МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ
Проректор
_____ Ю.Г.Пащенко
«_2_» _11_ 2026 г.

СВЕРХДАЛЬНИЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления подготовки 13.03.02
Электроэнергетика и электротехника

Курск 2026

УДК 621.31

Составители: В.И. Бирюлин, И.В. Ворначева, Д.В. Куделина

Рецензент:
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» *В.Н. Алябьев*

Сверхдальние линии электропередачи: методические указания к практическим занятиям / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Бирюлин, И.В.Ворначева, Д.В. Куделина. – Курск, 2026. – 38 с.: – Библиогр.: с.38.

Содержат сведения по основным расчетам, применяемым при проектировании и анализах режимов работы сверхдальних линий электропередач; выбору технических средств, предназначенных для повышения пропускной способности линий, компенсации реактивной мощности.

Предназначены для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 9.11.26 . Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л. 2,2. Уч.–изд.л. 2. Тираж 100 экз. Заказ 958. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

РАСЧЕТ КОРОНЫ НА ПРОВОДАХ ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: *ознакомление с основными способами расчетов короны на проводах линий сверхвысокого напряжения.*

Краткие методические указания

Корона - это один из видов самостоятельного электрического в газах в резко неоднородном поле. Если одиночный провод линии находится под напряжением U относительно земли и расположенный на некотором расстоянии от нее. Для упрощения примем, что провод имеет форму гладкого полированного цилиндра радиусом $r_{\text{пр}}$. На поверхности провода существует неоднородное электрическое поле, напряженность которого уменьшается по мере удаления от провода. Напряженность поля на поверхности провода может определяться по следующей формуле:

$$E_{ср} = \frac{CU}{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon r_{пр}}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - диэлектрическая постоянная вакуума;

$\varepsilon = 1{,}0$ Ф/м - диэлектрическая постоянная воздуха;

C - емкость провода на единицу его длины.

Напряженность электрического поля пропорционально возрастает с увеличением емкости провода и уменьшается с увеличением его радиуса. При переменном напряжении напряженность электрического поля во времени также изменяется по синусоидальному закону.

Под воздействием этого поля свободные электроны, имеющиеся в воздухе, будут приобретать дополнительную энергию и ускоряться. Эти электроны при столкновении с нейтральными атомами будут выбивать из них вторичные электроны. При некоторой напряженности поля этот процесс станет лавинообразным. В итоге возле провода создается ионизированная зона, насыщенная электронами. Эта зона или коронный разряд

проявляется в виде свечения вдоль провода, заметного в сумерках или в темноте.

Перемещение зарядов в зоне короны создает ток короны, который значительно больше тока утечки, возникающего по поверхности изоляторов линии. Так как перемещение зарядов требует затрат энергии, то возникновение короны сопровождается потерями энергии.

Величина этих потерь, особенно в плохую погоду, может быть довольно большой. Также ток короны имеет несинусоидальную форму и приводит к появлению в токах линий высших гармоник. Поэтому возникновение коронного разряда должно быть максимально ограничено.

Начальная напряженность поля E_0, при котором возникает коронный разряд на гладком проводе, находится по следующей формуле:

$$E_0 = 24{,}5\delta\left(1+\frac{0{,}65}{(\delta r_{пр})^{0{,}38}}\right), \qquad (2)$$

где δ - относительная плотность воздуха.

Значение относительной плотности воздуха определяется как:

$$\delta = \frac{pT_0}{p_0T}, \qquad (3)$$

где p_0 = 760 мм ртутного столба;

T_0 = 273 К;

p, T - текущие давление и температура воздуха.

Для снижения напряженности поля до допустимых значений необходимо увеличивать поверхность провода, что уменьшает плотность заряда. Это достигается увеличением радиуса одиночного провода или же путем распределения заряда фазы по нескольким проводам - применением расщепленных проводов.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем линии определить по справочной литературе основные параметры.

2. Определить по формуле (1) значение напряженности на поверхности провода.

3. Определить по формуле (2) значение напряженности на поверхности провода при котором возникает коронный разряд.

4. Определить по формуле (2) значение напряженности на поверхности провода при различных погодных условиях.

5. Сделать выводы по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. При каких напряжениях линии возможно возникновение коронного разряда?

2. Чем нежелательно появление коронного разряда на линиях?

3. Как изменяется напряженность электрического поля с увеличением емкости провода?

4. Как изменяется напряженность электрического поля с увеличением радиуса провода?

5. Какова причина появления радиопомех при коронном разряде?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

ВЫБОР КОНСТУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФАЗЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: *расчет ознакомление с конструктивными параметрами фазы линий электропередач сверхвысокого напряжения и методами выбора этих параметров.*

Краткие методические указания

Под конструкцией фазы понимается количество проводов в фазе, их сечения, взаимное расположение. Применение расщепленных фаз на линиях на линиях сверхвысокого напряжения объясняется двумя причинами.

Первая причина - большие значения передаваемой мощности и больших величинах токов в фазах линий. Изготовление одиночных проводов больших сечений в этом случае связано с технологическими сложностями ,трудностями с доставкой их на линию и последующем монтаже. Поэтому требуемое сечение создается за счет совместного использования нескольких проводов меньших сечений. Вторая причина - снижение напряженности электрического поля на поверхности провода и исключение возможности возникновения коронного разряда на проводах.

Основной целью выбора конструктивных параметров фазы линий электропередач сверхвысокого напряжения является исключение общей короны, что приводит к уменьшению потерь электроэнергии и снижению радиопомех. Но очаги местного коронирования все же остаются.

В настоящее время наибольшее распространение получила конструкция фазы, в которой провода располагаются по вершинам правильного многоугольника. Наиболее важные параметры такой конструкции - количество проводов и расстояние между ними.

Выбор параметров фазы начинается с определения количества проводов в фазе в соответствии с заданным расчетным током. Суммарное сечение определяется по расчетному току фазы. После этого проверяется несколько комбинаций числа проводов стандартных сечений, которые в сумме дают требуемое сечение.

Далее для каждого варианта определяется оптимальный шаг расшепления a и рассчитывается значение максимальной напряженности электрического поля E_{max}. Это значение сопоставляется с допустимыми значениями по условию короны и радиопомех.

Аналогичные расчеты проводятся для нескольких вариантов и из них выбирается оптимальный.

На рис.1 приведена конструкция фазы, состоящей из n проводов, размещенных по вершинам правильного многоугольника.

