

Серия
«Высшее образование»

А. А. Герасименко,
В. Т. Федин

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Рекомендовано Научно-методическим советом
Международного научного общественного объединения
«МАИТ» для использования в качестве учебного пособия
для студентов образовательных учреждений высшего
образования, обучающихся по укрупнённой группе
специальностей 13.00.00 Электро- и теплоэнергетика
(рецензия № РЭЗ 22-15 от «25» сентября 2022 г.)*

Ростов-на-Дону
ФЕНИКС
2023

УДК 621.31(075.8)

ББК 31.279я73

КТК 230

Г37

Рецензенты:

профессор кафедры «Электроснабжение» Белорусского национального технического университета, докт. техн. наук, профессор *В. А. Анищенко*;

ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ), докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергетические системы» на базе ИСЭМ СО РАН Института энергетики ИРНТУ *И. И. Голуб*;

научный консультант института «Красноярскгражданпроект», канд. техн. наук, профессор, заслуженный энергетик Российской Федерации *Я. А. Кунгс*

Герасименко А. А.

Г37 Электрические системы и сети : учебное пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. — Ростов н/Д : Феникс, 2023. — 473 с. : ил. — (Высшее образование).

ISBN 978-5-222-38621-7

Учебное пособие содержит задачи и примеры расчёта и анализа электрических режимов, технико-экономических показателей, оптимизации проектных решений и режимов работы электрических сетей и линий электропередачи. Расчётам предшествуют краткие теоретические сведения. Решения и иллюстрации сопровождаются подробными пояснениями, комплексным инженерным анализом с применением ЭВМ, способствующими большему пониманию технологии решения практических задач. Приведены задачи и примеры для самостоятельного решения, которые могут использоваться для проведения различных аттестационных мероприятий студентов электроэнергетических специальностей.

Пособие предназначено для студентов электроэнергетических специальностей, может быть полезно инженерам, аспирантам, магистрам и бакалаврам.

ISBN 978-5-222-38621-7

УДК 621.31(075.8)

ББК 31.279я73

© Герасименко А. А., Федин В. Т., 2022

© Оформление: ООО «Феникс», 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов электроэнергетических специальностей вузов, приобретающих квалификацию по электроэнергетическим системам, электрическим сетям, электрическим станциям, системам электроснабжения, а также для студентов смежных электроэнергетических специальностей. Книга может быть использована бакалаврами, магистрантами, аспирантами, инженерами и научными работниками, связанными с эксплуатацией, проектированием и исследованием электроэнергетических систем и сетей, систем электроснабжения различного назначения.

Данное учебное пособие является результатом продолжительного международного сотрудничества в рамках союзного государства кафедры «Электроэнергетика» («Электрические станции и электроэнергетические системы») Сибирского федерального университета — Российская Федерация и кафедры «Электрические системы» Белорусского национального технического университета — Республика Беларусь и отражает продолжение работы авторов [12, 13], выполненной в рамках этого сотрудничества.

Учебное пособие, представляющее сборник задач с решениями, является междисциплинарным; материал книги соответствует ряду основных электроэнергетических дисциплин, которые предусмотрены образовательными стандартами Российской Федерации и Республики Беларусь.

Все задачи, включённые в пособие, разработаны авторами в результате многолетнего проведения практических занятий со студентами и магистрантами, контрольных и аттестационных мероприятий по дисциплинам данного направления в вышеуказанных вузах. Также использованы результаты, полученные в дипломных работах и диссертациях студентов и магистрантов, выполненных под руководством авторов.

В пособие включены как решённые задачи, так и задачи и задания для самостоятельной проработки.

Материал пособия содержит краткие теоретические сведения, разносторонние численные примеры постановки и решения задач расчёта и анализа рабочих режимов, технико-экономических показателей, оптимизации проектных решений и режимов работы электрических сетей различных классов номинальных напряжений, состава и конфигурации.

Решение задач сопровождается подробными пояснениями, в ряде случаев — разными вариантами решения, имеющими исследовательский характер. При этом расчёты режимов на ЭВМ используются в составе вычислительных алгоритмов, реализующих инженерные методики решения комплексных задач, а также в качестве эталонных. Отдельные комплексные задачи являются сквозными и проходят через несколько глав, в которых приводятся различные аспекты их решения. Сочетание инженерных решений с расчётами на ЭВМ будет способствовать большему пониманию технологии решения практических задач.

Учебное пособие состоит из шести глав, введения (предисловия), заключения, списка литературы.

В главе 1 реализованы основные принципы выбора проводников распределительных линий различного исполнения, расчёта и анализа рабочих режимов распределительных сетей и их пропускной способности, обеспечение заданных режимов напряжения средствами их регулирования и улучшения.

В главе 2 представлены примеры инженерных расчётов и анализа рабочих режимов электропередач транспорта мощности в приёмную систему и районы электропотребления с определением их пропускной способности и допустимых электрических режимов.

В главе 3 характеризуются традиционные и новые математические модели протяжённых линий электропередачи

с сопоставлением результатов расчёта режимов по различным моделям.

