

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Майкопский государственный технологический университет»
Кафедра Нефтегазового дела и энергетики

ДАЛЬНИЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Учебно-методическое пособие для направления подготовки 13.03.02
Электроэнергетика и электротехника (профиль Электроэнергетические системы и
сети) для всех форм обучения

Майкоп 2019

УДК 621.315(07)

ББК 31.19

Д 15

СОСТАВИТЕЛЬ: КОХУЖЕВА Р.Б.

Данное учебно-методическое пособие содержит сведения о работе электропередач сверхвысокого напряжения, по нормальным и аварийным режимам работы дальних передач, описаны основные преимущества ВЛСВН, рассмотрены характеристики и параметры элементов сетей сверхвысокого напряжения, проблемы, связанные с передачей электроэнергии на большие расстояния, а также приведены сведения передач на постоянном токе.

Ведение

Электропередачи сверхвысоких напряжений играют важную роль в современной энергетике, обеспечивая выдачу мощности от крупных электростанций и являясь связующими звеньями в единой энергосистеме страны.

Необходимость сооружения линий электропередачи объясняется выработкой электроэнергии в основном на крупных электростанциях, удаленных от потребителей и относительно мелких приемников, распределительных на обширных территориях.

Линии, предназначенные для распределения электроэнергии между отдельными потребителями в некотором районе и для связи энергосистем, могут выполняться как на большие, так и на малые расстояния и предназначаться для передачи различных мощностей на высоком напряжении. Для дальних передач большое значение имеет пропускная способность, т.е. та наибольшая мощность, которую можно передавать по линии с учетом всех ограничивающих факторов.

Линии электропередачи относятся к категории ответственных сооружений, надежность которых обеспечивается применением компенсирующих устройств и установок автоматического регулирования и управления.

1 Лекция 1. Общая характеристика линии электропередачи сверхвысокого напряжения

Содержание лекции: назначение электропередач сверхвысокого напряжения их характеристики и особенности.

Цели лекции: изучение роли, преимуществ и перспективы развития электропередач сверхвысокого напряжения в современной энергетике.

Электропередачи сверхвысоких напряжений играют важную роль в современной энергетике, обеспечивая выдачу мощности от крупных электростанций и являясь связующими звеньями в единой энергосистеме страны. В Энергетической программе, принятой в нашей стране, придается большое значение созданию мощных межсистемных связей и сооружению линий электропередач, предназначенных для транспорта электроэнергии от энергетических комплексов на востоке страны в центры потребления.

В современной электроэнергетике можно выделить два типа линий электропередачи - магистральные электропередачи, служащие для передачи больших мощностей на значительные расстояния, и линии распределительной

сети, по которым электроэнергия доставляется непосредственно к потребителям. За истекшие 100 лет с момента появления первых электропередач и по настоящее время в их конструкции и их электрических характеристиках произошли большие изменения.

Напряжения и мощности электропередач непрерывно растут. Если еще сравнительно недавно считалось, что предельная дальность электропередачи не превышает 400 км и предельное напряжение не может быть выше 300 кВ, то теперь эти пределы существенно расширились.

Также сооружены электропередачи напряжением 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока и ведутся проработки электропередач еще более высоких напряжений. Расстояние, на которое может передаваться электроэнергия, далеко превышает 1000 км.

Развитие энергетических систем во всем мире характеризуется процессом их слияния во все более крупные объединения. Этот процесс сопровождается сооружением мощных межсистемных связей, разуплотнением графиков нагрузки объединенных систем, снижением их суммарных максимумов и необходимого аварийного резерва мощности, а также некоторым увеличением числа часов использования установленной мощности электростанций. Характер межсистемных связей определяется удаленностью объединяемых систем и условиями баланса активной мощности в каждой из частей объединенной системы в тот или иной период времени. Такие связи могут быть реверсивными и служить для передачи преимущественно пиковых мощностей и магистральными, служащими для покрытия постоянного дефицита в одной из объединяемых частей.

Линии электропередачи с номинальным напряжением 330—1150 кВ называют *линиями сверхвысокого напряжения*, или межсистемными связями. Для таких линий характерны большая протяженность (более 500 км) и значительная передаваемая мощность (более 500 МВА на одну цепь). Изоляция линий сверхвысокого напряжения определяется в основном кратностью внутренних перенапряжений с принудительным ограничением их специальной защитой до $2,5 U_{ном}$ и ниже. В линиях электропередачи сверхвысокого напряжения применяется расщепление проводов.

По мере развития энергосистем назначение мощных электропередач может изменяться по сравнению с первоначальным. Так, в первый период эксплуатации электропередачи Куйбышев—Москва назначение ее состояло в передаче дешевой электроэнергии от Волжской ГЭС им. В. И. Ленина в Московскую энергосистему. После сооружения линии связи этой станции с Уралом и промежуточных подстанций электропередача наряду с прежним назначением приобрела характер межсистемной связи.

Целесообразность передачи электрической энергии по ЛЭП сверхвысокого напряжения от мощной электростанции определяется сравнением двух возможных вариантов:

1) сооружение ЛЭП сверхвысокого напряжения и передача электроэнергии от станции, сооруженной далеко от потребителя, но рядом с источником дешевой энергии;

2) перевозка топлива и строительство электрической станции в промышленной зоне, т. е. рядом с потребителем. При сравнении обоих вариантов надо учитывать не только приведенные затраты, но и вопросы экологии.

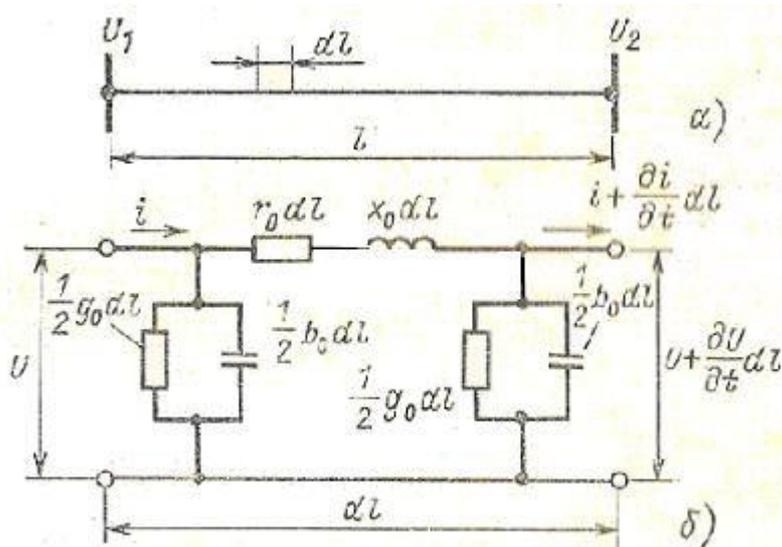
Линия электропередачи сверхвысокого напряжения имеет ряд особенностей, отличающих ее от других элементов электроэнергетической системы. Это, в первую очередь, учет распределенности параметров и волновых свойств линии, необходимость применения специальных устройств и мероприятий для управления режимом линии и увеличения передаваемой по ней мощности. Указанные особенности линии сверхвысокого напряжения требуют более подробного рассмотрения данного элемента электроэнергетической системы.

2 Лекция 2. Электрический расчет ЛЭП сверхвысокого напряжения

Содержание лекции: параметры линий сверхвысокого напряжения, учет волнового характера передачи электроэнергии. Уравнение длинной линии.

Цели лекции: изучение влияния волнового характера передачи электроэнергии в линиях сверхвысокого напряжения.

Учет распределенности параметров. В линиях сверхвысокого напряжения появляется необходимость в той или иной мере учитывать волновой характер передачи электроэнергии. При этом анализ работы подобных электропередач должен основываться на представлении линии длиной l как цепи с распределенными параметрами (см. рисунок 2.1),



a — выделение элемента длины dl ; *б* — схема замещения элемента длины

Рисунок 2.1- Линия с распределенными параметрами

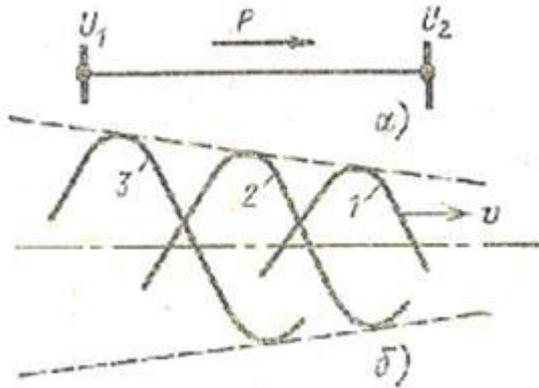
где каждый малый элемент линии dl обладает активным $r_0 dl$ и индуктивным $x_0 dl$ сопротивлениями, а также активной $g_0 dl$ и емкостной $b_0 dl$ проводимостями.

Будем считать, что параметры линии (активное и индуктивное сопротивления, активная и емкостная проводимости) равномерно распределены вдоль ее длины. Такое представление о линии электропередачи связано с некоторой идеализацией, поскольку ряд факторов, например, наличие провеса проводов в пролете, изменяют равномерность распределения индуктивности и емкости проводов.

Наличие токов, текущих через активную и реактивную проводимости электропередач, приводит к тому, что ток вдоль линии не остается постоянным. Последнее является дополнительной причиной изменения напряжения по длине линии. Таким образом, напряжение и ток вдоль линии не остаются постоянными.