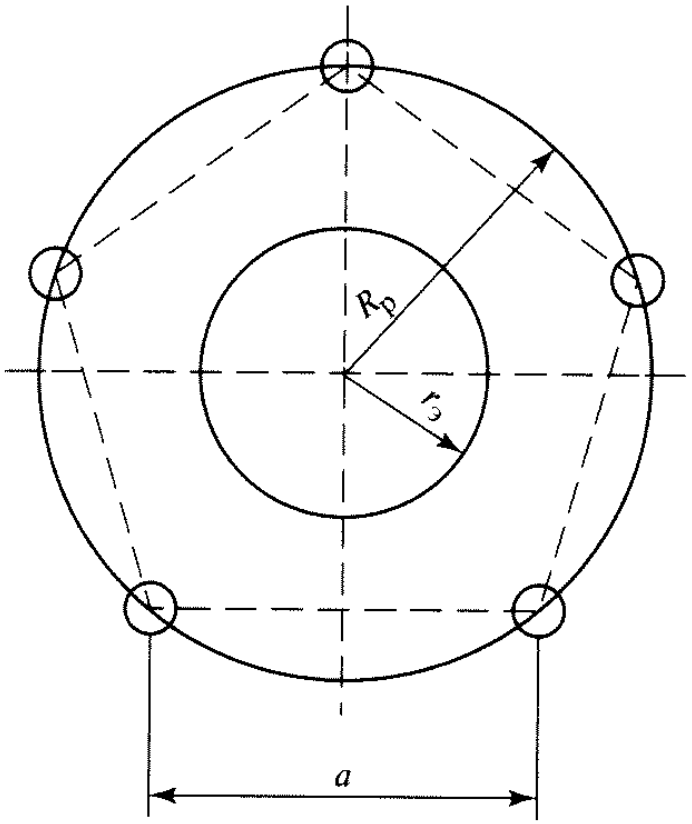


Рисунок 1 - Конструкция фазы

Для нее характерны следующие параметры:

$R_р$ - радиус расщепления, представляющий собой радиус окружности, описанной вокруг многоугольника, в вершинах которого расположены центры проводов;

a - шаг расщепления или расстояние между центрами соседних проводов фазы;

$r_э$ - радиус эквивалентного провода.

Исходя из приведенного рисунка, можно установить связь между радиусом и шагом расщепления:

$$Rp = \frac{a}{2\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}. \qquad (1)$$

Радиус эквивалентного провода может быть определен как среднегеометрическое значение расстояний от одного провода до других проводов той же фазы, приведенное к радиусу самого провода. Он определяется как:

$$r_э = \sqrt[n]{n r_{пр} R_p^{n-1}}. \qquad (2)$$

Так как все провода фазы находятся под одним и тем же напряжением и токи в проводах одинаковы, общий заряд фазы равномерно распределен между всеми фазами. И тогда заряд каждого провода будет равен:

$$q_{пр} = q_ф / n\ . \qquad (3)$$

Порядок выполнения работы

1. Для заданных преподавателем значений напряжения и тока определить сечение фазы.
2. Подобрать комбинацию стандартных сечений проводов, чтобы сумма была как можно ближе к расчетному значению.
3. Определить значение оптимального шага расщепления.
4. Определить значение эквивалентного радиуса провода.

Контрольные вопросы

1. Основная цель выбора конструктивных параметров фазы.
2. Как рассчитать шаг расщепления?
3. Как рассчитать эквивалентный радиус провода?
4. Как рассчитать заряд одного провода?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

***Цель работы**: ознакомление с методами расчета погонных параметров линий электропередач сверхвысокого напряжения*

Краткие методические указания

Удельные погонные параметры линии включают активное r_0 и реактивное x_0 сопротивления, а также активную g_0 и реактивную b_0 поперечные проводимости на 1 км длины. Поскольку провода расщепленной фазы в расчетах могут заменяться одним эквивалентным проводом, то значения x_0 и b_0 могут определяться по тем же выражениям, что и для линий с одиночными проводами, но при замене радиуса одиночного провода на радиус эквивалентного провода $r_э$.

Параметры r_0 и g_0 не зависят от геометрических параметров линии, но зависят от конструкции фазы. Значение r_0 определяется количеством проводов в фазе, а значение g_0 - потерями активной мощности на корону, зависящими от конструкции фазы, и токами утечки по изоляторам.

В практических расчетах значения g_0 определяются только потерями на корону. При этом значения таких потерь зависит от погодных условий, для которых проводится расчет. Следует принимать среднегодовые потери мощности на корону $\Delta P_{\text{кор сг}}$ при номинальном напряжении линии.

Удельные погонные параметры линии рассчитываются по следующим выражениям:

$$r_0 = r_{0\text{пр}}/n\,, \tag{1}$$

$$x_0 = 0{,}1445\lg\frac{D_{сг}}{r_э} + \frac{0{,}0157}{n}, \tag{2}$$

$$b_0 = \frac{7{,}58\cdot 10^6}{\lg\left(\dfrac{D_{сг}}{r_э}\right)}, \tag{3}$$

$$g_0 = \frac{\Delta P_{корсг}}{U^2_{ном}}, \qquad (4)$$

где r_0 - удельное активное сопротивление провода при заданной температуре воздуха;

$D_{сг}$ - среднегеометрическое расстояние между фазами.

При расщеплении проводов существенно снижается значение x_0 и возрастает значение b_0 по сравнению с аналогичными значениями для линии с одиночными проводами. Это означает, что расщепление проводов приводит к увеличению пропускной способности линии и может рассматриваться в качестве одного из путей решения этой задачи.

С другой стороны увеличение b_0 ведет к увеличению зарядной мощности линии и к возрастанию мощности компенсирующих устройств.

Активное сопротивление расщепленной фазы в n раз меньше сопротивления одиночного провода, что приводит к снижению потерь активной мощности на нагрев проводов.

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем линии определить удельные продольные параметры r_0 и x_0 по формулам (1,2).

2. Для заданной преподавателем линии определить удельные поперечные параметры g_0 и b_0 по формулам (3,4).

3. Определить поперечные параметры линии для других вариантов исполнения фазы.

4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1. Как влияет расщепление проводов на пропускную мощность линии?
2. Как влияет расщепление проводов на потери активной мощности в линии?
3. Как влияет расщепление проводов на нагрев проводов?
4. Как влияет погода на потери активной мощности в линии?.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ ЛИНИЙ ДЛИНОЙ ДО 1500 КМ

***Цель работы**: изучение методов построения и анализа векторных диаграмм линий длиной до 1500 км.*

Краткие методические указания.