В главе 4 приведены численные иллюстрации инженерных расчётов токо- и потокораспределения и напряжений в простых и сложнзамкнутых электрических сетях с приближённым и полным учётом неоднородности параметров схем замещения.

В главе 5 выполнены расчёты, сопоставления и анализ характеристик экономической эффективности режимов и интегральных характеристик многорежимности, являющихся информационной основой решения ряда задач эксплуатации и проектирования электрических сетей и линий электропередачи.

В главе 6 приведены расчётные примеры оптимизации электрических режимов и проектных решений (оптимизационных задач в эксплуатационной и проектной постановках) электрических сетей и линий электропередачи.

Задачи для самостоятельного решения, имеющиеся в каждой главе, также могут быть применены для подготовки системы тестов, используемых при диагностике компетенции студентов по материалам электроэнергетических дисциплин.

Список литературы содержит основные книги по решению практических задач электрических сетей, учебники, учебные пособия и периодические источники, которые могут быть использованы для более полного уяснения значения и сути тематики задачи и углублённого изучения соответствующих расчётных методов и алгоритмов. С этой целью в тексте сделаны соответствующие ссылки.

Обращаем внимание читателей на символику комплексных величин, принятую в тексте: синусоидальные величины (напряжение, ток) обозначены \dot{U} , \dot{I} (сопряженные — соответственно \dot{U}^* , \dot{I}^*), остальные (мощность, сопротивление, проводимость, коэффициент трансформации) — как \underline{S} , \underline{Z} , \underline{Y} , \underline{k} , сопряженные — соответственно \dot{S}^* , \dot{Z}^* , \dot{Y}^* , \dot{k}^* .

Главы 1, 5 написаны А.А. Герасименко, главы 2, 4 — В.Т. Фединым, главы 3, 6 подготовлены авторами совместно, разработка структуры, корректировка содержания пособия выполнены обоими авторами.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам за внимательное прочтение рукописи и ряд полезных замечаний.

Глава 1

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

1.1. Задачи и особенности расчёта и анализа электрических режимов распределительных сетей

Распределение электрической энергии (ЭЭ) по территориям городов, промышленных предприятий и сельских районов, непосредственная ее доставка потребителям возлагаются на распределительные (местные) сети электроэнергетических систем и отраслевых систем электроснабжения. Отмеченные функции выполняют, как правило, электрические сети с номинальным напряжением 0,22–35 кВ.

Электрическими сетями более высоких классов номинальных напряжений, вплоть до 220 кВ, распределение ЭЭ выполняется в промышленных районах со значительной концентрацией электрических нагрузок (предприятия металлургии, тяжёлого машиностроения и др.).

Распределительные сети являются наиболее массовыми и разветвлёнными. Суммарная протяжённость их многократно превышает длину линий более высоких классов напряжений. Главная особенность распределительных электрических сетей — непосредственная связь, взаимодействие с потребителями ЭЭ. Целью эксплуатационных расчётов, анализа режимов рассматриваемых сетей является определение параметров электрического состояния (режима): значений и изменений напряжений в узлах, токовых нагрузок и перетоков мощности по ветвям, потерь напряжений и мощностей, анализируя которые устанавливаются допустимость таких состояний, удалённость их от предельно-допустимых, возможность подключений новых потребителей.

В результате таких расчётов, анализа параметров режимов и их изменений появляется возможность установить, какие воздействия и в каком месте рассматриваемой сети их реализовать, чтобы параметры электрического режима сети, показатели качества ЭЭ приняли желаемые (оптимальные) или нормативные значения. Результаты расчётного анализа режимов являются информационной основой для решения ряда задач их улучшения и управления, обеспечения пропускной способности рассматриваемых сетей.

При проектировании новой сети или реконструкции существующей основной задачей электрических расчётов является экономически обоснованный выбор площади сечения проводов, регулирующих и компенсирующих устройств, которые обеспечивают возможность передачи необходимой мощности и требуемого качества электроэнергии у потребителей.

В данной главе рассматриваются и анализируются рабочие режимы элементарных разомкнутых сетей и отдельных участков, характеризующихся наиболее простой схемой замещения, линии и трансформаторы которых допустимо моделировать только продольными элементами.

Разомкнутой называется сеть, электроприёмники которой получают ЭЭ только с одной стороны (от одного источника питания). Расчёты таких электрических сетей, отдельных линий электропередачи, в общем случае, довольно простые и базируются на классических выражениях и соотношениях электротехники, приведённых в главе 1. Взаимодействие этих выражений в определённой последовательности в итоге формирует методики и вычислительные алгоритмы решений, представленные в данной и последующих главах.

Отметим особенности и допущения, при которых рассчитываются параметры режима данных сетей. Центром питания района распределительной сети, как правило, являются шины низшего напряжения (НН) районной подстанции, главной понизительной подстанции предприятия

или шины генераторного напряжения ТЭЦ. В качестве центра питания могут рассматриваться сборные шины, на которых осуществляется регулирование напряжения по заданному правилу (закону). Узел с таким свойством и достаточным резервом активной и реактивной мощностей в распределительной сети может рассматриваться в качестве балансирующего узла по мощности и базисного (опорного) по напряжению. Нередки расчётные случаи, когда питающими узлами с заданными напряжениями принимаются сборные шины НН понижающих подстанций с нерегулируемыми трансформаторами, не обеспечивающими соответственно неизменность напряжения. Такие узлы условно принимаются в качестве базисных по напряжению.