Передача энергии по линии связана с распространением бегущих результирующих волн тока и напряжения, каждую из которых для удобства представляют двумя бегущими — прямой и обратной. При нагрузке, сопротивление которой равно волновому, скорость волны близка к скорости света. Передача активной мощности по линии совершается за счет движения результирующих волн напряжения и тока. Как прямая, так и обратная волна несет активную и реактивную мощность. В реальных линиях перенос мощности сопровождается ее потерями, что находит отражение в изменении амплитуды результирующих волн тока и напряжения при их передвижении вдоль линии со

скоростью V . Последнее показано на рисунке 2.2, где l — результирующая волна



a — направление передачи мощности по линии; b — распространение волны тока со скоростью V вдоль линии

Рисунок 2.2- Волновой характер передачи электроэнергии

в некоторый момент времени t_1 , а 2 и 3 — соответственно для последующих моментов времени t_2 и t_3 , $t_3 > t_2$. Решив дифференциальные уравнения, описывающие электрическое состояние линии с распределенными параметрами при приложении к ее зажимам синусоидально изменяющегося напряжения $\underline{U} = U e^{j\omega t}$, можно найти закон распределения напряжения и тока вдоль длинной линии. При этом для некоторой точки, расположенной на расстоянии x от конца передачи, векторы напряжения и тока, представленные через прямые и обратные волны, могут быть найдены следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_x &= \underline{A}_1 e^{\beta_0 x} e^{j\alpha_0 x} + \underline{A}_2 e^{-\beta_0 x} e^{-j\alpha_0 x} \\ \underline{I}_x &= \underline{B}_1 e^{\beta_0 x} e^{j\alpha_0 x} + \underline{B}_2 e^{-\beta_0 x} e^{-j\alpha_0 x} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где \underline{A}_1 , \underline{A}_2 , \underline{B}_1 , \underline{B}_2 — комплексные постоянные интегрирования;

β_0 — коэффициент затухания (или постоянная затухания), который характеризует затухание (на единицу длины) волны напряжения (тока) при ее распространении вдоль линии;

α_0 — коэффициент изменения фазы, характеризующий поворот вектора напряжения (тока) на единицу длины при распространении волны вдоль линии.

Основными характеристиками бегущей волны являются

фазовая скорость и длина волны. *Фазовая скорость*, $\frac{\text{рад/с}}{\text{рад/км}}$ или $\frac{\text{град/с}}{\text{град/км}}$,

$$v = \omega / \alpha = f / \alpha_0$$

Длиной волны, км, называется расстояние между двумя соседними точками на линии, фазы колебаний которых различаются на 2π :

$$\lambda = 2\pi / \alpha_0$$

Преобразуя уравнения (2.1), получим основные соотношения, связывающие напряжения $\underline{U}_1, \underline{U}_2$ и токи $\underline{I}_1, \underline{I}_2$ по концам протяженной линии с ее параметрами $\underline{Z}_c, \alpha_0, \beta_0, l$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \text{ch} \underline{\gamma}_0 l + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_c \text{sh} \underline{\gamma}_0 l \\ \underline{I}_1 &= \frac{l}{\sqrt{3}} \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \text{sh} \underline{\gamma}_0 l + \underline{I}_2 \text{ch} \underline{\gamma}_0 l \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где ch, sh — гиперболические косинус и синус;

\underline{Z}_c — волновое сопротивление линии, Ом;

$\underline{\gamma}_0 = \beta_0 + j\alpha_0$ — коэффициент распространения волны на единицу длины, 1/км;

l — длина линии электропередачи, км;

1, 2 — индексы у векторов напряжения (тока) для начала и конца линии соответственно.

Волновое сопротивление, определяющее токи прямой и обратной волн по соответствующим напряжениям, является функцией параметров линии электропередачи, связанных с ее конструкцией:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = Z_0 e^{-j\xi_0} \quad (2.3)$$

Волновое сопротивление колеблется от 400 Ом для ВЛ с одним проводом в фазе до 270 Ом при расщеплении проводов в фазе на четыре. Аргумент волнового сопротивления ξ_0 обычно отрицателен, так как $r_0/x_0 \geq g_0/b_0$, а значение его лежит в пределах $1—2^\circ$. Коэффициент распространения волны

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \beta_0 + j\alpha_0 \quad (2.4)$$

Для ВЛ величина $\beta_0 = (3+5) \cdot 10^{-5}$ 1/км, причем меньшее значение относится к линиям с одним проводом в фазе, а большее — к линиям, выполненным расщепленными проводами. Значение α_0 составляет 0,06—0,065 град/км. Принимая $\alpha_0 = 0,06$ град/км, можно найти длину волны напряжения и тока:

$$\lambda = \frac{360}{\alpha_0} = 6000 \quad (2.5)$$

Как коэффициент распространения волны γ_0 , так и его составляющие β_0 и α_0 зависят от параметров линии передачи и ее конструктивного исполнения.

Величина $\alpha_0 l$ характеризует изменение фазы напряжения или тока при распространении волны от конца к началу линии длиной l и называется *волновой длиной линии* λ_B рад или град. Если выразить α_0 через длину волны λ , то λ_B может быть записана в следующем виде:

$$\lambda_B = \alpha_0 l = \frac{2\pi}{\lambda} l \quad (2.5a)$$

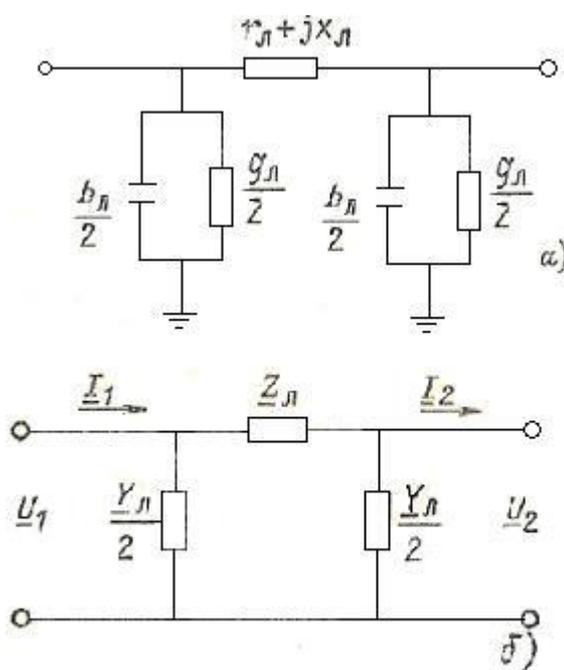
Волновая длина линии λ_B не тождественна ее геометрической длине l и так же, как и α_0 , изменяется при изменении частоты f и скорости распространения волны v .

3 Лекция 3. Расчет ЛЭП сверхвысокого напряжения по схеме замещения с сосредоточенными параметрами

Содержание лекции: схемы замещения, параметры линий электропередач сверхвысокого напряжения с расщепленными проводами.

Цели лекции: определение параметров ВЛСВН

При анализе ного напряжения в большинстве случаев можно не учитывать волновой характер передачи электроэнергии. Как правило, режимы работы таких электропередач рассчитывают на основе их схем замещения с сосредоточенными параметрами. Параметры П-образной схемы замещения линии (см. рисунок 3.1, а) определяются следующим образом; $r_n = r_0 l$ — активное сопротивление линии;



а — параметры П-образной схемы замещения; б — П-образная схема замещения, представленная как пассивный четырехполюсник

Рисунок 3.1- Схема замещения ЛЭП сверхвысокого напряжения с сосредоточенными параметрами

$x_n = x_0 l$ — индуктивное сопротивление линии;

$g_n = g_0 l$ — активная проводимость;

$b_n = b_0 l$ — емкостная проводимость линии.

При длине линии больше 300 км вводят поправочные коэффициенты, учитывающие распределенность параметров.

Рассматривая длинную линию как пассивный четырехполюсник (рисунок 3.1,б), можно записать соотношения:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \sqrt{3}\underline{B}\underline{I}_2, \quad (3.1)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}\underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2.$$

Сравнив последние уравнения с (3.2), получим

$$\underline{A} = \operatorname{ch}\underline{\gamma}_0 l \quad \underline{B} = \underline{Z}_c \operatorname{sh}\underline{\gamma}_0 l, \quad (3.2)$$

$$\underline{C} = \frac{l}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh}\underline{\gamma}_0 l \quad \underline{D} = \operatorname{ch}\underline{\gamma}_0 l.$$

Рассмотрим режимы холостого хода и короткого замыкания. При холостом ходе $\underline{I}_2 = 0$ и из рисунка 3.1,б следует

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 + \underline{Z}_r \frac{\underline{Y}_r}{2} \underline{U}_2 = \underline{U}_2 \left(\frac{\underline{Y}_r \underline{Z}_r}{2} + 1 \right) \\ \frac{1}{3} \left(\underline{U}_1 \frac{\underline{Y}_1}{2} + \underline{U}_2 \frac{\underline{Y}_r}{2} \right) &= \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}} \underline{Y}_r \left(1 + \frac{\underline{Y}_r \underline{Z}_r}{4} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Из рассмотрения короткого замыкания при $\underline{U}_2 = 0$ очевидно, что

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_r, \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3}} \left(\frac{l}{\underline{Z}_r} + \frac{\underline{Y}_r}{2} \right) = \left(l + \frac{\underline{Y}_r \underline{Z}_r}{2} \right) \underline{I}_2. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Следовательно, коэффициенты четырехполюсника выражаются через параметры линии следующим образом:

$$\begin{aligned} \underline{A} = \underline{D} &= \left(l + \frac{\underline{Y}_r \underline{Z}_r}{2} \right) \quad \underline{B} = \underline{Z}_r, \\ \underline{C}_r &= \underline{Y}_r \left(l + \frac{\underline{Y}_r \underline{Z}_r}{4} \right). \end{aligned} \quad (3.5)$$

4 Лекция 4. Зависимость напряжения и передаваемой мощности от длины линии

Содержание лекции: распределение напряжения вдоль длины линии.
Понятие натуральной мощности

Цели лекции: определения соотношения между напряжениями и мощностями в конце и начале линии.

Распределение напряжения вдоль длины линии определяется значением передаваемой мощности. *Натуральная* мощность течет по линии, когда сопротивление нагрузки на ее конце равно волновому сопротивлению $\underline{Z}_H = \underline{Z}_c$.

Натуральная мощность линии с номинальным напряжением равна

$$\underline{S}_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{\underline{Z}_c} \quad (4.1)$$

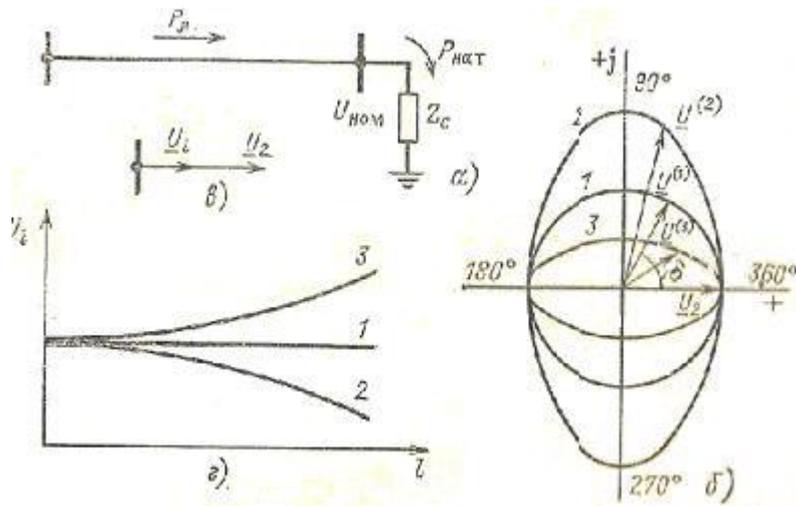
Для линий без потерь ($r_0 = 0, g_0 = 0$) натуральная мощность является активной и определяется следующим выражением (см. рисунок 4.1):

$$S_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_c} \quad (4.2)$$

где $Z_c = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}}$ - волновое сопротивление.