Для построения векторных диаграмм принимаем следующие положительные направления активной и реактивной мощности. За положительное направление активной мощности принимается направление от начала к концу линии. За положительное направление реактивной мощности - направление, совпадающее с направлением активной мощности. С учетом этих определений уравнения начала линии принимают следующий вид:

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= U_2(\cos\lambda + Q_{*2}\sin\lambda + jP_*\sin\lambda), \\ I_1 &= \frac{U_2}{Z_в}[P_*\cos\lambda + j(\sin\lambda - Q_{*2}\cos\lambda)], \\ S_1 &= U_1 I_1 = P_1 \pm jQ_1 \end{aligned}\right\}$$

где U_1, U_2 - напряжения в начале и конце линии;

λ - расстояние от начала линии до рассматриваемой точки;

$Z_в$ - волновое сопротивление линии;

P_*, Q_* - относительные значения активной и реактивной мощности.

Приведенная выше система уравнений позволяет построить векторную диаграмму линии в комплексных координатах, приведенную на рис.1. При ее построении принимаем, что вектор напряжения U_2 направлен по положительной оси.

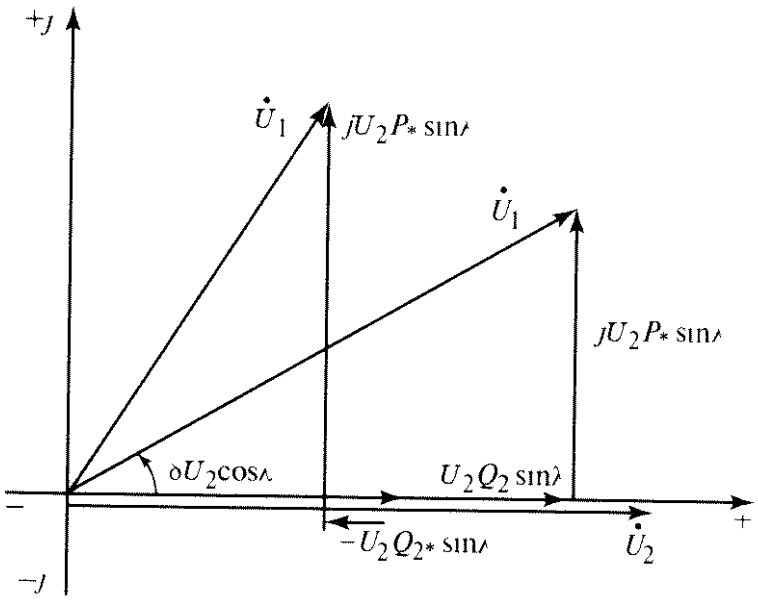


Рисунок 1 - Векторная диаграмма идеализированной линии

В этом случае все действительные величины расположены по действительной оси, в том числе и мощность $Q_{*2}\sin\lambda$, что соответствует положительному направлению реактивной мощности в конце линии. Эта диаграмма справедлива при длине линии L≤1500 км.

Из диаграммы следует:

$$\sin\delta = U_2P_*\sin\lambda/U_1. \qquad (1)$$

Мощность, передаваемая по линии определяется как:

$$P = P_{max}\sin\delta, \qquad (2)$$

где P_{max} - максимальная мощность, которая может быть передана по линии, значение ее определяется электромагнитными свойствами линии.

Максимальная мощность находится как:

$$P_{max} = U_1U_2/(Z_в\sin\lambda), \qquad (3)$$

Следует учитывать, что пропускная способность линии определяется рядом ограничений по отношению к P_{max} , основными из которых являются ограничения по нагреву проводов и устойчивости связываемых систем. Если учесть нормативный

коэффициент запаса по статической устойчивости, равный 20%, то зависимость наибольшей мощности $P_{нб}$, которую можно передать по линии с учетом этого коэффициента, пройдет ниже, чем определенная по формуле (2).

Коэффициент запаса по устойчивости определяется как:

$$k_з = (P_{max} - P_{нб})/P_{max} . \quad (4)$$

Из формулы (4) можно определить наибольшую мощность, которую можно передать по линии при сохранении статической устойчивости:

$$P_{нб} = P_{max} (1 - k_з). \quad (5)$$

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем линии определить ее параметры.
2. Определить по исходным данным параметры режима работы линии.
3. Построить векторную диаграмму линии. .
4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1. Как определяется волновое сопротивление линии?
2. Как определяется максимальная мощность, которая может быть передана по линии?
3. Чем ограничивается пропускная способность линии?
4. Как определяется наибольшая мощность, которую можно передать по линии при сохранении статической устойчивости.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ КРУГОВЫХ ДИАГРАММ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ ЛИНИЙ

Цель работы: *ознакомление с методами построения и анализ круговых диаграмм идеализированных линий.*

Краткие методические указания

Для пояснения соотношения основных параметров линии могут быть использованы круговые диаграммы. Для расчетов линий электропередач эти диаграммы обычно не используются из-за малой точности получаемого решения, но они удобны для для изучения физической сущности процессов, происходящих в линии при изменении передаваемой мощности и длины линии.

Круговыми диаграммами называются зависимости активной и реактивной мощности от угла δ, построенные в прямоугольных комплексных координатах *P* и *Q*. Для построения круговых диаграмм используем следующую систему уравнений.

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= U_2\cos\lambda + jI_2Z_в\sin\lambda, \\ I_1 &= I_2\cos\lambda + j\frac{U_2}{Z_в}\sin\lambda, \\ S_1 &= U_1I_1 = P_1 \pm jQ_1 \end{aligned}\right\}$$

Найдем из первого уравнения ток I_2 и подставив его во второе уравнение, получим прямой комплексный ток

$$I_1 = -j\frac{U_1}{Z_в}ctg\lambda + j\frac{U_2}{Z_в\sin\lambda}. \qquad (1)$$

Сопряженный комплексный ток определяется как:

$$I_1^* = j\frac{U_1}{Z_в}ctg\lambda - j\frac{U_2}{Z_в\sin\lambda}. \qquad (2)$$

Полная мощность начала линии находится как:

$$S_1 = U_1 I^*_1. \qquad (3)$$

Принимая $U_2 = U_2(0°)$, будем иметь $U^*_2 = U_2(0°)$, $U_1 = U_2(0°)$. В этом случае уравнение круговой диаграммы начала линии будет иметь вид:

$$S_1 = j\frac{U_1^2}{Z_в} ctg\lambda - j\frac{U_1 U_2}{Z_в \sin\lambda}\delta. \qquad (4)$$

Как видно из (4), вектор полной мощности S_1 можно представить как разность двух векторов:

$$S_1 = j\gamma_н - \rho\delta. \qquad (5)$$

Конец вектора $\gamma_н$ определяет собой центр окружности, который для идеализированной линии находится на мнимой оси. Координата этого центра определяется первым членом уравнения (4).