Незначительные фазовые смещения синусоид напряжения в узлах сети по отношению к балансирующему (не более $2-3^\circ$) принимаются равными нулю. Такое допущение означает неучёт поперечной составляющей падения напряжения и соответственно отличие напряжений в узлах на величину потерь напряжения в соединяемых их ветвях.

Нагрузки во всех i -х узлах, кроме балансирующего, задаются неизменными значениями мощностей

$$\underline{S}_i = \sqrt{3} \dot{U}_i \cdot I_i^* = P_i + jQ_i — \text{const},$$

или мощностями, изменяющимися в соответствии со статическими характеристиками по напряжению

$$\underline{S}_i(U_i) = P_i(U_i) + jQ_i(U_i),$$

а также постоянными величинами токов

$$\dot{I}_i = I_{ai} - jI_{pi} — \text{const},$$

которые могут уточняться с учётом изменений или фактических значений напряжений:

$$\dot{I}_i(U_i) = \frac{\dot{S}_i^*}{\sqrt{3}U_i^*} = \frac{\dot{S}_i^*}{\sqrt{3}U_i} = I_{ai}(U_i) - jI_{pi}(U_i).$$

Отметим связи параметров электрического режима и схемы замещения, выделив зависимости начала и конца звена (участка) электрической сети следующими классическими соотношениями.

Для линии электропередачи (участка сети), обладающей активным R и индуктивным X сопротивлениями (рис. 1.1), по данным конца участка \dot{I} , \underline{S}_2 получим напряжение в начале

$$U_1 = U_2 + \Delta U = U_2 + \sqrt{3} \cdot (I_a R + I_p X) = U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2},$$

где ΔU — потеря напряжения, принимаемая равной продольной составляющей $\Delta U \approx \Delta U'$ падения напряжения, определяемой по закону Ома.

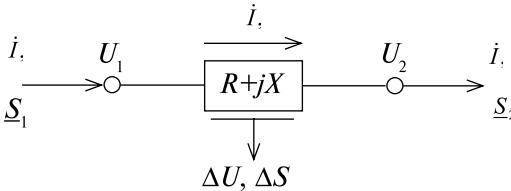


Рис. 1.1. Схема замещения линии электропередачи с обозначениями параметров электрического состояния

Поскольку в звене сети присутствуют только продольные элементы схемы замещения, представленные сопротивлениями R и X , ток в начале и конце звена остаётся неизменным, равным \dot{I} .

Мощность в начале участка

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= \underline{S}_2 + \Delta \underline{S} = \underline{S}_2 + 3 \cdot (I_a^2 + I_p^2) \cdot (R + jX) = \\ &= \underline{S}_2 + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) = P_1 + jQ_1, \end{aligned}$$

где $\Delta \underline{S}$ — потери мощности, определяемые в соответствии с законом Джоуля–Ленца.

Аналогично по данным начала вычисляется напряжение U_2 в конце участка:

$$U_2 = U_1 - \Delta U = U_1 - \sqrt{3} \cdot (I_a R + I_p X) = U_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1}$$

и мощность в конце участка

$$\begin{aligned} \underline{S}_2 &= \underline{S}_1 - \Delta \underline{S} = \underline{S}_1 - 3 \cdot (I_a^2 + I_p^2) \cdot (R + jX) = \\ &= \underline{S}_1 - \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot (R + jX) = P_2 + jQ_2. \end{aligned}$$

Отметим, что в общем случае справедливо равенство

$$\dot{I} = \frac{\overset{*}{S}_1}{\sqrt{3} \overset{*}{U}_1} = \frac{\overset{*}{S}_2}{\sqrt{3} \overset{*}{U}_2} = I_a - jI_p,$$

и в данном частном случае аналогично имеем

$$\dot{I} = \frac{\overset{*}{S}_1}{\sqrt{3} \overset{*}{U}_1} = \frac{\overset{*}{S}_2}{\sqrt{3} \overset{*}{U}_2} = I_a - jI_p,$$

что обуславливает одинаковые значения потерь напряжения и потерь мощности, вычисленных по данным начала или конца участка. То есть

$$\begin{aligned} \Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U &= \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}, \\ \Delta \underline{S}_1 = \Delta \underline{S}_2 = \Delta \underline{S} &= \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot (R + jX) = \\ &= \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) = \Delta P + j\Delta Q. \end{aligned}$$

Для трансформаторной ветви, характеризуемой активным R_T и реактивным X_T сопротивлениями и трансформацией $k = U_{\text{вн}} / U_{\text{нн}}$ (рис. 1.2), именуемой идеальным трансформатором, не обладающим сопротивлениями, где $U_{\text{вн}}$, $U_{\text{нн}}$ — изменяемое (регулируемое) и неизменное номинальные напряжения соответственно обмоток высшего и низшего напряжений, отметим следующие соотношения.