Рассмотрим соотношения между напряжениями и мощностями в конце и начале линии. Предположив линию без потерь, получим из уравнения длинной линии следующие более простые выражения:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cos \alpha_0 l + j \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_c \sin \alpha_0 l \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \cos \alpha_0 l + j \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \sin \alpha_0 l \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$



а- передача натуральной мощности; б - диаграммы напряжения \underline{U}_2 при разных соотношениях P_l и $P_{нат}$; в — холостой ход линии; г — зависимость модули напряжения от I при $U_1 = const$

Рисунок 4.1-Распределение напряжения вдоль длины линии

Будем считать, что в конце линии на шины с напряжением \underline{U}_2 включена нагрузка с сопротивлением $\underline{Z}_2 = r_2 + jx_2$ и мощностью $\underline{S}_2 = U_2^2 / \underline{Z}_2^*$. Предположим, что вектор напряжения в конце линии совпадает с осью действительных величин, т.е. $\underline{U}_2 = U_2$.

При принятых условиях первое из уравнений (4.3) примет вид

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(\cos \alpha_0 l + j \frac{Z_c}{Z_2} \sin \alpha_0 l \right) \quad (4.4)$$

При передаче по линии без потерь натуральной мощности, т.е. при условии $\underline{Z}_2 = Z_c$, уравнение (4.4) упрощается следующим образом:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 (\cos \alpha_0 l + j \sin \alpha_0 l) \quad (4.5)$$

Из выражения для \underline{S}_2 и (4.1) следует

$$\frac{Z_c}{Z_2} = \frac{U_{ном}^2}{P_{нат}} - \frac{U_2^2}{\underline{S}_2^*} = \left(\frac{U_{ном}}{U_2} \right)^2 \frac{\underline{S}_2^*}{P_{нат}} = \left(\frac{U_{ном}}{U_2} \right)^2 \frac{P_2 - jQ_2}{P_{нат}} \quad (4.6)$$

Если принять $U_2 = U_{ном}$ и подставить (4.6) в (4.4), то можно получить следующее выражение для напряжения \underline{U}_1 , отстоящего на расстоянии l , км, от конца линии:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(\cos \alpha_0 l + \frac{Q_2}{P_{ном}} \sin \alpha_0 l + j \frac{P_2}{P_{ном}} \sin \alpha_0 l \right) \quad (4.7)$$

С помощью (4.7) можно построить диаграммы распределения напряжения \underline{U}_1 вдоль длины линии при разных соотношениях $Q_2, P_2, P_{ном}$. При изменении длины линии от нуля $l=0$ до длины волны $l = \lambda$ в соответствии с (4.5) αl изменяется от 0 до 2π .

Тогда, как это следует из (4.7), при изменении от $l=0$ до $l = \lambda$ конец вектора напряжения \underline{U}_1 описывает окружность.

На рисунке 4.1,б показаны диаграммы распределения напряжения \underline{U}_1 вдоль линии длиной до 6000 км при $Q_2 = 0$. Зависимость l соответствует передаче мощности P_2 , равной натуральной, 2 — больше и 3 — меньше натуральной. Через $\underline{U}^{(1)}, \underline{U}^{(2)}, \underline{U}^{(3)}$ обозначены напряжения в точке, расположенной на расстоянии 1000 км от конца линии соответственно. При $P_2 = P_{ном}, P_2 > P_{ном}, P_2 < P_{ном}$. Угол сдвига между напряжениями \underline{U}_2 и $\underline{U}^{(1)}$ при передаче по линии натуральной мощности обозначен δ .

Из (4.5) или (4.7) при $Q_2 = 0$ следует, что при $P_2 = P_{ном}$ зависимость l на рисунке 4.1,б — это окружность. При передаче по линии активной мощности больше натуральной с увеличением длины линии будет быстрее, чем в предыдущем случае, расти величина $\frac{P_2}{P_{ном}} \sin \alpha_0 l$. При этом окружность 1, образованная концом вектора \underline{U}_1 , будет вытягиваться по вертикали, превращаясь в эллипс 2 на рисунке 4.1,б, меньшая ось которого равна U_2 . Если по линии будет передаваться мощность меньше натуральной, то указанная окружность будет сжиматься вдоль той же оси, образуя эллипс 3 (см. рисунок 4.1,б), большая ось которого равна U_2 . Предельный случай режимов при $P_2 < P_{ном}$ — это холостой ход линии (см. рисунок 4.1,в), когда $P_2 = 0$. При этом эллипс 3 вырождается в прямую линию.

При неизменном модуле напряжения в начале линии $U_1 = const$ из рисунка 4.1,б можно получить зависимости, приведенные на рисунке 4.1, г. При $P_2 = P_{ном}$ это прямая 1; при $P_2 > P_{ном}$ — кривая 2, для которой $U_1 > U_2$, т.е.

напряжение в начале линии больше, чем в конце; при $P_2 < P_{\text{маж}}$ — кривая 3, для которой $U_1 < U_2$, т.е. напряжение в начале линии меньше, чем в конце. Аналогичные зависимости можно построить, если поддерживать постоянным напряжение в конце линии.

Для ЛЭП сверхвысокого напряжения характерен переменный режим передачи мощности, что приводит к изменению напряжения вдоль линии. Так, если $P_1 > P_{\text{маж}}$ то напряжение в конце линии U_2 мало, его надо поднимать. При снижении мощности до $P_1 < P_{\text{маж}}$ (в часы минимумов нагрузки) U_2 велико, его надо понижать. Кроме того, при минимальных нагрузках уменьшаются потери реактивной мощности в индуктивном сопротивлении линии и появляются большие перетоки зарядной мощности Q_c , которые создают дополнительные потери

$$\Delta P_x = \frac{Q_c^2}{U^2} r_x$$

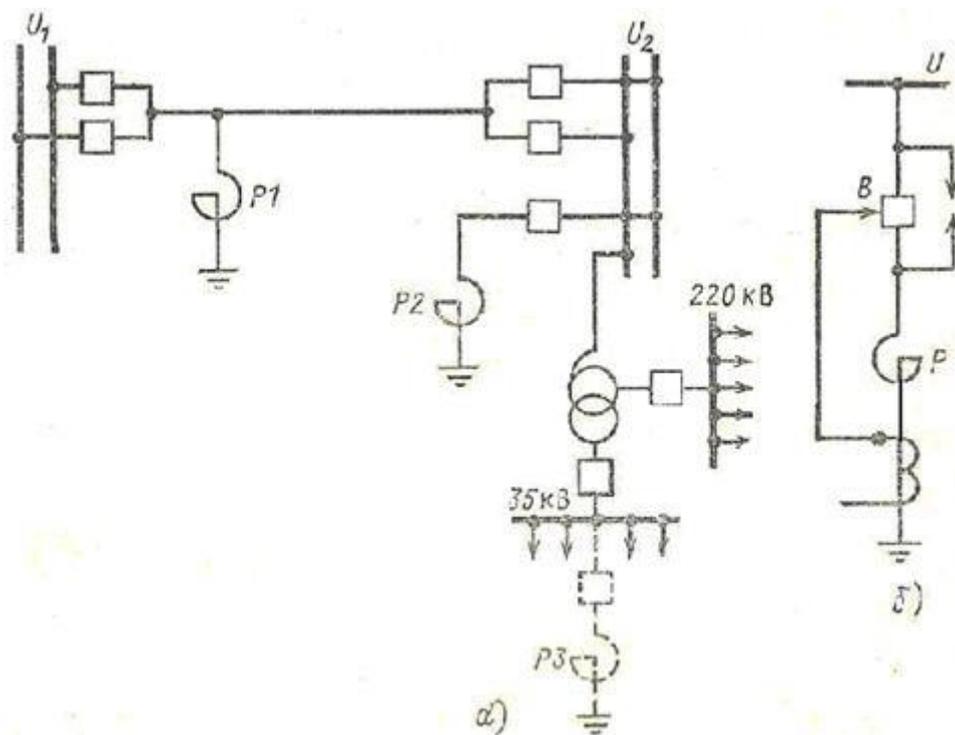
5 Лекция 5. Компенсирующие устройства для ВЛСВН

Содержание лекции: применение синхронных компенсаторов (СК), реакторов (Р) и статических источников реактивной мощности (ИРМ) на ЛЭП сверхвысокого напряжения.

Цели лекции: изучение роли синхронных компенсаторов (СК), реакторов (Р) и статических источников реактивной мощности (ИРМ) на ЛЭП сверхвысокого напряжения.

На ЛЭП сверхвысокого напряжения, как правило, устанавливаются различные компенсирующие устройства (КУ). С помощью КУ выравнивается напряжение вдоль линии, ограничиваются перетоки зарядной мощности. Кроме того, КУ выполняют важные функции, повышая наибольшую передаваемую по линии мощность и обеспечивая баланс реактивной мощности в приемных системах.

На ЛЭП сверхвысокого напряжения применяются синхронные компенсаторы (СК), реакторы (Р) и статические источники реактивной мощности (ИРМ).



a — включение в линию или подключение к шинам высокого или низкого напряжения подстанций; *б* — включение через разрядник

Рисунок 5.1- Схемы включения реакторов

Для регулирования реактивной мощности и напряжения, а также для снижения внутренних перенапряжений на ЛЭП сверхвысокого напряжения применяются шунтирующие реакторы. С точки зрения обеспечения желаемого распределения напряжения вдоль линии их целесообразно размещать равномерно. Однако такое решение неприемлемо ни экономически, ни практически, и реакторы обычно устанавливаются на подстанциях (см. рисунок 5.1) или переключательных пунктах (см. рисунок 5.1).

На подстанциях реакторы могут подключаться непосредственно к линии (P1), к шинам (P2), а также на низшее напряжение (P3). Способ включения реактора определяется режимами электропередачи.