Значение модуля второго вектора определяется напряжениями по концам линии и ее длиной. Этот вектор является радиусом окружности, его начало расположено в центре окружности, а положение определяется углом δ. Таким образом он является радиус-вектором ρ.

При δ = 0 он расположен вдоль мнимой оси и его конец направлен вниз. При изменении угла δ от 0 до 360° этот конец описывает окружность, и поскольку вектор U_1 - прямое комплексное напряжение, вращение вектора происходит в положительном направлении, т.е. против часовой стрелки.

Проекции конца радиус-вектора на оси действительных и мнимых величин определяют значения активной и реактивной мощности начала линии. Максимальная активная мощность, которую можно передать по линии соответствует δ = 90° и поэтому численное значение радиус-вектора определяет P_{max}.

Следует учитывать, что каждому значению активной мощности на круговой диаграмме соответствует два значения реактивной, но рабочим является режим при котором угол δ изменяется от 0 до 90°.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем линии определить ее параметры, необходимые для построения круговой диаграммы.
2. Определить параметры векторов, составляющих вектор полной мощности.
3. Построить круговую диаграмму.
4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1. Что такое круговая диаграмма?
2. Достоинства и недостатки применения круговых диаграмм.
3. Что определяют проекции конца радиус-вектора на оси действительных и мнимых величин?
4. Как определить рабочий режим по реактивной мощности?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО КОМПЕНСИРОВАННОЙ ЛИНИИ

Цель работы: *ознакомление с методами расчета распределения напряжения и реактивной мощности по компенсированной линии.*

Краткие методические указания

К компенсированным линиям относятся такие линии, на которых применены средства продольной и поперечной компенсации.

Под средствами поперечной компенсации понимают устройства, подключаемые к линии параллельно. К ним относятся реакторы, предназначенные для компенсации зарядной мощности линии, а также синхронные или статические компенсаторы реактивной мощности, стабилизирующие напряжение в заданных узлах линии.

К средствам продольной компенсации относятся установки продольной емкостной компенсации, предназначенные для компенсации части индуктивного сопротивления линии с целью увеличения ее пропускной способности. Для этого используется батарея статических конденсаторов, включаемая в какой-либо точке линии последовательно в каждую ее фазу.

Для исследования компенсированных линий целесообразно воспользоваться математической моделью, в которой исследуемая линия представлена в виде четырехполюсника. Коэффициенты этого четырехполюсника (*A*, *B*, *C*, *D*) учитывают все компенсирующие устройства, включенные в линию.

Напряжение и ток начала компенсированной линии связаны с такими же параметрами в конце линии следующими уравнениями:

$$U_1 = AU_2 + BI_2 , \qquad (1)$$

$$I_1 = CU_2 + DI_2 . \qquad (2)$$

Коэффициенты для уравнений (1) и (2) в случае линии с реактором, включенным в некоторой промежуточной точке, определяются по следующим формулам:

$$A = \cos\lambda + Z_в\, y_р \sin\lambda_1 \cos\lambda_2,\ \ B = j(Z_в \sin\lambda + y_р\, Z^2_в\, y_р\, \sin\lambda_1 \sin\lambda_2); \quad (3)$$

$$C = j(\sin\lambda / Z_в\ - y_р \cos\lambda_1 \cos\lambda_2),\ \ D = \cos\lambda + Z_в\, y_р \sin\lambda_2 \cos\lambda_1. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) следует, что в общем случае коэффициенты A и D при $\lambda_1 \neq \lambda_2$ не равны. Поэтому координаты центров круговых диаграмм начала и конца линии будут различны и сами круговые диаграммы будут несимметричны. Коэффициенты A и D могут быть равны только при включении реактора в середине линии, когда $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$.

Для линии с установкой продольной компенсации или конденсаторной батареи, включенной в некоторой промежуточной точке линии коэффициенты четырехполюсника определяются по следующим формулам:

$$A = \cos\lambda + x_к \sin\lambda_1 \cos\lambda_2 / Z_в,\ \ B = j(Z_в \sin\lambda + x_к\, \sin\lambda_1 \sin\lambda_2); \quad (5)$$

$$C = j(\sin\lambda / Z_в\ - x_к\, \sin\lambda_1 \sin\lambda_2),\ \ D = \cos\lambda + x_к \sin\lambda_1 \cos\lambda_2 / Z_в. \quad (6)$$

Распределение напряжения вдоль линии с включенным реактором определяется следующим образом. При известных параметрах линии, точки включения, мощности и проводимости реактора определяются параметры П-образных схем замещения первого и второго участка линии и эквивалентного четырехполюсника. Далее находятся собственное и взаимное сопротивления и параметры режима в начале компенсированной линии при заданном значении мощности $P_{н1}$.

Из следующего уравнения находится угол δ между напряжениями U_1 и U_2 :

$$P_{н1} = \frac{U_1^2}{Z_{11}} \sin\alpha_{11} + \frac{U_1 U_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12})$$

Реактивная мощность в начале линии находится как

$$Q_{н1} = \frac{U_1^2}{Z_{11}} \cos\alpha_{11} - \frac{U_1 U_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12})$$

Полная мощность в начале первого участка линии определяется как:

$$S_{н1} = P_{н1} + jQ_{н1} .$$

Далее известными методами находится распределение напряжения и реактивной мощности вдоль линии.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем линии определить ее параметры, необходимые для нахождения коэффициентов четырехполюсников.
2. Определить параметры компенсирующих устройств и точки их подключения.
3. Рассчитать распределение напряжения и реактивной мощности вдоль линии.
4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1. Виды компенсирующих устройств, применяемых на сверхдальних линиях электропередач.
2. Как определяются параметры П-образных схем замещения и коэффициенты эквивалентных четырехполюсников.
3. Как находится реактивная мощность в начале линии?
4. Как определяются напряжения вдоль линии?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

РАСЧЕТ РЕЖИМА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ БЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

***Цель работы**: ознакомление с методами расчета режима линий электропередач сверхвысокого напряжения без промежуточных подстанций.*

Краткие методические указания

Сверхдальние линии электропередач без промежуточных подстанций могут быть разделены на два вида. К первому виду относятся транспортные электропередачи, предназначенные для передачи электроэнергии от удаленной электростанции в приемную систему. Ко второму типу - межсистемные или внутрисистемные связи.