По данным конца участка получим трансформируемые (преобразуемые) значения тока и напряжения:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \cdot \frac{1}{k}; \quad \dot{U}'_2 = U_2 \cdot k.$$

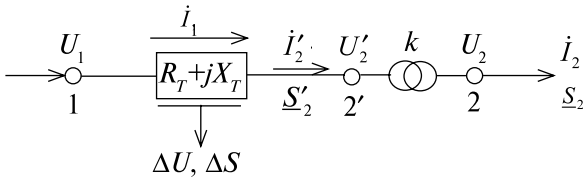


Рис. 1.2. Схема замещения трансформатора с обозначениями параметров электрического режима

При этом не теряется мощность на идеальном трансформаторе, т.е. $\underline{S}'_2 = \underline{S}_2$.

С учётом трансформируемых параметров получим напряжение U_1 и мощность \underline{S}_1 в начале трансформаторной ветви:

$$U_1 = U_2' + \Delta U_T = U_2' + \sqrt{3} \cdot (I_{a1} R_T + I_{p1} X_T) = U_2' + \frac{P_2 R_T + Q_2 X_T}{U_2'};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta \underline{S} = \underline{S}_2 + 3 \cdot (I_{a1}^2 + I_{p1}^2) \cdot (R_T + jX_T) =$$

$$= \underline{S}_2 + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2'^2} \cdot (R_T + jX_T) = P_1 + jQ_1.$$

По данным начала получаем трансформируемое напряжение и мощность в конце ветви равны:

$$U_2' = U_1 - \Delta U_T = U_1 - \sqrt{3} \cdot (I_{a1} R_T + I_{p1} X_T) = U_1 - \frac{P_1 R_T + Q_1 X_T}{U_1};$$

$$\underline{S}'_2 = \underline{S}_2 = \underline{S}_1 - \Delta \underline{S}_T = \underline{S}_1 - 3 \cdot (I_{a1}^2 + I_{p1}^2) (R_T + jX_T) =$$

$$= \underline{S}_1 - \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot (R_T + jX_T) = P_2 + jQ_2.$$

Напряжение и ток в конце ветви в результате трансформации

$$U_2 = U_2' / k; \quad I_2 = I_2' \cdot k.$$

Рассмотрим режимные соотношения при установке конденсаторных компенсирующих устройств продольного и поперечного включения. Данные устройства применяются для регулирования напряжения, снижения потерь мощности и электроэнергии, увеличения пропускной способности сети.

Включение конденсаторной установки (с ёмкостью C_k и сопротивлением $X_k = 1/\omega C_k$) последовательно в линию электропередачи компенсирует (снижает) её индуктивное сопротивление до величины $X - X_k$ (рис. 1.3). Для данной линии электропередачи определяются напряжение U_1 и мощность \underline{S}_1 в начале по напряжению U_2 и мощности \underline{S}_2 в конце линии следующим образом:

$$U_1 = U_2 + \Delta U = U_2 + \sqrt{3} \cdot [I_a R + I_p (X - X_k)] = U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 (X - X_k)}{U_2};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta \underline{S} = \underline{S}_2 + 3 \cdot (I_a^2 + I_p^2) \cdot [R + j(X - X_k)] =$$

$$= \underline{S}_2 + \frac{(P_2^2 + Q_2^2)}{U_2^2} \cdot [R + j(X - X_k)] = P_1 + jQ_1.$$

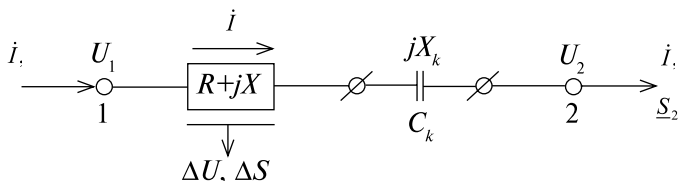


Рис. 1.3. Схема замещения линии электропередачи с конденсаторной батареей последовательного включения

Аналогично определяются напряжение U_2 и мощность \underline{S}_2 в конце участка по данным начала:

$$U_2 = U_1 - \Delta U = U_1 - \sqrt{3} \cdot [I_a R + I_p (X - X_k)] = U_1 - \frac{P_1 R + Q_1 (X - X_k)}{U_1};$$

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_1 - \Delta \underline{S} = \underline{S}_1 - 3 \cdot (I_a^2 + I_p^2) \cdot [R + j(X - X_k)] =$$

$$= \underline{S}_1 - \frac{(P_1^2 + Q_1^2)}{U_1^2} \cdot [R + j(X - X_k)].$$

Последовательно включенные конденсаторы являются источниками реактивной мощности

$$Q_k = 3I^2 X_k = \Delta U_k^2 \omega C_k,$$

величина которой определяется потерей напряжения

$$\Delta U_k = -\sqrt{3}I_p X_k$$

на выводах последовательно включенных конденсаторов. С учётом генерации Q_k поток реактивной мощности в линии снижается до величины $Q_2 - Q_k$, что определяет дополнительное снижение потерь мощности и напряжения.