Следует отметить, что установка реакторов на высоком напряжении эффективна для снижения внутренних перенапряжений. В этих случаях можно применять схему, изображенную на рисунке 5.1, б. Реактор P включается через разрядник, быстро срабатывающий при повышении напряжения более допустимого. Затем автоматически включается выключатель B, и реактор подключается к передаче.

6 Лекция 6. Определение наибольшей передаваемой мощности

Содержание лекции: зависимость наибольшей передаваемой мощности $P_{нб}$ от длины линии.

Цели лекции: изучение способов определения параметров ЛЭП, при которых будет наибольшая передаваемая мощность.

Зависимость наибольшей передаваемой мощности $P_{\text{нб}}$ от длины линии в простейшем случае (линия без потерь) определяется следующим выражением:

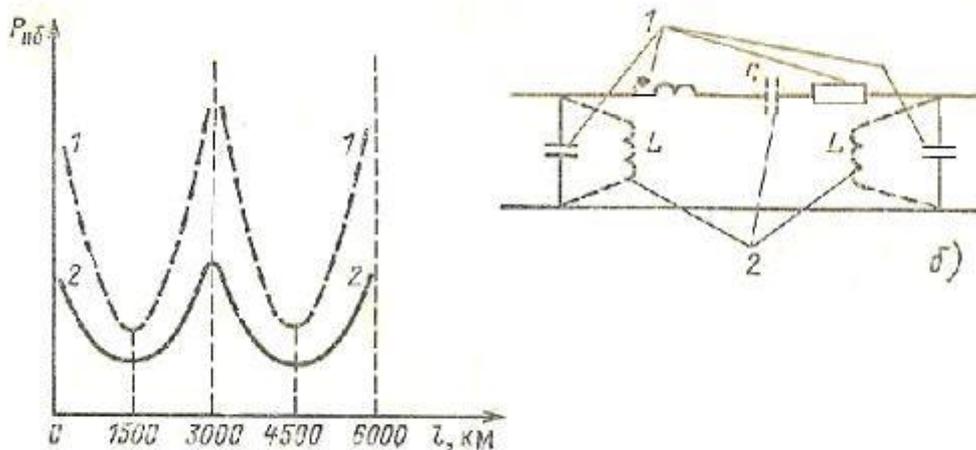
$$P_{\text{нб}} = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \alpha_0 l}$$

где U_1, U_2 — модули напряжений в начале и конце линии;

Z_c — волновое сопротивление;

$\alpha_0 l$ — волновая длина линии (рисунок 6.1, а).

В соответствии с $\lambda = \frac{360}{\alpha_0} = 6000$ длина волны $\lambda = 6000$ км. Если длина линии равна длине волны, то волновая длина линии $\lambda_B = \alpha_0 l = 2\pi$. В этом случае в линии без потерь $P_{\text{нб}} = \infty$,



а — для линии без потерь (1) и с потерями (2); б — настройка линии полуволну

Рисунок 6.1 - Зависимость наибольшей а) передаваемой мощности от длины линии

так как $\sin \alpha_0 l = 0$. При $l = 3000$ км $\alpha_0 l = \pi$ и соответственно $P_{\text{нб}} = \infty$. При $l = 1500$ и $l = 4500$ км $\lambda_B = \pi/2$ и $\lambda_B = 3/2\pi$. При этих длинах линии $\sin \alpha_0 l = 1$ и $P_{\text{нб}}$ определяется напряжениями и волновым сопротивлением.

С точки зрения передачи наибольшей мощности наиболее выгодными являются линии длиной 3000 и 6000 км. Физически при этих длинах имеют место резонансы, так как индуктивное и емкостное сопротивления линий равны и результирующее реактивное сопротивление равно нулю. При этом в линии без потерь теоретически можно передать бесконечную мощность. Кривые 1 на рисунке 6.1, а соответствуют этому случаю. При $l = 1500$ и 4500 км реактивное сопротивление в линии имеет наибольшее значение и соответственно $P_{\text{нб}}$ имеет наименьшее значение по сравнению с другими значениями l . Учет r_L, g_L , а также сопротивления генераторов и трансформаторов меняют картину, и по линии при $l = 3000$ и 6000 км можно передавать наибольшую, но не бесконечную мощность (кривые 2 на рисунке 6.1, а).

Можно «настроить» линию искусственным включением емкости C и индуктивности L (см. рисунок 6.1, б) на определенную длину и создать условия для передачи наибольшей мощности. На рисунке 6.1, б показаны: 1 — естественные параметры линии, 2 — настраивающие параметры. Наиболее целесообразно для передачи наибольшей мощности настраивать линию на полуволну, т. е. изменять настраивающие параметры C и L так, чтобы в линии был резонанс. Техническая реализация и эксплуатация линий, настроенных на полуволну, связаны с большими трудностями.

7 Лекция 7. Пропускная способность электропередачи. Повышение пропускной способности линии

Содержание лекции: пропускная способность линии сверхвысокого напряжения

Цели лекции: изучения основных зависимостей передачи мощности по линии. Определение методов повышения пропускной способности линии.

Рассмотрим работу электропередачи, состоящей из генератора, повышающего и понижающего трансформаторов T_1 и T_2 , линии электропередачи L и нагрузки H (см. рисунок 7.1, а).

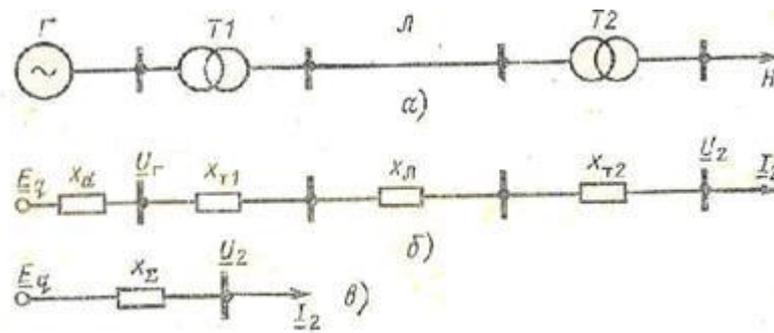


Рисунок 7.1- Электропередача (а) и схемы ее замещения (б, в)

Схема замещения этой сети приведена на рисунке 7.1, б

где \underline{E}_q — ЭДС в продольной оси;

x_{T1}, x_{T2}, x_d —сопротивления трансформаторов, генератора;

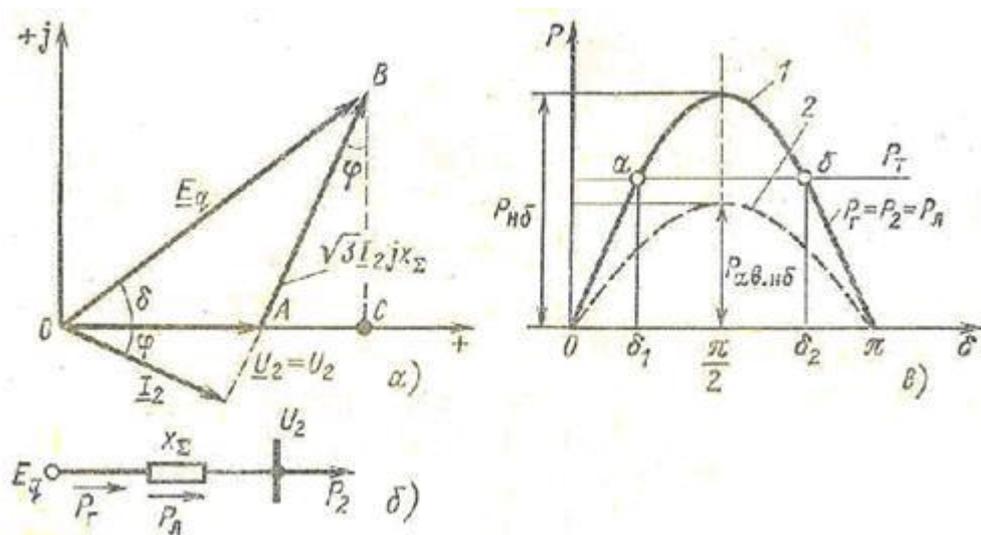
x_L — сопротивление линии.

Пренебрегая активными сопротивлениями, «свернем» сеть и последовательно сложим все реактивные сопротивления (см. рисунок 7.1, в)

$$x_{\Sigma} = x_d + x_{T1} + x_{T2} + x_L$$

Построим векторную диаграмму (см. рисунок 7.2, а). Обозначим δ угол между векторами \underline{E}_q и \underline{U}_2 (иногда так обозначают угол между напряжениями конца и начала линии). Из треугольников OBC и ABC следует, что

$$\underline{BC} = E_q \sin \delta = \sqrt{3} I_2 x_{\Sigma} \cos \varphi$$



а—векторная диаграмма; б- схема замещения; в — зависимость мощности от угла δ

Рисунок 7.2-Иллюстрация основных зависимостей передачи мощности по линии

Умножим последнее равенство слева и справа на U_2 и получим

$$U_2 E_q \sin \delta = \sqrt{3} I_2 U_2 x_{\Sigma} \cos \varphi$$

Отсюда легко получить следующее важное выражение:

$$P_2 = \frac{U_2 E_q}{x_{\Sigma}} \sin \delta$$

В рассматриваемом простейшем случае при отсутствии активных сопротивлений (рисунок 7.2,б) $P_T = P_R = P_2$

Зависимость передаваемой по линии мощности от угла δ при постоянных значениях E_q, U_2, x_{Σ} приведена на рисунке 7.8, в - это синусоида 1.

Пусть мощность первичного двигателя (турбины) генератора постоянна и соответствует прямой P_T . Установившийся режим определяется условием равенства мощности турбины P_T и электромагнитной мощности генератора P_R . Этому условию $P_T = P_R$ удовлетворяют точки а и б. Точка а соответствует устойчивому установившемуся режиму при передаче по линии мощности $P_{л} = P_T$ и угле δ_1 между \underline{E}_q и \underline{U}_2 который меньше 90° .

Пропускная способность электропередачи — это та наибольшая активная мощность, которую с учетом всех технических ограничений можно передать по линии. Технические ограничения определяются:

устойчивостью параллельной работы генераторов системы,

нагревом отдельных элементов передачи,

значением длительно допустимого напряжения, потерями на корону в линии и другими факторами.

