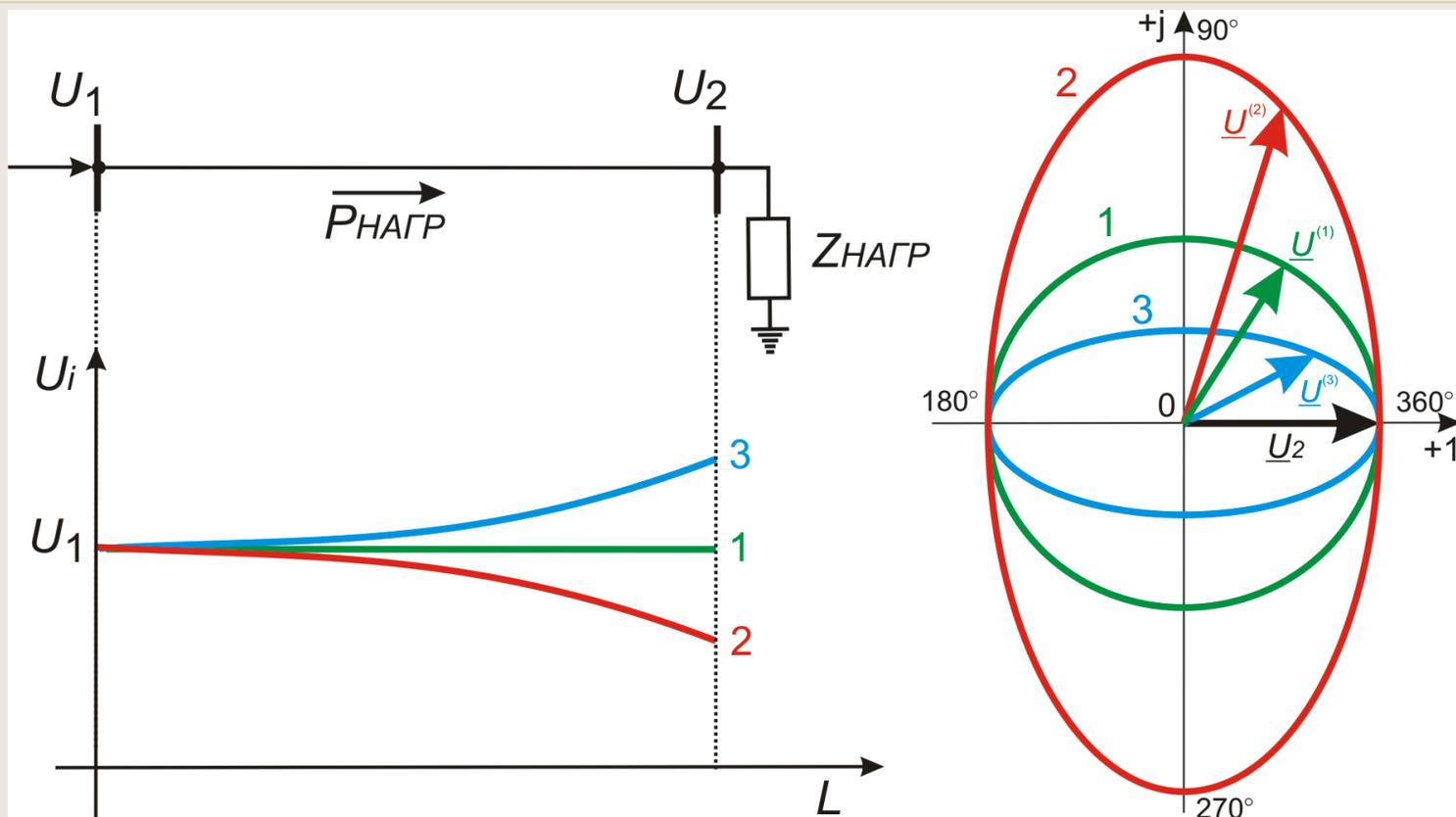
- где z_C – волновое сопротивление линии.

Режим натуральной мощности

Величины натуральных мощностей линий различных номинальных напряжений и исполнения приведены в справочных изданиях.

Характер изменения модуля напряжения вдоль линии при различных значениях мощности нагрузки отражают приведенные ниже зависимости.

Изменение модуля напряжения при $U_1=const$ и фазы и модуля вектора напряжения при $U_2=const$.



1) $P_{\text{НАГР}} = P_C$; 2) $P_{\text{НАГР}} > P_C$; 3) $P_{\text{НАГР}} < P_C$

Источники дополнительных сведений

- **Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 588 с.**
- **Электрические системы. Т. 2. Электрические сети/ Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высшая школа, 1971. - 440 с.**
- **Герасименко А. А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – изд.2-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 715, [2] с. – (Высшее образование)**
- **Боровиков В.А. и др. Электрические сети энергетических систем. Изд. 3-е, переработанное. Л., «Энергия», 1977.**
- **Черепанова Г.А., Вычегжанин А.В. Установившиеся режимы электрических сетей в примерах и задачах. - Киров: изд. ВятГУ, 2009 - 114 с.**



Спасибо за внимание!