Включение конденсаторной установки параллельно нагрузке (поперечное включение) компенсирует потребление реактивных нагрузок и изменяет токо- и потокораспределение на участке сети (рис. 1.4). Нагрузка в сети после включения конденсаторной батареи принимает значения

$$\dot{I} = I_a - jI_p = I_{a2} - j(I_{p2} - I_k), \quad \underline{S}'_2 = P_2 + j(Q_2 - Q_k),$$

в соответствии с которыми связь напряжений и мощностей конца и начала ветви определяется через параметры U_2, \underline{S}'_2 конца участка:

$$\begin{aligned} U_1 = U_2 + \Delta U &= U_2 + \sqrt{3} \cdot [I_a R + (I_{p2} - I_k) X] = \\ &= U_2 + \frac{P_2 R + (Q_2 - Q_k) X}{U_2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 = P_2 + j(Q_2 - Q_k) + \Delta \underline{S} &= P_2 + j(Q_2 - Q_k) + 3 \cdot [I_{a2}^2 + (I_{p2} - I_k)^2] \times \\ \times (R + jX) &= P_2 + j(Q_2 - Q_k) + \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_k)^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) = P_1 + jQ_1. \end{aligned}$$

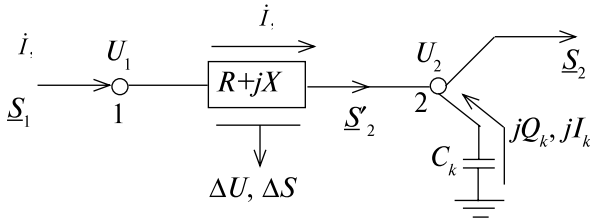


Рис. 1.4. Схема замещения линии электропередачи с конденсаторной батареей параллельного включения

Аналогично выразим взаимосвязь параметров режима начала и конца участка через параметры U_1 , \underline{S}'_1 начала:

$$U_2 = U_1 - \Delta U = U_1 - \sqrt{3} \cdot (I_a R + I_p X) = U_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1};$$

$$\underline{S}'_2 = \underline{S}_1 - \Delta \underline{S} = \underline{S}_1 - 3 \cdot (I_a^2 + I_p^2) \cdot (R + jX) = \underline{S}_1 - \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot (R + jX);$$

$$\underline{S}_2 = \underline{S}'_2 + jQ_k = P_2 + jQ_2.$$

В приближённых расчётах для вычисления потерь напряжения ΔU и потерь мощности $\Delta \underline{S}$ вместо фактических напряжений U_1 и U_2 используют их номинальные значения или лучшие приближения напряжений в узлах.

Приведённые классические выражения и соотношения к различным объектам распределительных электрических сетей положены в основу алгоритмов расчёта и анализа режимных параметров и управления ими. Численные иллюстрации таких алгоритмов в решении ряда задач рассматриваются ниже.

1.2. Решения задач

Задачи данной главы отражают следующие направления расчётного анализа режимов распределительных сетей.

1. Расчёты параметров нормальных установившихся электрических режимов.
2. Централизованное и местное регулирование и улучшение напряжения.
3. Определение предельных режимов и пропускной способности линий электропередачи.
4. Выбор площади сечений проводников.
5. Анализ электрических режимов и решений.

Обоснование величины допустимых потерь напряжения в линиях напряжением 6–10 кВ, питающих нерегулируемые трансформаторы, непосредственно связанных с электропотребителями, является необходимым условием для правильного выбора проводников линий и эффективного

централизованного регулирования напряжения, обеспечения его качества у потребителей. Пример такого обоснования рассматривается в последующей задаче.

Задача 1.1

Определить наибольшую допустимую потерю напряжения $\Delta U_{\text{доп}}$ для линии W электропередачи с номинальным напряжением 10 кВ в составе радиальной электрической сети, приведённой на рис. 1.5. Наибольшая нагрузка трансформатора ТМ-1000/10 (с параметрами $u_{\text{к}} = 5,5\%$, $Z = 1,22 + j5,36$ Ом, ПБВ $\pm 2 \times 2,5\%$) не превышает номинальной. Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,80$.

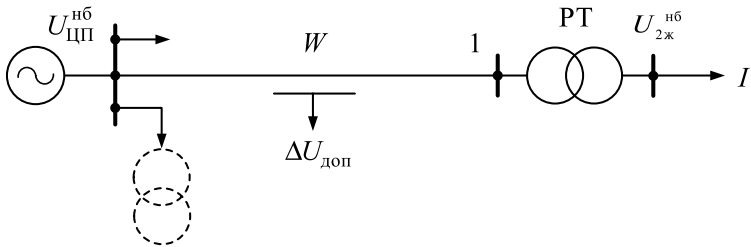


Рис. 1.5. Схема электрической сети напряжением 10 кВ

Решение. Центром (источником) питания (ЦП) данной распределительной сети 10 кВ могут быть шины низшего напряжения (НН) подстанций с высшим напряжением (ВН) 35–220 кВ или шины генераторного напряжения ТЭЦ.