Если не учитывать технические ограничения, то пропускная способность $P_{нб}$ равна амплитуде синусоиды на рисунке 7.2, в:

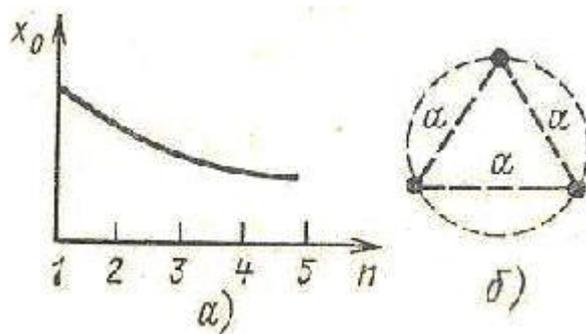
$$P_{нб} = \frac{U_2 E_q}{x_{\Sigma}}$$

Чем больше пропускная способность электропередачи $P_{\text{нб}}$, тем большую мощность можно передать по линии. Повышение пропускной способности — важная технико-экономическая задача, так как это позволяет отказаться от строительства дополнительных линий и обеспечить передачу потребителю необходимой мощности. Важно не только повышать пропускную способность сооружаемых линий, но и не допускать аварийного ее снижения. Например, если вследствие аварии пропускная способность понизится до $P_{\text{зд.нб}}$ (см. штриховую синусоиду 2 на рисунке 7.2, в), то это приведет к уменьшению передаваемой по линии мощности и к отключению потребителя. Режим, соответствующий устойчивой точке a (см. рисунок 7.2, б), не существует при снижении пропускной способности до $P_{\text{зд.нб}}$.

Мероприятия по повышению пропускной способности вновь сооружаемых и существующих электропередач включают, в частности, действие на E_g, U_T, x_{Σ} ..

ЭДС генератора E_g регулируется током возбуждения генератора. При авариях важно поддерживать возбуждение генератора, т.е. не допускать условия $P_{\text{нб}} < P_T$, при котором надо снижать передаваемую по линии мощность. Разработаны регуляторы возбуждения сильного действия, которые при авариях поддерживают постоянным не только ЭДС генератора E_g , но даже напряжение на шинах генератора U_T (см. рисунок 7.1,б). Регуляторы сильного действия широко применяются на мощных электростанциях.

Суммарное сопротивление x_{Σ} его составляющие целесообразно уменьшать. Сопротивления генераторов и трансформаторов уменьшают путем применения специальных



а — снижение x_0 в зависимости от числа проводов в фазе; б — расположение проводов в фазе линии 500 кВ

Рисунок 7.3- Расщепление провода в фазе

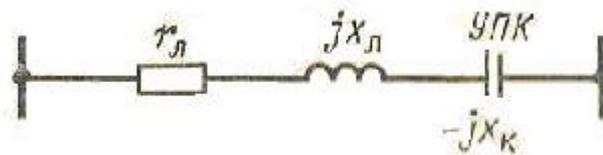


Рисунок 7.4 -Продольная компенсация линии электропередачи

сортов сталей и специальных конструктивных решений. Индуктивное сопротивление линий 330 кВ и более высокого напряжения снижают с помощью расщепления фазы — фазу выполняют не из одного, а из нескольких параллельных проводов (см. рисунок 8.1). В линиях с $U_{ном} = 330$ кВ провод расщепляется на два, т.е. $n=2$; для 500 кВ $n=3$, при этом $a = 40$ см.

Применение продольной компенсации (см. рисунок 8.2) является одним из целесообразных и распространенных средств повышения пропускной способности линий дальних электропередач. Конденсаторы УПК, включенные последовательно в линию, уменьшают результирующее реактивное сопротивление линии:

$$jx_{рез} = jx_л - jx_к$$

Мощность и место размещения УПК на линии должны быть обоснованы технико-экономическими расчетами. При умеренной величине продольной компенсации ограничиваются одной УПК на линии. Если сопротивление конденсаторов УПК таково, что компенсируется 50 % или более сопротивления линии, то необходимо выполнить УПК не меньше, чем на двух подстанциях. Сосредоточение слишком большого компенсирующего сопротивления в одном месте приводит к увеличению кратности внутренних перенапряжений и вызывает трудности в обеспечении правильного действия применяющихся в настоящее время устройств релейной защиты.

Применение УПК $x_к = 0,25x_л$ на двухцепной линии Куйбышев — Москва позволило увеличить пропускную способность с 1350 до 1800 МВт, т.е. на 34 %; повышение пропускной способности электропередачи Братск — Иркутск с 1150 МВт до 1600 МВт (на 38%) что оказалось возможным в результате компенсации около 35 % сопротивления линии.

8 Лекция 8. Особые режимы

Содержание лекции: определение особых режимов.

Цели лекции: изучение особых режимов и их влияние на работу ВЛСВН.

8.1 Определение особых режимов

Электропередачу обычно проектируют, исходя из некоторого установленного экономическим анализом перетока мощности. При этом проверяют возможность перегрузки передачи. Кроме того, определяют условия работы передачи в послеаварийном режиме, когда в результате аварии могут быть отключены: одна из ее цепей, один из участков на параллельных цепях, одна из групп параллельно работающих трансформаторов.

По длительно существующим нормальным и послеаварийным режимам определяют основные показатели работы электропередачи, рассчитывают ее статическую устойчивость, определяют потери мощности и энергии. Однако, кроме длительно существующих режимов, в электропередаче могут быть непродолжительные режимы.

Эти режимы не могут считаться аварийными, так как имеют место на неповрежденной линии, при находящемся в нормальном состоянии оборудовании. Но они в то же время и не являются нормальными, поэтому правильнее назвать их особыми режимами.

Особым, довольно длительным режимом, может быть режим при отключении одной из фаз линии или трансформатора, когда имеет место работа на двух фазах или на пяти фазах (на двухцепной передаче).

К особым относятся также режимы очень больших перегрузок и форсировок, режимы асинхронного хода, когда выпавший из синхронизма генератор или группа генераторов, работая как асинхронные, выдают активную мощность и потребляют некоторую реактивную мощность, сюда следует отнести режимы ресинхронизации, когда выпавшие из синхронизма генераторы без отключения втягиваются в синхронизм. Особыми являются режимы работы мало загруженных линий или режимы, когда линии работают совершенно без нагрузки - «на холостом ходу», а также и режимы самовозбуждения генераторов, синхронных двигателей, компенсаторов и асинхронных машин. Несмотря на относительную кратковременность, такие режимы могут иметь важное значение для работы электропередачи.

8.2 Установившиеся режимы холостого хода

Явления, характерные для холостых нормальных и аварийных режимов электропередачи, весьма разнообразны. К ним относятся повышения напряжения, возникающие при несимметричных коротких замыканиях на холостых линиях, получившие название динамических перенапряжений, повышение напряжения во время переходного процесса, при включении открытой на конце линии, т. е. на холостом ходу, опасные коммутационные перенапряжения, появляющиеся при повторных зажиганиях дуги в выключателях во время отключения ими большого емкостного тока линии, работающей в режиме холостого хода.

Для установившегося режима холостого хода характерным является повышение напряжения на открытом конце линии, перегрузка генераторов реактивным током, самовозбуждение генераторов. Эти явления играют большую роль при подъеме с нуля напряжения электропередачи, осуществляемом для проверки изоляции линии или для синхронизации станции, отделенной от системы линией передачи; существенны они и при самосинхронизации генераторов, отделенных от системы длинной линией.

При осуществлении холостых режимов дальних электропередач возникает ряд трудностей. Прежде всего следует отметить то обстоятельство, что зарядная мощность линии может значительно превышать номинальную мощность генератора, подключаемого к передаче, что приведет к недопустимой его перегрузке. С наличием большой зарядной мощности связано и повышение напряжения на линии электропередачи. Так, напряжение на открытом конце холостой линии при неполной компенсации ее зарядной мощности значительно превышает напряжение в начале передачи. Следовательно, для осуществления синхронизации удаленной станции и приемной системы обычными методами необходимо понижать напряжение в начале передачи или устанавливать компенсирующие устройства на ее конце. Однако снижение напряжения в начале дальней электропередачи может затрудняться самовозбуждением генераторов, а желательная с точки зрения устранения перегрузки и предотвращения самовозбуждения параллельная работа нескольких мало загруженных генераторов, несущих емкостную нагрузку, может затрудняться их неустойчивостью.

8.3 Несимметричные режимы работы электропередач

Электрические системы и все их элементы, как правило, работают в трехфазном симметричном режиме, и со времен изобретения трехфазного тока Доливо-Добровольским работа электрических систем и все операции по включению и выключению цепей электрических систем и их отдельных элементов производились одновременно на всех трех фазах. Казалось бы, что это вполне естественно и что иначе быть не может.

Однако в последнее время энергетических системах стали широко внедряться несимметричные режимы или, как их иначе называют, неполнофазные режимы.

Несимметричные режимы, конечно, не являются нормальными и не призваны заменить симметричные, но они имеют большое значение как средство повышения надежности работы электрических систем.

Несимметричные режимы могут быть длительными и кратковременными. Длительные несимметричные режимы - это такие режимы, при которых довольно длительное время осуществляется передача электрической энергии потребителям. Кратковременные несимметричные режимы связаны с аварийными процессами, такими, как короткие замыкания, обрывы с

замыканием на землю, отключение фазы при однофазном автоматическом повторном включении (АПВ). Инженеру анализ кратковременных режимов важен для того, чтобы выбрать оборудование и установить условия работы так, чтобы появление несимметрии не являлось аварийным.

Процесс перехода от симметричного к длительному несимметричному режиму не должен приводить к аварии, и после него в системе должен наступать установившийся режим при сохранении приемлемого качества электроэнергии.

Аварийные режимы здесь рассматриваться не будут, так как исследование их относится к курсам переходных процессов. Здесь должны быть рассмотрены установившиеся несимметричные режимы. К ним относятся полнофазные несимметричные режимы в условиях постоянной несимметрии напряжений и токов. Эта несимметрия может появиться или из-за несимметрии в том или ином элементе передачи (неодинаковое сопротивление в фазах), или же из-за несимметрии нагрузки.

Другим видом несимметричных режимов могут быть неполнофазные длительные режимы. Эти режимы могут возникать при ремонтах линий передачи или другого оборудования, при послеаварийных режимах, когда при аварии на одной из фаз передачи отключается только поврежденная фаза. Несимметричные неполнофазные режимы могут иметь место при использовании однофазного резерва, например, в случаях, когда имеется однофазный резервный трансформатор или резервный провод линии.