Целью расчета нормальных режимов работы линии является определение параметров режима в узлах линии (напряжения, активной и реактивной мощности, тока по ее концам). При расчетах режима исходим из того, что параметры схемы замещения линии известны, определяются только параметры режима. В этих расчетах линия чаще всего представляется П-образной схемой замещения. При этом П-образная схема должна учитывать количество цепей в рассматриваемой линии.

Параметры режима по концам рассматриваемой линии связаны между собой следующей системой уравнений. Распределение напряжения вдоль линии обычно не рассматривается.

$$\left.\begin{aligned}
P_1 &= \frac{U_1^2}{Z_{11}}\sin\alpha_{11} + \frac{U_1U_2}{Z_{12}}\sin(\delta_{12}-\alpha_{12});\\
Q_1 &= \frac{U_1^2}{Z_{11}}\cos\alpha_{11} - \frac{U_1U_2}{Z_{12}}\cos(\delta_{12}-\alpha_{12}),\\
P_2 &= -\frac{U_2^2}{Z_{22}}\sin\alpha_{22} + \frac{U_1U_2}{Z_{21}}\sin(\delta_{21}+\alpha_{21}),\\
Q_2 &= -\frac{U_2^2}{Z_{22}}\cos\alpha_{22} + \frac{U_1U_2}{Z_{21}}\cos(\delta_{21}+\alpha_{21})
\end{aligned}\right\}$$

где Z_{11}, Z_{12} - собственные сопротивления начала и конца линии, соответственно;

Z_{12}, Z_{21} - взаимные сопротивления начала и конца линии;

α_{11}, α_{22}, α_{12}, α_{21} - дополнительные углы этих сопротивлений;

$\delta_{12} = -\delta_{21}$ - углы сдвига по фазе между напряжениями по концам линии.

Приведенная система содержит четыре уравнения и семь неизвестных - U_1, U_2, P_1, P_2, Q_1, Q_2,δ, поэтому решение этой системы в общем виде невозможно. Необходимо предварительно задаваться какими-то тремя параметрами режима. В качестве таких параметров могут рассматриваться активная мощность в конце и начале линии, определяемая диспетчерским графиком, напряжения в начале и конце линии, реактивная мощность в начале и конце линии.

Существует два способа задания исходных данных. В первом из них задаются все параметры режима одного из концов линии, например P_1, U_1, Q_1, и с использованием приведенной выше системы уравнений определяются параметры режима другого ее конца.

Во втором способе задаются активная мощность начала линии P_1 и модули напряжений в конце и начале линии U_1, U_2. Остальные параметры режима подлежат определению. Значение мощности P_1 устанавливается режимом, для которого производится расчет. Для режима наибольших нагрузок принимается максимальная мощность, которая может быть передана по линии в соответствии с диспетчерским графиком, для режима малых нагрузок - минимальная передаваемая мощность по этому графику.

Большое значение имеют напряжения по концам линии U_1, U_2, которые не могут быть приняты произвольно и должны соответствовать определенным требованиям, в частности, не отличаться от номинальных значений.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем линии определить ее параметры, необходимые для нахождения режимов.
2. Выбрать исходные значения для мощности в начале (конце) линии и напряжений по концам линии.
3. Рассчитать значения параметров режима работы рассматриваемой линии.
4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1. Виды сверхдальних линий электропередач без промежуточных подстанций.
2. Цель расчета нормальных режимов работы сверхдальних линий электропередач.
3. Способы задания исходных данных.
4. Как определяются напряжения по концам линии?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8

РАСЧЕТ РЕЖИМА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ПОДСТАНЦИЯМИ

***Цель работы**: ознакомление с методами расчета режима линий электропередач сверхвысокого напряжения с промежуточными подстанциями.*

Краткие методические указания

Протяженные линии электропередач могут иметь несколько промежуточных подстанций, предназначенных для питания крупных узлов нагрузки, расположенных вдоль трассы прохождения линии. Эти подстанции могут быть оснащены устройствами компенсации реактивной мощности в режимах больших и малых нагрузок.

Такая линия может быть представлена или схемами замещения отдельных участков и эквивалентной нагрузкой каждой из подстанций, или четырехполюсниками, замещающими участки линий и подстанции. Собственные и взаимные сопротивления могут быть получены как путем преобразования схем, так и с помощью параметров эквивалентного четырехполюсника. Далее расчет линии ведется по ее участкам, следуя или от ее начала, или от конца в зависимости от того, какие исходные данные вводятся в расчет - начала или конца линии.

В зависимости от способа задания исходных данных используется различная методика расчета. Если в режиме наибольших нагрузок заданы P_1, U_1, U_2 или P_2, U_1, U_2 , то в начале расчетов определяется угол δ_{12} , затем находится реактивная мощность начала первого участка $Q_{н1}$. Далее по полученным данным начала первого участка $U_{н1}$, $P_{н1}$, $Q_{н1}$ находятся потери напряжения на этом участке и напряжение U_A на шинах подстанции А, а также активная и реактивная мощности конца первого участка $P_{к1}$, $Q_{к1}$.

Из условия баланса активных и реактивных мощностей на шинах подстанции А находятся активная и реактивная мощности в начале второго участка $P_{н2}$, $Q_{н2}$. Затем аналогично находятся

потери напряжения на этом участке и напряжение U_B на шинах подстанции В. Далее весь расчет повторяется пока не достигается конец линии.

Этот алгоритм справедлив для режима как наибольших, так и наименьших нагрузок рассматриваемой линии электропередачи. Различие будет заключаться лишь в значениях принимаемых напряжений U_1, U_2 , а также в необходимости проверки напряжения в средней зоне линии в режиме малых нагрузок для участков длиной более 600 км.

В случаях, когда на одной или нескольких подстанциях рассматриваемых схем напряжение на шинах высокого напряжения выходит за допустимые пределы как сверху, так и снизу, необходимо устанавливать компенсирующие устройства.