На шинах НН 0,4 кВ распределительной подстанции 6–10 кВ и источнике питания данной электропередачи поддерживаются напряжения $U_{2\text{ж}}^{\text{нб}}$ и $U_{\text{ЦП}}^{\text{нб}}$, повышенные относительно номинального сети низшего напряжения и высоковольтной линии. Соответствующие добавки напряжения δE необходимы для компенсации потерь напряже-

ния в линиях, увеличивающихся с ростом электрических нагрузок или протяжённости линий. Наибольшее желаемое напряжение ($U_{2ж}^{нб} \leq 0,42$ кВ) на шинах НН распределительной подстанции ограничено значением, не превышающим $1,10 U_{ном}$ сети низшего напряжения, что обусловлено требованием стандарта на качество электрической энергии [19]. Примем $U_{2ж}^{нб} = U_{НН} = 0,40$ кВ.

Наибольшее значение напряжения на шинах центра питания $U_{цп}^{нб}$ можно принять равным допустимому значению рабочего напряжения (принимаемого, как правило, равным $1,05 U_{отв}^{нб} \approx 11,0$ кВ) наибольшего ответвления обмотки ВН распределительных трансформаторов, которые могут быть подключены вблизи источника (показано пунктиром).

Допустимые отклонения напряжения у всех электропотребителей, присоединённых к сети 0,38 кВ, могут быть обеспечены с помощью регулирования напряжения в центре питания и соответствующего выбора рабочих ответвлений распределительных трансформаторов. Единственным условием является непревышение допустимых потерь напряжения в данной линии электропередачи.

Обоснование наибольшей величины допустимых потерь на линии W позволяет при проектировании минимизировать затраты на проводниковый металл и инвестиции на сооружение линии, а в условиях эксплуатации планировать для действующих линий рост электрических нагрузок, подключение новых потребителей.

Оценку допустимой потери напряжения на линии дадим применительно к схеме замещения электрической сети (рис. 1.6).

При установке ответвления с наименьшим номинальным напряжением 9,50 кВ (ответвление № V, таблица 1.1) можно допустить наиболее низкое значение напряжения на входе трансформатора U_1 и следовательно, наибольшую величину потерь напряжения ΔU в линии. Однако для сохранения возможности подключения новых потребителей в пределах допустимой загрузки трансформатора

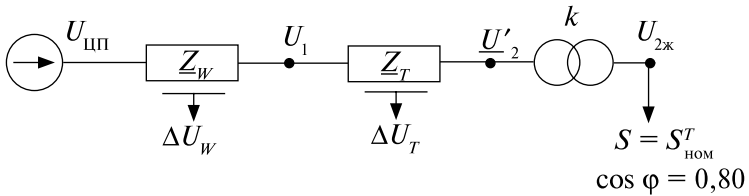


Рис. 1.6. Схема замещения электрической сети напряжением 10 кВ

установим переключатель в положение № IV с номинальным напряжением ответвления

$$U_{\text{отв IV}} = U_{\text{ВН}} - \frac{2,5}{100} \cdot U_{\text{ВН}} = 10,0 - 0,025 \cdot 10,0 = 9,75 \text{ кВ}$$

и коэффициентом трансформации

$$k_{\text{IV}} = \frac{U_{\text{отв IV}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{9,75}{0,40} = 24,38,$$

с учётом которого получим трансформируемое напряжение

$$U'_2 = U_{2\text{ж}} k_{\text{IV}} = 0,40 \cdot 24,38 = 9,75 \text{ кВ.}$$

Таблица 1.1

Рабочие ответвления трансформаторов с ПБВ

№ ответвления обмотки ВН	I	II	III	IV	V
$\delta U_{\text{ном}}^{\text{отв}}, \%$	+5,0	+2,5	0	-2,5	-5,0
$U_{\text{ном}}^{\text{отв}}, \text{кВ}$	10,5	10,25	10,0	9,75	9,50
Надбавка напряжения трансформатора, %	0	2,5	5,0	7,5	10,0

Для определения напряжения на входе трансформатора необходимо учесть потери напряжения в нём. При номинальной нагрузке трансформатора имеем

$$\Delta U_T \approx \Delta U' = \frac{S}{U_{\text{ном}}} \cdot (R_T \cos \varphi + X_T \sin \varphi) \cdot 10^{-3} =$$

$$= \frac{1000}{10} \cdot (1,22 \cdot 0,80 + 5,36 \cdot 0,60) \cdot 10^{-3} = 0,419 \text{ кВ.}$$

Отметим незначительное влияние поперечной составляющей падения напряжения

$$\begin{aligned} \delta U'' &= \frac{S}{U} \cdot (X \cos \varphi - R \sin \varphi) \cdot 10^{-3} = \\ &= \frac{1000}{10} \cdot (5,36 \cdot 0,80 - 1,22 \cdot 0,60) \cdot 10^{-3} = 0,356 \text{ кВ} \end{aligned}$$