Осуществление несимметричных режимов имеет большое значение, так как оно позволяет повышать надежность снабжения потребителей, улучшает условия устойчивости, что имеет место, например, при аварии, когда на двухцепной электропередаче отключается не вся цепь, а только одна из ее фаз. Такой переход на пятифазный режим, разумеется, обеспечивает большой запас устойчивости, чем работа с одной цепью. Применение несимметричных режимов позволяет использовать оборудование для однофазных резервов. Благодаря осуществлению таких режимов, можно производить ремонт без полного отключения цепи электропередачи с отключением только одной ее фазы.

Работа на двух - пяти фазах или одной фазе (при заземленной нейтрали) так же, как и применение АПВ, не только повышает надежность электроснабжения, но и позволяет снижать капитальные затраты на сооружение электропередач, поскольку при проектировании с учетом возможности осуществления несимметричных режимов можно допускать заметное уменьшение резерва в различных элементах оборудования, например, могут быть случаи, когда осуществление несимметричного режима может позволить сэкономить цепь электропередачи.

Возможности осуществления длительных аварийных режимов ограничиваются следующими факторами:

1) ухудшением качества энергии при несимметрии. Качество энергии обычно характеризуется напряжением, при котором энергия подается потребителю, частотой системы, а также синусоидальностью кривой напряжения, т. е. отсутствием в ней гармоник.

При несимметричных режимах появляется еще третий показатель - степень несимметрии. Появление несимметрии означает ухудшение качества электроэнергии, так как осветительная нагрузка оказывается в ненормальных условиях, часть ламп работает на пониженном напряжении, не отдавая полностью своего нормального светового потока, другая же часть ламп, наоборот, может оказаться работающей на повышенном напряжении, что приведет к сокращению срока службы ламп.

При наличии несимметрии падает опрокидывающий вращающий момент асинхронных двигателей. При 5 % - ной асимметрии момент падает на 10-15 %, уменьшаясь в дальнейшем еще более резко с ростом несимметрии;

2) ухудшением условий работы оборудования. При появлении несимметрии:

а) могут перегреваться провода линий передачи (что, впрочем, обычно маловероятно, так как, будучи выбраны по экономической плотности тока, они имеют большой запас по условиям нагрева);

б) могут перегреваться обмотки отдельных фаз трансформаторов, генераторов и двигателей за счет возрастающего в отдельных фазах тока при несимметрии;

в) может появиться перегрев ротора генератора за счет появления токов и соответственно полей обратной последовательности и появления местных нагревов в отдельных точках генератора;

г) может появляться вибрация генераторов, ограничивающая допустимую степень несимметрии;

3) опасностью ненормальной работы релейной защиты, которая должна быть специально проверена на возможность осуществления несимметричных режимов;

4) влиянием на линии связи. Появление электростатического влияния и несбалансированных магнитных потоков при несимметричной работе линии может быть причиной расстройства работы линий связи, параллельных трассе электропередачи или вызвать нарушение блокировок на железных дорогах, что может привести к серьезным авариям на транспорте. Поэтому возможность

осуществления той или иной несимметрии линии передачи должна быть проверена с этой точки зрения;

5) повышением опасности электрических установок для человека - повышается напряжение шага и напряжение прикосновения. Следовательно, системы, рассчитанные на осуществление несимметричного режима, должны иметь хорошие заземляющие устройства;

6) ухудшением устойчивости по сравнению с устойчивостью при симметричных полнофазных режимах;

7) ухудшением экономичности работы системы.

Все экономические показатели работы системы рассчитываются, как правило, по симметричному режиму. Поэтому при появлении несимметрии нарушается заданное экономическое распределение нагрузок, что и снижает экономичность работы системы. Но, кроме того, независимо от этого обстоятельства к снижению экономичности работы системы при несимметрии приводит рост потерь, связанный с увеличением тока в одних фазах электропередачи и уменьшением его в других фазах.

Рост токов может происходить еще и потому, что в условиях несимметричного режима, когда вращающий момент двигателей падает из-за снижения напряжения прямой последовательности и появления напряжения обратной последовательности на выводах двигателей, растет их скольжение, а следовательно, и потребление реактивной мощности, растут также токи в линии, а это в свою очередь приводит к увеличению потерь.

8.4 Особенности несимметричных режимов длинных линий

При рассмотрении несимметричных режимов следует иметь в виду, что длинная линия электропередачи, по которой передаются значительные мощности, должна иметь более высокую эксплуатационную надежность, чем обычные линии. При проектировании длинной линии необходимо предусматривать целый ряд мероприятий, обеспечивающих ее надежную эксплуатацию.

У длинных линий электропередачи, выполняемых двухцепными, вдоль трасс сооружаются переключательные пункты или промежуточные подстанции. Это дает возможность в послеаварийных режимах, при отключениях одной цепи на каком-либо участке линии, устойчиво передавать довольно большую мощность. Для сохранения необходимого запаса статической устойчивости при отключении участка линии одной из параллельных цепей передаваемой мощности должна быть несколько снижена. Одновременное отключение одной из цепей на двух различных участках линии (например, в случае отказа в работе линейного выключателя на одном из переключательных пунктов) может привести к нарушению синхронизма.

При длинных линиях, например, около 1 тыс. км, вероятность отключения отдельных ее участков увеличивается. Это связано, главным образом с необходимостью регулярного проведения на линии профилактических и ремонтных работ. Применяя раздельное управление фазами, можно существенно повысить надежность работы длинной линии, допуская в ее эксплуатации неполнофазные режимы.

На линиях 220 кВ, выполненных на металлических опорах, наиболее частой причиной повреждения являются однофазные короткие замыкания, причем они оказываются не глухими, а через дугу или сопротивление опоры и т. п. Для линий 500 кВ этот вид повреждения также является практически наиболее вероятным.

Если после однофазного короткого замыкания на поврежденном участке линии в работе останутся пять фаз из шести (пятифазный режим), а не три, как это имело бы место при отключении всей цепи, то устойчивость будет значительно лучше.

При переходе от полнофазного режима работы линии к пятифазному, эквивалентное сопротивление электрической цепи для токов прямой последовательности увеличивается в меньшей мере, чем при отключении всей цепи на том же участке.

Применение пофазного управления приводит к тому, что линия в отдельных случаях режимов будет работать в неполнофазных режимах. Наиболее частым видом таких режимов будет работа с одной отключенной фазой на каком-либо участке линии. В качестве других примеров можно привести отключение на каждом из двух участков по одной фазе (одноименной или разноименной) или отключение на одном участке двух фаз.

С точки зрения устойчивости одновременное отключение отдельных фаз на различных участках двухцепной линии допустимо не только тогда, когда эти фазы одноименные, но и тогда, когда они разноименные. При одновременном отключении двух разноименных фаз на одном участке линии или на разных участках режим работы линии по условиям устойчивости приближается к ее режиму при полностью отключенной цепи на одном из участков линии. Таким образом, при раздельном управлении фазами два одновременных отключения в большинстве случаев оказываются легче, чем одно отключение при трехфазном управлении. Одновременное отключение двух одноименных фаз на одном участке линии приводит по существу, к двухфазному режиму работы электропередачи и требует по условиям устойчивости снижения передаваемой мощности. Для того чтобы избежать таких двухфазных режимов, можно применить автоматическое переключение проводов линии с одной фазы на другую, приводящее к пятифазному режиму.

Кроме раздельного управления фазами линии, некоторые преимущества может дать раздельное управление фазами батарей конденсаторов установки

продольной компенсации и фазами реакторов поперечной компенсации, что также приводит к неполнофазным или несимметричным режимам работы линии электропередачи.

Необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что неполнофазные режимы работы линии электропередачи обладают серьезными недостатками, и применение таких режимов всегда должно быть обосновано.

Отключение отдельных фаз линии или компенсирующих устройств приводит к возникновению несимметрии токов и напряжений. Приходится считаться с появлением токов и напряжений обратной последовательности во всей электрической системе, а также токов и напряжений нулевой последовательности в линиях электропередачи с глухим заземлением нейтрали.

Несимметрия токов затрудняет осуществление надежной релейной защиты линии с применением существующих схем. Наибольшую сложность для релейной защиты представляют повторные неполнофазные отключения. Наличие токов нулевой последовательности в линии усиливает мешающие влияния на низкочастотные каналы связи. Токи обратной последовательности, протекая по обмоткам статоров генераторов, вызывают дополнительный нагрев роторов.

Допустимое значение токов нулевой последовательности на отдельных участках линии определяется влиянием линий электропередачи на линии связи. В связи с этим влиянием, которое не должно превышать установленных норм, может потребоваться переустройство телефонных линий.

При раздельном управлении фазами должна быть проверена возможность работы линии в неполнофазных режимах по условиям допустимого для изоляции аппаратов повышения напряжения на отдельных фазах, а также по условиям допустимой для потребителей электроэнергии несимметрии напряжений на шинах приемных подстанций.

При раздельном управлении фазами существенно значение тока замыкания на землю, протекающего через дугу после отключения поврежденной фазы линии. Возможно, что дуга в некоторых случаях может не погаснуть при отключении поврежденной фазы, питаясь емкостным током.

После погасания дуги отключенный провод будет иметь некоторое напряжение относительно земли, определение которого требуется, например, для решения вопроса о способах проведения пофазных ремонтов линий. Необходимо иметь в виду, что при отключении фаз линий передачи или трансформаторов иногда могут появляться перенапряжения как во время нормальной работы, так и при коротких замыканиях.

Применение неполнофазных режимов работы систем позволяет улучшить их эксплуатационные показатели без существенных дополнительных затрат.

Несимметрия токов и напряжений в большинстве случаев оказывается допустимой. Однако иногда может потребоваться снижение передаваемой по линии мощности или применение дополнительных устройств. Применение неполнофазных режимов вызывает и ряд трудностей, с которыми нельзя не считаться; кроме того, препятствием к применению неполнофазных режимов работы длинных линий электропередачи могут служить осложнения, возникающие при создании релейной защиты.