Если по тем или иным причинам в качестве исходных данных задаются параметры режима одного узла, например P_1, Q_1, U_1 или P_2, Q_2, U_2 , алгоритм расчета будет иной. Здесь по данным начала первого участка определяется напряжение U_A и, если оно находится в допустимых пределах, определяются параметры режима начала второго участка и затем напряжение U_B . Если последнее выходит за эти пределы, необходимо вернуться к началу электропередачи, изменить в нужную сторону реактивную мощность Q_1 и повторить расчет.

Расчет повторяется до тех пор, пока напряжение U_B не примет требуемое значение. При этом определяется потребность в установке компенсирующего устройства на подстанции В. Затем определяются параметры режима третьего участка, и расчет продолжается до следующей подстанции.

В расчетах по определению оптимальных значений напряжений исходим из того, что переменными составляющими являются только мощности компенсирующих устройств и потери электроэнергии. Все остальное, включая параметры линии, схемы распределительных устройств, остается неизменным.

Затраты на возмещение потерь электроэнергии имеют две составляющие, одна из которых определяется потерями электроэнергии в линии, другая - потерями электроэнергии в компенсирующем устройстве.

$$З_{Δэ} = З_{Δл} + З_{Δку}.$$

Потери электроэнергии в линии определяются по известным выражениям для каждого значения напряжения U_2, в принятом диапазоне регулирования. При этом учитываются только потери на нагрев проводов. Потери на корону практически не зависят от изменений U_2 вследствие близости его к номинальному напряжению. Поэтому потери энергии на корону в этих расчетах не учитываются.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем линии с промежуточными подстанциями определить ее параметры, необходимые для нахождения режимов.
2. Выбрать исходные значения для мощности в начале (конце) линии и напряжений по концам линии.
3. Рассчитать значения параметров режима работы рассматриваемой линии.
4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1. Виды сверхдальних линий электропередач с промежуточными подстанциями.
2. Цель расчета нормальных режимов работы сверхдальних линий электропередач.
3. Способы задания исходных данных.
4. Как определяются напряжения по концам линии?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9

РАСЧЕТЫ ПОСЛЕАВАРИЙНЫХ И РЕМОНТНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

***Цель работы**: ознакомление с методами расчетов послеаварийных и ремонтных режимов электропередач.*

Краткие методические указания

Послеаварийные и ремонтные режимы работы линий электропередач связаны с отключением части оборудования. Отключаться могут одна из цепей линии, автотрансформатор или трансформатор на одной из подстанций, синхронный компенсатор и другое основное оборудование.

Данные режимы могут возникать в любое время, в том числе и в часы как минимальных, так и максимальных нагрузок. Основная задача расчета таких режимов состоит в определении значений напряжения на подстанциях, токов в проводах линии, коэффициентов запаса по устойчивости связываемых систем и других параметров режима. При отклонении параметров режима от допустимых по послеаварийным условиям значений необходима разработка мероприятий по введению режима в допустимые границы.

Возможно также существование особых режимов, таких как неполнофазные, несимметричные, несинусоидальные режимы, а также режимы одностороннего включения. Длительные неполнофазные режимы не характерны для сверхдальних линий. Несимметричные, несинусоидальные режимы также маловероятны. Поэтому в большинстве случаев они не расматриваются.

Параметры режима по концам рассматриваемой линии связаны между собой следующей системой уравнений. Распределение напряжения вдоль линии обычно не рассматривается.

$$\left.\begin{aligned}
P_1 &= \frac{U_1^2}{Z_{11}}\sin\alpha_{11} + \frac{U_1U_2}{Z_{12}}\sin(\delta_{12}-\alpha_{12});\\
Q_1 &= \frac{U_1^2}{Z_{11}}\cos\alpha_{11} - \frac{U_1U_2}{Z_{12}}\cos(\delta_{12}-\alpha_{12}),\\
P_2 &= -\frac{U_2^2}{Z_{22}}\sin\alpha_{22} + \frac{U_1U_2}{Z_{21}}\sin(\delta_{21}+\alpha_{21}),\\
Q_2 &= -\frac{U_2^2}{Z_{22}}\cos\alpha_{22} + \frac{U_1U_2}{Z_{21}}\cos(\delta_{21}+\alpha_{21})
\end{aligned}\right\}$$

где Z_{11}, Z_{12} - собственные сопротивления начала и конца линии, соответственно;

Z_{12}, Z_{21} - взаимные сопротивления начала и конца линии;

α_{11}, α_{22}, α_{12}, α_{21} - дополнительные углы этих сопротивлений;

$\delta_{12} = -\delta_{21}$ - углы сдвига по фазе между напряжениями по концам линии.

Приведенная система содержит четыре уравнения и семь неизвестных - U_1, U_2, P_1, P_2, Q_1, Q_2,δ, поэтому решение этой системы в общем виде невозможно. Необходимо предварительно задаваться какими-то тремя параметрами режима. В качестве таких параметров могут рассматриваться активная мощность в конце и начале линии, определяемая диспетчерским графиком, напряжения в начале и конце линии, реактивная мощность в начале и конце линии.

Существует два способа задания исходных данных. В первом из них задаются все параметры режима одного из концов линии, например P_1, U_1, Q_1, и с использованием приведенной выше системы уравнений определяются параметры режима другого ее конца.

Во втором способе задаются активная мощность начала линии P_1 и модули напряжений в конце и начале линии U_1, U_2. Остальные параметры режима подлежат определению. Значение мощности P_1 устанавливается режимом, для которого производится расчет. Для режима наибольших нагрузок принимается максимальная мощность, которая может быть передана по линии в соответствии с диспетчерским графиком, для режима малых нагрузок - минимальная передаваемая мощность по этому графику.

Большое значение имеют напряжения по концам линии U_1, U_2, которые не могут быть приняты произвольно и должны соответствовать определенным требованиям, в частности, не отличаться от номинальных значений.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем линии определить ее параметры, необходимые для нахождения режимов.
2. Выбрать исходные значения для мощности в начале (конце) линии и напряжений по концам линии.
3. Рассчитать значения параметров режима работы рассматриваемой линии.
4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1. Виды сверхдальних линий электропередач без промежуточных подстанций.
2. Цель расчета нормальных режимов работы сверхдальних линий электропередач.
3. Способы задания исходных данных.
4. Как определяются напряжения по концам линии?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №10

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

***Цель работы**: ознакомление с методами расчета потерь активной мощности и электроэнергии в линиях электропередач сверхвысокого напряжения.*

Краткие методические указания

Технологические потери электроэнергии (далее – ТПЭ) при ее передаче по электрическим сетям включают в себя технические потери в оборудовании электрических сетей, обусловленные физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии в соответствии с техническими характеристиками и режимами работы оборудования, с учетом расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций, расхода электроэнергии на плавку гололеда и потерь, обусловленных допустимыми погрешностями системы учета электроэнергии.