на потери напряжения в трансформаторе

$$\Delta U_T \approx \Delta U' + \frac{\delta U''^2}{2U_{\text{ном}}} = 0,419 + \frac{0,356^2}{2 \cdot 10} = 0,425 \text{ кВ.}$$

В системах электроснабжения и распределения электрической энергии 6–20 кВ довольно часто электрические нагрузки задаются в токах. Составляющие комплексного тока нагрузки, приведённые к ВН распределительных трансформаторов, выразим в следующем виде:

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{S}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} \cdot \cos \varphi = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10} \cdot 0,80 = \frac{80}{\sqrt{3}} \text{ А}; \\ I_p &= \frac{S}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} \cdot \sin \varphi = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10} \cdot 0,60 = \frac{60}{\sqrt{3}} \text{ А.} \end{aligned}$$

Для сопоставления с предыдущим вычислением выразим потери напряжения через токовые составляющие нагрузки:

$$\begin{aligned} \Delta U_T &= \sqrt{3} \cdot (I_a R + I_p X) \cdot 10^{-3} = \\ &= (80 \cdot 1,22 + 60 \cdot 5,36) \cdot 10^{-3} = 0,419 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Отметим, что модуль падения напряжения при номинальной нагрузке трансформатора

$$\Delta \dot{U} \Big| = \{\Delta U'^2 + \delta U''^2\}^{1/2} = \{0,419^2 + 0,356^2\}^{1/2} = 0,550 \text{ кВ}$$

в относительных единицах равен напряжению короткого замыкания трансформатора

$$\Delta U_{T*} = u_k = \frac{|\Delta \dot{U}|}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{0,550}{10} \cdot 100\% = 5,5\%.$$

С учётом потерь напряжения ΔU_T получим напряжение на входе РТ:

$$U_1 = U'_2 + \Delta U_T = 9,75 + 0,425 \approx 10,17 \text{ кВ}.$$

В итоге наибольшая допустимая потеря напряжения на линии составляет

$$\Delta U_{\text{доп}} = \Delta U_W = U_{\text{щп}} - U_1 = 11,0 - 10,17 = 0,83 \text{ кВ}$$

и относительно номинального напряжения линии имеем

$$\Delta U_{\text{доп}*} = \frac{0,83}{10} \cdot 100\% = 8,3\%.$$

На основе опыта проектирования и эксплуатации систем электроснабжения и распределения электрической энергии допустимую потерю напряжения обычно принимают для сетей напряжением 6–20 кВ $\Delta U_{\text{доп}} = 6\text{--}8\%$ от номинального напряжения сети, а для сетей напряжением 0,38 кВ — $\Delta U_{\text{доп}} = 5\text{--}6\%$ [26]. По другим оценкам [5], допустимая потеря напряжения в сетях 6–20 кВ может быть увеличена до 10%.

Ниже приводится обоснование предельно-допустимых режимов по напряжению применительно к электропередаче с регулируемым трансформатором, для которой сформированы возможные конструктивные и режимные параметры.

Задача 1.2

Для электропередачи с номинальным напряжением 35 кВ (рис. 1.7) и средними для данного класса напряжения значениями передаваемой мощности и протяжённости линии определить допустимую потерю напряжения.

Решение. Сформируем средние условия работы электропередачи такого класса, руководствуясь данными пропускной способности [12, 13, табл. 1.1]: $P = 5,0 - 10,0$ МВт;



Рис. 1.7. Схема электропередачи

$L = 30 - 50$ км. Примем средние значения передаваемой мощности $P = 7,5$ МВт и длины линии $L = 40$ км. По экономическим и конструктивным условиям ВЛ 35 кВ монтируются проводом с площадью сечения от 70 до 150 мм². Для дальнейшего расчётного анализа рассматриваем марку провода АС 120/19 с удельными параметрами $Z_0 = 0,25 + j0,40$ Ом/км. Приняв относительно высокое значение коэффициента мощности $\cos \varphi = 0,90$, получим полную мощность потребления с шин подстанции

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{7,5}{0,90} = 8,33 \text{ МВ} \cdot \text{А},$$

которая может быть передана без перегрузки из сети 35 кВ в сеть 10 кВ трансформатором ТМН-10000/35 с номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 10$ МВ · А.

Схемно-режимные параметры электропередачи. Анализ электрических режимов электропередачи следует вести применительно к её схеме замещения (рис. 1.8).