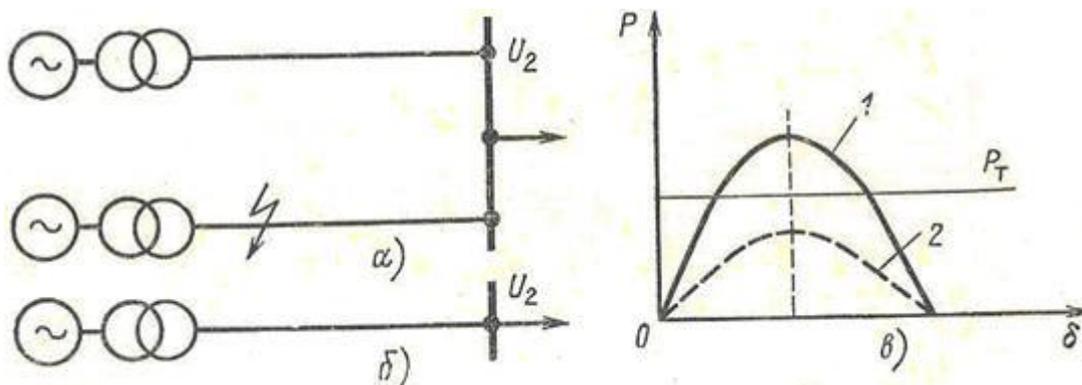
Для симметрирования неполнофазных режимов может быть использовано раздельное управление фазами устройств продольной и поперечной компенсации линии электропередачи. Это управление может осуществляться вручную. Применение любых специальных симметрирующих устройств для осуществления неполнофазных режимов, как правило, нежелательно и может быть допущено только в отдельных случаях.

9 Лекция 9. Схемы дальних электропередач

Содержание лекции: схемы дальних электропередач.

Цели лекции: изучение преимуществ и недостатков схем дальних электропередач.

Линии дальних электропередач могут выполняться по блочной или связанной схеме. В блочной схеме электропередача разделена на блоки генератор — трансформатор — линия (см. рисунок 9.1, а). Повреждение любого из элементов блока приводит к его отключению и к уменьшению



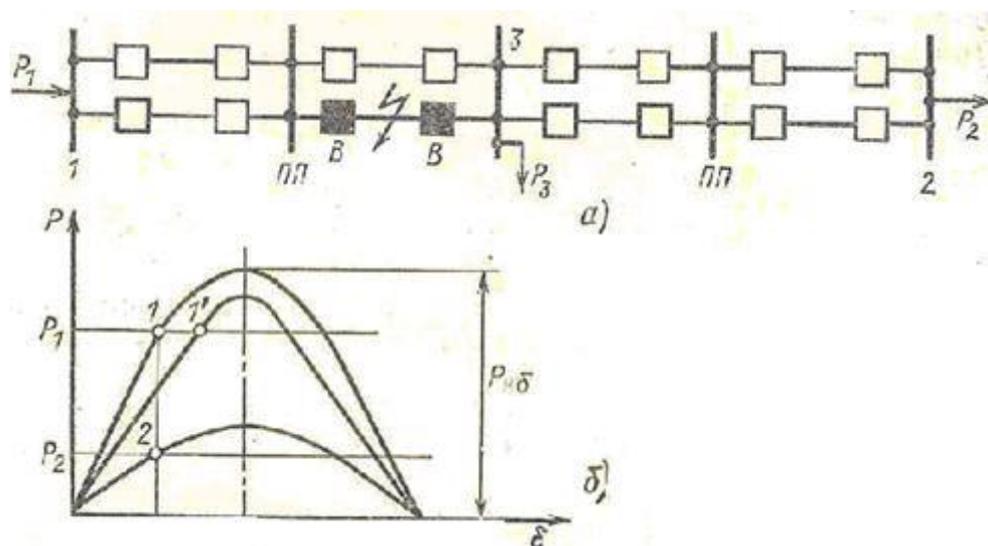
а, б- схемы в нормальном и после аварийном режимах; в — зависимости $P(\delta)$ в тех же режимах

Рисунок 9.1- Блочная схема дальней электропередачи

мощности электропередачи. Такая схема дешевле связанной, но менее надежна, и ее применение допустимо лишь при наличии большого резерва мощности в приемной системе.

Связанная схема предусматривает объединение параллельных цепей на промежуточных подстанциях (3 на рисунке 9.2, а), предназначенных для связи с промежуточными энергосистемами. По дальней передаче со связанной схемой можно передавать не только мощность P_2 в приемную энергосистему в конце передачи, но и мощность P_2 - в промежуточную энергосистему с шин подстанции 3. Возможность передачи мощности в промежуточные энергосистемы очень важна для эффективной работы объединенной энергосистемы.

Промежуточные подстанции делят линию электропередачи на участки, что способствует увеличению пропускной способности электропередачи, так как при повреждении участка отключается только цепь этого участка, а не вся линия.



а- принципиальная схема; б — зависимости $P(\delta)$

Рисунок 9.2- связанная схема дальней электропередачи

Кроме того, присоединение промежуточных энергосистем в определенной мере стабилизирует напряжение на подстанции, что также является косвенной мерой увеличения передаваемой по линии мощности. Если на начальном этапе сооружения электропередачи не предполагается строительство промежуточных подстанций, то тогда на линии предусматривают переключательные пункты (ПП на рисунке 9.2, а).

При эксплуатации линии очень важно, чтобы уменьшение $P_{\text{нб}}$ в послеаварийном режиме было допустимым. Результирующее сопротивление двух параллельных блоков в нормальном режиме (см. рисунок 9.1, а)

$$x_{\Sigma} = \frac{x_{\Gamma} + x_{\Gamma} + x_{\Delta}}{2}$$

Если из-за аварии отключится один блок, то $x_{\Sigma} = x_{Г} + x_{Г} + x_{Л}$ (см. рисунок 9.1,б). При этом x_{Σ} увеличится, что приведет к снижению $P_{мб}$. На рисунке 9.1,б приведены зависимости $P(\delta)$: 1 — для нормального и 2 — для послеаварийного режимов. В послеаварийном режиме $P_{мб}$ меньше, чем мощность первичного двигателя $P_{Г}$. Чтобы этого не происходило, нельзя допускать существенного снижения $P_{мб}$.

На дальних электропередачах со связанной схемой промежуточные подстанции или переключательные пункты (см. рисунок 9.2, а) делят длинную линию на короткие участки (200—400 км). Допустим, что сопротивление одной цепи линии равно $x_{Л}$ и длины всех участков одинаковы. При повреждении одной из цепей линии на каком-либо участке последний отключается выключателями промежуточных подстанций или переключательных пунктов с обеих сторон.

До аварии результирующее сопротивление линий равно

$$x_{рез} = x_{Л} / 2$$

После аварии отключается только поврежденный участок с сопротивлением $x_{Л} / 4$ и

$$x_{рез} = \frac{x_{Л}}{8} + \frac{x_{Л}}{4} + \frac{x_{Л}}{8} + \frac{x_{Л}}{8} = \frac{5x_{Л}}{8}$$

На рисунке 9.2,б: 1 — передаваемая мощность в нормальном режиме; 2 — в послеаварийном режиме без промежуточных подстанций или переключательных пунктов; 1' — в послеаварийном режиме с промежуточными подстанциями или переключательными пунктами.

Итак, пропускная способность двухцепных связанных электропередач длиной 800—1000 км повышается вследствие сооружения на линии переключательных пунктов и растет при увеличении их числа. Так, в случае сооружения одного переключательного пункта на линии 500 кВ указанной длины ее пропускная способность повышается на 30 % по сравнению со случаем, когда на линии отсутствуют переключательные пункты. При двух-трех переключательных пунктах пропускная способность линии увеличивается соответственно на 45 и 60 %. Сооружение переключательного пункта по затратам практически равноценно сооружению промежуточной подстанции (без учета стоимости трансформаторов). Поэтому необходимость строительства переключательных пунктов должна быть обоснована технико-экономическими расчетами.

Первые сооруженные в СССР и одни из первых в мире электропередачи 500 кВ Куйбышев (Волжская ГЭС им. Ленина)— Москва и Волгоград

(Волжская ГЭС им. XXII съезда)—Москва выполнены двухцепными. Для них приняты связанные схемы. Все переключательные пункты электропередачи Куйбышев — Москва, сооруженные на первом этапе строительства, были в дальнейшем преобразованы в промежуточные подстанции.

10 Лекция 10. Регулирование напряжения на ЛЭП сверхвысокого напряжения

Содержание лекции: регулирование напряжения на ЛЭП сверхвысокого напряжения.

Цели лекции: изучение способов и назначения регулирования напряжения на ЛЭП сверхвысокого напряжения

Напряжение U_2 на шинах подстанции в конце линии сверхвысокого напряжения необходимо регулировать так, чтобы оно не снижалось в нормальных и послеаварийных режимах и чтобы, в свою очередь не снижалась пропускная способность линии. Для регулирования напряжения в линиях сверхвысокого напряжения можно применять все способы. Особенно эффективно применение управляемых устройств поперечной компенсации: синхронных компенсаторов и статических источников реактивной мощности.

На мощных подстанциях применяются СК с регуляторами сильного действия. В этом случае они предназначены не только для регулирования напряжения, но и для повышения устойчивости электрической системы. Синхронные компенсаторы могут быть заменены ИРМ, выдающими в линию или поглощающими из нее реактивную мощность и обеспечивающими поддержание напряжения в точке их присоединения. Применение регулируемых устройств поперечной компенсации позволяет изменять характеристики линии, ее натуральную мощность и вести режим так, чтобы натуральная мощность всегда соответствовала передаваемой. При этом достигается наиболее благоприятное распределение напряжения вдоль линии, увеличивается ее пропускная способность.

Уже созданы управляемые (гибкие) шунтирующие реакторы электрических связей, нагрузка которых может быть задана вне зависимости от нагрузок любых других связей в электрической сети и управляться автоматически или вручную по заданному закону. Такими управляемыми электрическими связями являются линии электропередачи переменного тока:

1) связанные с остальной сетью трансформаторами с поперечным регулированием напряжения;

2) способные глубоко регулировать эквивалентные электрические параметры с помощью управляемых источников реактивной мощности;

3) оснащенные преобразователями частоты тиристорного (статического), электромеханического или какого-либо другого типа.

Управляемыми электрическими связями являются линии электропередачи и вставки постоянного тока, способные нести заданную нагрузку и связывать между собой электроэнергетические системы, работающие с различными значениями (как номинальными, так и мгновенными) частоты переменного тока.