Технические потери электроэнергии в электрических сетях, возникающие при ее передаче по электрическим сетям, состоят из потерь, практически не зависящих от величины передаваемой мощности (нагрузки) - условно-постоянных потерь, и потерь, объем которых зависит от величины передаваемой мощности (нагрузки) – нагрузочных (переменных) потерь.

Технологические потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям рассчитываются по фактическим (базовый период) и прогнозным показателям (регулируемый период) баланса электроэнергии с учетом инвестиционных и производственных программ и программ энергосбережения.

Нормативы технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям в целом и по уровням напряжения по абсолютной величине ($\Delta W_{НТПЭ.Р.А}$) на регулируемый период определяются как:

$$\Delta W_{НТПЭ.Р.А} = \Delta W_{у\text{-}п.Р} + \Delta W_{н.Р} + \Delta W_{погр.Р}, \quad (1)$$

где $\Delta W_{у\text{-}п.Р}$ - условно-постоянные потери электроэнергии на регулируемый период;

$\Delta W_{н.Р}$ - нагрузочные потери электроэнергии на регулируемый период.

Условно-постоянные потери электроэнергии включают:

- потери на холостой ход силовых трансформаторов (автотрансформаторов);
- потери на корону в воздушных линиях 110 кВ и выше;
- потери в синхронных компенсаторах, батареях статических конденсаторов, статических тиристорных компенсаторах, шунтирующих реакторах;
- потери в соединительных проводах и сборных шинах распределительных устройств подстанций;
- потери в системе учета электроэнергии (трансформаторах тока, трансформаторах напряжения, счетчиках и соединительных проводах);
- потери в вентильных разрядниках, ограничителях перенапряжений;
- потери в устройствах присоединений высокочастотной связи (далее - ВЧ связи);
- потери в изоляции кабелей;
- потери от токов утечки по изоляторам ВЛ;
- расход электроэнергии на собственные нужды подстанций;
- расход электроэнергии на плавку гололеда.

Значения этих потерь определяются по известным формулам. Например, для силовых трансформаторов (автотрансформаторов) потери холостого хода определяются как:

$$\Delta W_x = \Delta P_x \sum_{i=1}^{m} T_{pi} \left(\frac{U_i}{U_{ном}} \right)^2, кВт \cdot час, \quad (2)$$

где T_{pi} - число часов работы трансформатора (автотрансформатора) в i-м режиме, ч;

ΔP_x - потери активной мощности холостого хода трансформатора, кВт;

U_i - напряжение на высшей стороне трансформатора (автотрансформатора) в i-м режиме, кВ;

$U_{ном}$ - номинальное напряжение высшей обмотки трансформатора (автотрансформатора), кВ.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем схемы сети определить элементы для которых рассчитываются потери электроэнергии.
2. Подготовить расчетные формулы .
3. Рассчитать потери электроэнергии.
4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1. Причины возникновения потерь электроэнергии.
2. Основные составляющие потерь электроэнергии.
3. Почему условно-постоянные потери зависят от напряжения.
4. Как влияет нагрузка на уровень потерь электроэнергии.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №11

РАСЧЕТ РЕЖИМА ОДНОСТОРОННЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ ЛИНИИ БЕЗ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

***Цель работы**: ознакомление с методами расчета режима одностороннего включения линии без компенсирующих устройств.*

Краткие методические указания

В дальних электропередачах в режимах холостого хода и малых нагрузок возникают перенапряжения установившегося режима, причиной которых является емкостный эффект, под которым понимают повышение напряжения в линии, обусловленное протеканием емкостного тока по распределенной индуктивности линии и сосредоточенной индуктивности источника.

Наибольшие перенапряжения возникают в режиме одностороннего питания линии (рис. 1).

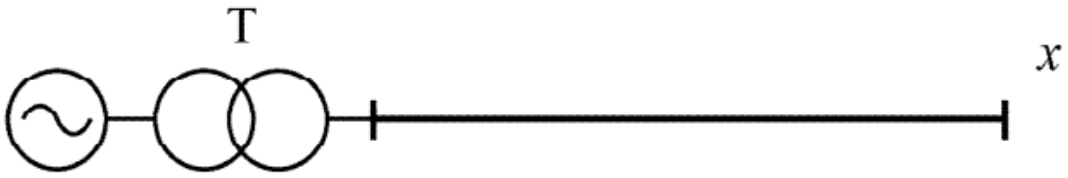


Рисунок 1 - Режим одностороннего питания линии

Если по длине линии выполнен полный цикл транспозиции, то параметры линии можно считать симметричными. В этом случае анализ режима можно провести в однофазной постановке на схеме замещения с параметрами прямой последовательности (рис. 2). Система эквивалентируется источником ЭДС E1 с входным индуктивным сопротивлением X1. Для упрощения анализа активными сопротивлениями пренебрегаем. Значительное повышение напряжения возможно при отключении достаточно протяженной линии электропередачи с одной стороны. Перенапряжения, возникающие в этом случае, могут быть

значительными и опасными для электрооборудования и электрических сетей.

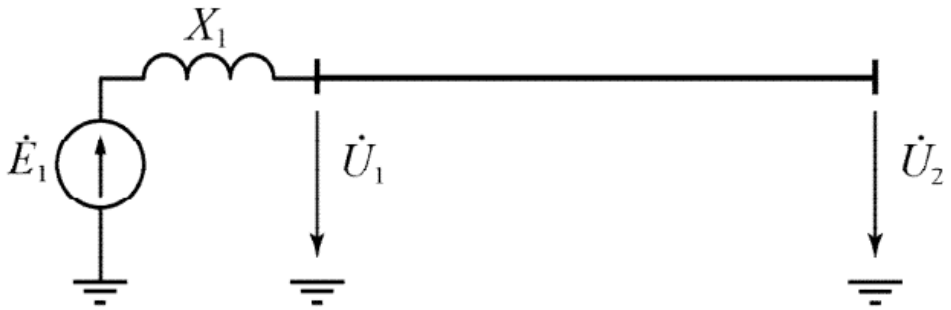


Рисунок 2 - Схема замещения для исследования режима одностороннего включения

Для объяснения возрастания напряжения в начале линии U1 рассмотрим схему замещения (рис. 3), на которой линия представлена своим входным сопротивлением $Z_{вх}$. В этой схеме напряжение в начале линии определяется как:

$$U_1 = E_1 \frac{\underline{Z}_{вх}}{jX_1 + \underline{Z}_{вх}}.$$

Входное сопротивление разомкнутой линии без потерь чисто мнимое

$$\underline{Z}_{вх} = jX_{вх} = -jZ_c \operatorname{ctg}\beta l,$$

где Z_c - коэффициент изменения напряжения;

β - коэффициент изменения фазы.