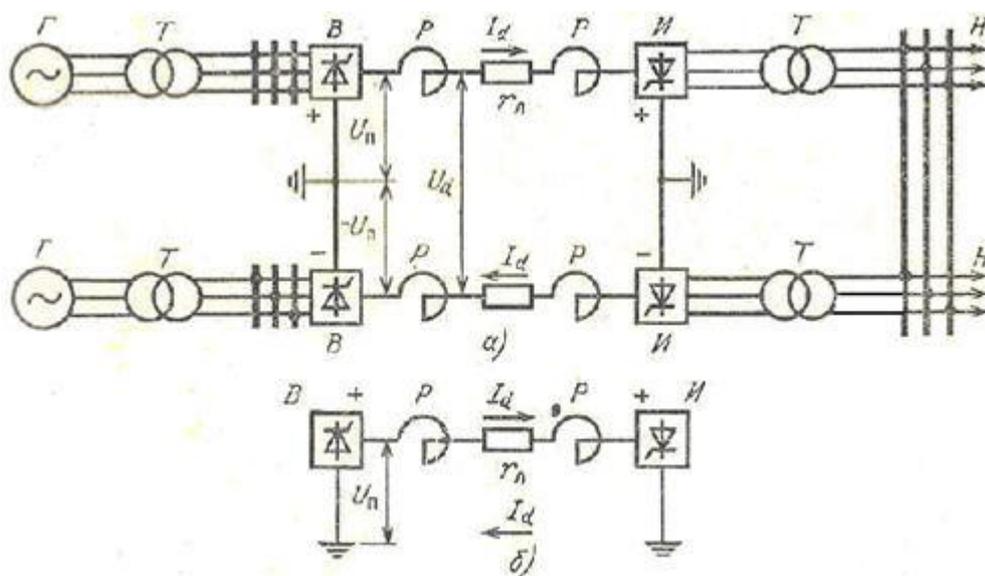
11 Лекция 11. Линии постоянного тока

Содержание лекции: назначение электропередач сверхвысокого напряжения постоянного тока их характеристики и особенности.

Цели лекции: изучение роли, преимуществ и перспективы развития электропередач постоянного тока сверхвысокого напряжения в современной энергетике.

Преимущества линий постоянного тока состоят в следующем. Предел передаваемой мощности по линии постоянного тока не зависит от ее длины и значительно больше, чем у передачи переменного тока. Снимается понятие предела по статической устойчивости, характерное для ЛЭП переменного тока. Энергосистемы, связанные ЛЭП постоянного тока, могут работать несинхронно или с различными частотами. Для ВЛ постоянного тока требуется лишь два провода вместо трех или даже один, если использовать в качестве второго землю.

На рисунке 11.1, а приведена схема передачи постоянного тока, осуществленная по биполярной схеме («два полюса— земля»).



а- нормальный режим; б — послеаварийный режим

Рисунок 11.1-Схема передачи постоянного тока

На этом рисунке В, И — преобразовательные (выпрямительная и инверторная) подстанции; Р — реактор или фильтр для уменьшения влияния высших гармоник, пульсации напряжения и аварийных токов; $r_{\text{л}}$ — сопротивление линии; Г, Т — генераторы и трансформаторы; Н — нагрузки подстанций.

Выработка и потребление электроэнергии осуществляются на переменном токе.

Основные элементы линии постоянного тока — управляемые высоковольтные выпрямители, из которых собираются схемы преобразовательных подстанций. Схема инверторной подстанции принципиально не отличается от схемы выпрямительной подстанции, так как выпрямители обратимы. Единственное отличие состоит в том, что на инверторной подстанции приходится устанавливать компенсирующие устройства, конденсаторы либо синхронные компенсаторы для выдачи инверторам реактивной мощности, которая составляет около 50—60 % передаваемой активной мощности.

Средние точки обеих преобразовательных подстанций в биполярной передаче заземлены, а полюсы изолированы.

Напряжение полюса $U_{\text{п}}$ равно напряжению между полюсом и землей. Например, на передаче Волгоград-Донбасс напряжение одного полюса относительно земли +400 кВ, а второго — -400 кВ. Напряжение $U_{\text{д}}$ между полюсами 800 кВ. Передача может быть разделена на две независимые цепи. В нормальном режиме при равных токах в цепях ток через землю близок к нулю. Обе цепи передачи могут работать автономно, и в случае аварии одного полюса половина мощности может передаваться по другому полюсу с возвратом через землю (см. рисунок 11.1,б). При аварии одного полюса или одной цепи вторая цепь может работать по униполярной схеме. В униполярной передаче (см. рисунок 11.1,б) заземлен один из полюсов и имеется один провод, изолированный от земли. Второй провод либо отсутствует, либо заземлен с двух сторон передачи. Такой заземленный второй провод применяется в тех случаях, когда недопустимо протекание тока в земле (например, при вводах в крупные города). Как правило, одна цепь униполярной передачи может состоять из одного провода и земли, а биполярная — из двух проводов, тогда как одна цепь линии переменного тока состоит из трех проводов. Описан опыт длительного пропускания через землю постоянного тока до 1200 А.

Униполярные передачи применяются для передачи небольших мощностей до 100—200 МВт на небольшие расстояния, например, при пересечении пролива для связи острова с материком. Большие мощности на большие расстояния целесообразно передавать по биполярным передачам. Преобразовательные подстанции из-за сложного и дорогостоящего

оборудования очень увеличивают стоимость передач постоянного тока. В то же время сама линия постоянного тока стоит дешевле, чем ЛЭП переменного тока, из-за меньшего количества проводов, изоляторов, линейной арматуры и более легких опор. Поэтому применение ЛЭП постоянного тока экономически оправдано при их очень большой длине, когда удорожание подстанций компенсируется удешевлением линии.

12 Лекция 12. Пропускная способность $P_{\text{нб}}$ ЛЭП постоянного тока

Содержание лекции: основная область применения передач постоянного тока — передача больших мощностей на дальние расстояния.

Цели лекции: изучение пропускной способности ЛЭП постоянного тока в современной энергетике.

Пропускная способность $P_{\text{нб}}$ ЛЭП постоянного тока определяется значением и разностью напряжений по концам линии, ограничивается активными сопротивлениями линии и концевых устройств, а также мощностью выпрямителей преобразовательных подстанций. Как отмечалось выше, $P_{\text{нб}}$ передачи постоянного тока значительно больше, чем передачи переменного тока. Полная мощность биполярной передачи Волгоград — Донбасс напряжением $U_d = 800$ кВ составляет 720 МВт. На основе опыта эксплуатации передачи Волгоград — Донбасс оказалось возможным перейти к сооружению крупнейшей в мире передачи постоянного тока Экибастуз — Центр с $U_{\text{л}} = \pm 750$, напряжением между полюсами $U_d = 1500$ кВ и длиной $l = 2500$ км. Пропускная способность цепи постоянного тока напряжением $U_d = 1500$ кВ может быть доведена до 6000 МВт. Экономическая граница применения передач переменного и постоянного тока лежит в диапазоне 800—1100 км для передач без промежуточных отборов мощности и 1100—1400 км для передач с промежуточными подстанциями в диапазоне мощностей от 600 до 3000 МВт. Для кабельных линий, ввиду высокой стоимости кабеля, эта граница резко снижается и составляет 70—80 км.

Основная область применения передач постоянного тока — передача больших мощностей на дальние расстояния. Однако особые свойства этих передач позволяют с успехом использовать их и в других случаях. Например, передачи постоянного тока оказываются эффективными при необходимости пересечения морских проливов, а также при связи несинхронных систем или систем, работающих с разной частотой (так называемые вставки постоянного тока).

Вопросы для самопроверки

1. В чем особенности электрического расчета ЛЭП сверхвысокого напряжения по схемам замещения с распределенными и сосредоточенными параметрами?
2. Что такое волновое сопротивление линии? Какие токи и напряжения оно связывает и как определяется?
3. Как изменятся волновые параметры линии ($\underline{Z}_c, \underline{\gamma}_0, \lambda, \lambda_E$) при внесении в нее (по длине) продольных емкостей и поперечных индуктивностей?
4. В чем особенности режима натуральной мощности и как зависит напряжение от длины линии при протекании мощности большей, чем натуральная?
5. В чем особенность режима холостого хода и малых нагрузок линий сверхвысокого напряжения?
6. Как зависит предельная передаваемая по линии мощность от длины линии?
7. Что такое пропускная способность линии, и каковы способы ее повышения?
8. Какие виды КУ, и для каких целей применяются в ЛЭП сверхвысокого напряжения?
9. Каковы принцип работы и область применения линий постоянного тока?

Список литературы

- 1 Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние передачи переменного и постоянного тока. М.: Энергоатомиздат 1985 г
- 2 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. М.: Энергоатомиздат 2003г.
- 3 Концепция энергетической программы Р.К. ж. Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. 1/93 Приложение к выпуску.
- 4 Правила устройства электроустановок Минэнерго СССР. 6-е издание М.: Энергоатомиздат, 2006 г.
- 5 Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения /под ред. Г.Н. Александрова и Л.Л. Петерсона. – Л.:, энергоиздат, 1983.
- 6 Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кВ/ под общей редакцией С.С. Рокотяна. – М.:, «Энергия», 1974.
- 7 Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / под ред. Г.Н. Александрова. – Л.:, 1987.
- 8 Александров Г.Н. Передача энергии переменным током. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
- 9 Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие/ А.А. Герасименко, В.Т.Федин В.Т. – Ростов- н/Д.: Феникс Красноярск: Издательские проекты, 2006.-720 с.

Содержание

Введение

Лекция 1 Общая характеристика линии электропередачи сверхвысокого напряжения.....

Лекция 2. Электрический расчет ЛЭП сверхвысокого напряжения.....

Лекция 3. Расчет ЛЭП сверхвысокого напряжения по схеме замещения с сосредоточенными параметрами.....

Лекция 4 Зависимость напряжения и передаваемой мощности от длины линии.....

Лекция 5. Компенсирующие устройства для ВЛСВН.....

Лекция 6. Определение наибольшей передаваемой мощности....

Лекция 7. Пропускная способность электропередачи.
Повышение пропускной способности линии...

Лекция 8. Особые режимы.....

Лекция 9. Схемы дальних электропередач.....

Лекция 10. Регулирование напряжения на ЛЭП сверхвысокого напряжения.....

Лекция 11. Линии постоянного тока.....

Лекция 12. Пропускная способность $I_{нб}^P$ ЛЭП постоянного тока

Список литературы.....