Как следует из проведенного анализа, при отклонении от режима передачи натуральной мощности в линии могут возникать перенапряжения. Для ограничения перенапряжений в различных точках линии включают реакторы поперечной компенсации (шунтирующие реакторы). Подключение реактора приводит к тому, что ток на определенных участках разомкнутой линии приобретает индуктивный характер, и напряжение вдоль этих участков спадает.

Номинальная трехфазная мощность реактора составляет:

$$Q_{ном} = \frac{U^2_{н.р.}}{X_р},$$

где $U_{н.р.}$ – наибольшее рабочее напряжение сети,

$X_р$ – индуктивное сопротивление реактора.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем линии определить ее параметры, необходимые для расчета режима одностороннего включения линии.
2. Выбрать исходные значения напряжений в начале (конце) линии.
3. Рассчитать значения параметров режима работы рассматриваемой линии.
4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1. Причины возникновения работы сверхдальних линий электропередач в режиме одностороннего включения.
2. Цель расчета режимов одностороннего включения сверхдальних линий электропередач.
3. Способы задания исходных данных.
4. Как определяются напряжения по концам линии?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №12

РАСЧЕТ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

***Цель работы**: ознакомление с методами расчета пропускной способности линий электропередач сверхвысокого напряжения.*

Краткие методические указания

Под пропускной способностью линий электропередачи понимается максимальная передаваемая по линии мощность, которая может быть передана без ограничения длительности режима передачи электроэнергии и при соблюдении всех требований эксплуатации:

- ограничения плотности тока в проводах;
- ограничения колебаний напряжения;
- обеспечения устойчивости режима.

Первое требование удовлетворяется соответствующим выбором активного сечения проводов при проектировании линии. Второе требование определяет необходимые параметры линии и состав компенсирующих устройств, обеспечивающих баланс реактивной мощности. Третье условие определяет дополнительные требования к параметрам линии и компенсирующим устройствам, удовлетворяющим первым двум.

В нормальном режиме работы линии колебания напряжения ограничиваются допустимым повышением напряжения − наибольшим рабочим напряжением $U_{\text{н.р}}$. При этом предполагается, что номинальное напряжение является минимальным напряжением нормального режима.

Чем выше класс напряжения линии электропередачи, тем меньше различие длительно допустимого и номинального напряжений. Такая практика сложилась из-за повышения добротности линий (увеличения отношения индуктивного и активного сопротивления линий) при повышении класса напряжения. Однако, значительное увеличение дальности электропередач высших классов напряжения приводит к существенным трудностям обеспечения этого ограничения.

При отсутствии промежуточных присоединений к энергосистемам или компенсирующим устройствам предел передаваемой мощности по устойчивости определяется соотношением

$$P_{\text{пред}} = 3U_1 \cdot U_2/(Z \cdot \sin\lambda), \qquad (1)$$

где U_1 и U_2 - фазные напряжения в начале и в конце линии;

Z и λ - волновое сопротивление и волновая длина линии.

Условие (1) позволяет определить предельную мощность $P_{\text{пред}}$, которая может быть передана без потери устойчивости работы электропередачи. Однако в этом режиме небольшой наброс мощности может нарушить устойчивость передачи. Поэтому нормами предусмотрен 20%−ный запас по отношению к предельной мощности:

$$P_{\text{макс}} = P_{\text{пред}}/1{,}2 = 0{,}83P_{\text{пред}}. \qquad (2)$$

Это значение передаваемой мощности $P_{\text{макс}}$ и представляет собой пропускную способность нормального режима работы электропередачи.

В послеаварийном режиме работы энергосистемы запас по устойчивости снижается до 8 %. При этом пропускная способность линии

$$P_{\text{макс.п.ав}} = P_{\text{пред}}/1{,}08 = 0{,}93\ P_{\text{пред}}. \qquad (3)$$

Для повышения пропускной способности электропередач по условию статической устойчивости используют различные средства, которые можно обобщить в 3 следующие группы:

1. Воздействие на параметры элементов электропередачи:

- изменение параметров генераторов, трансформаторов, совершенствование конструкций расщепленных фаз линий с целью снижения индуктивного сопротивления и увеличения натуральной мощности;

- компенсация реактивных параметров линии с помощью сосредоточенных устройств поперечной и продольной компенсации.

2. Применение устройств автоматического регулирования:

- АРВ генераторов;
- быстродействующее регулирование мощности турбин;
- регулирование напряжения по концам электропередачи;
- регулирование реактивной мощности (БСК).

3. Применение специальных схем:
- сооружение промежуточных подстанций;
- использование устройств для настройки линии на режим полуволны;
- использование вставок постоянного тока;
- использование схем с асинхронизированными синхронными машинами.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем линии определить параметры по которым рассчитывается пропускная способность.
2. Определить пропускную способность рассматриваемой линии для нормального режима работы.
3. Определить пропускную способность рассматриваемой линии для послеаварийного режима работы.
4. Повторить п.1 - п.3 для другого варианта линии.

Контрольные вопросы

1.Что представляет собой пропускная способность линий электропередачи?
2. Как рассчитать пропускную способность линии электропередачи в нормальном режиме работы.
3. Как рассчитать пропускную способность линии электропередачи в послеаварийном режиме работы.
4. Как повысить пропускную способность линии электропередачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения [Текст]: учебник для ВУЗов/Ю.П.Рыжов – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.

2. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий. - Москва: ЭНАС, 2019. — 672 с.

3. Современная электроэнергетика [Текст] / И. М. Бортник [и др.]. - М.:Издательский дом МЭИ, 2010. - (Основы современной энергетики: учебник для вузов: в 2 т.; Т. 2).

4. Красильникова Т. Г. Дальние электропередачи переменного тока сверхвысокого напряжения: учебное пособие. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011.