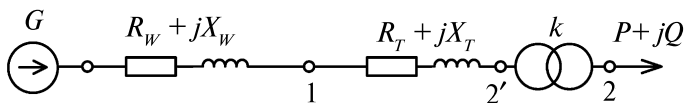


Рис. 1.8. Схема замещения электропередачи

Сформулируем параметры схемы замещения. Для линии электропередачи имеем

$$Z_w = Z_0 \cdot L = (0,25 + j0,40) \cdot 40 = 10,0 + j16,0 \text{ Ом}.$$

Для трансформатора ТМН-10000/35 в соответствии с данными [12, 13, табл. П. 2.3] имеем номинальные напряжения обмоток высшего напряжения $U_{\text{ВН}} = 36,75$ кВ,

низшего напряжения $U_{\text{НН}} = 11$ кВ. Тогда номинальный коэффициент трансформации (идеальный трансформатор)

$$k = k_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} = \frac{36,75}{11} = 3,34.$$

Трансформатор оборудован автоматическим устройством регулирования напряжения с регулятором (переключателем) ответвлений обмотки ВН под электрической нагрузкой — устройством РПН с данными $\pm n \times \Delta k_T = \pm 9 \times 1,78\%$, где $\pm n$ — количество положений переключателя относительно центрального вывода обмотки ВН с шагом переключения (регулирования) Δk_T . Сквозное сопротивление трансформатора $Z_n = 0,88 + j10,1$ Ом.

Мощность нагрузки подстанции $P = 7,5$ МВт. С учётом реактивной составляющей нагрузки

$Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = P \cdot \operatorname{tg} \arccos \varphi = 7,5 \cdot \operatorname{tg} \arccos 0,90 = 3,63 \approx 3,6$ Мвар
полная (кажущаяся) мощность электропотребления составит

$$S = P + jQ = 7,5 + j3,6 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Анализ предельных напряжений электропередачи. Обоснование значения допустимой потери напряжения. Шины вторичного напряжения подстанции, подключенные к трансформатору с автоматическим регулированием напряжения, являются источником (центром) питания для линий и электропотребителей распределительной электрической сети 10 кВ. На шинах такого источника (узел 2) с целью компенсации (покрытия) потерь напряжения в линиях распределительной сети необходимо поддерживать повышенное напряжение. Соответствующая добавка напряжения к номинальному напряжению линий обеспечивается в соответствии с принципом встречного (согласного) регулирования напряжения [13, 39] величиной до 5–10%.

Соответственно примем на вторичных шинах подстанции напряжение равным

$$U_2 = 1,05 \cdot U_{\text{ном}} = 1,05 \cdot 10 = 10,5 \text{ кВ}.$$

Тогда при номинальной трансформации получим трансформируемое напряжение (рис. 1.8)

$$U'_2 = U_2 k_{\text{ном}} = 10,5 \cdot 3,34 = 35,07 \text{ кВ.}$$

С учётом потерь напряжения в обмотках трансформатора

$$\Delta U_T = \frac{PR_T + QX_T}{U'_2} = \frac{7,5 \cdot 0,88 + 3,6 \cdot 10,1}{35,07} = 1,22 \text{ кВ}$$

получим напряжение на входе трансформатора (на шинах ВН подстанции)

$$U_1 = U'_2 + \Delta U' = 35,07 + 1,22 = 36,29 \text{ кВ.}$$

Наибольшее рабочее напряжение в сетях и в электроустановках 35 кВ допускается до $U_{\text{max}} = 1,15 \cdot U_{\text{ном}} = 1,15 \cdot 35,0 \approx 40,5$ кВ и ограничено условием гарантированной электрической прочности изоляции. Поддерживая предельное напряжение U_{max} в начале электропередачи с учётом необходимого значения напряжения U_1 в её конце, получим величину наибольшей допустимой потери напряжения на линейной части электропередачи

$$\Delta U_{\text{доп}}^{\text{нб}} = U_{\text{max}} - U_1 = 40,5 - 36,29 = 4,21 \text{ кВ,}$$

или её относительное значение

$$\Delta U_{\text{доп}}^{\text{нб}} = \frac{\Delta U_{\text{доп}}^{\text{нб}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{4,21}{35} \cdot 100\% = 12,0\%.$$

Если ограничиться 10%-ной добавкой напряжения в начале электропередачи

$$U_{\text{max}} = 1,10 \cdot U_{\text{ном}} = 1,10 \cdot 35,0 = 38,5 \text{ кВ,}$$

то допустимую потерю напряжения можно оценить величиной

$$\Delta U_{\text{доп}} = U_{\text{max}} - U_1 = 38,5 - 36,29 = 2,21 \text{ кВ, или } 6,3\%.$$

Естественно, что при высоких нагрузках электропередачи на входе трансформатора ожидаются пониженные значения напряжений. В таких условиях используются транс-

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
------------------	---

ГЛАВА 1

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ

РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.....	7
--	---

1.1. Задачи и особенности расчёта и анализа электрических режимов распределительных сетей	7
1.2. Решения задач.....	15
1.3. Задачи для самостоятельного решения	89

ГЛАВА 2

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И РАЗОМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

НАПРЯЖЕНИЕМ 110–220 КВ.....	95
-----------------------------	----

2.1. Расчёт установившегося режима разомкнутой электрической сети.....	97
2.2. Решения задач.....	108
2.3. Задачи для самостоятельного решения	146

Глава 3

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОТЯЖЁННЫХ ЛИНИЙ

ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	151
-----------------------	-----

3.1. Математические модели линий электропередачи.....	152
3.2. Решения задач.....	162
3.3. Задачи для самостоятельного решения	209

ГЛАВА 4

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ

ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	215
-------------------------------------	-----

4.1. Расчётные соотношения и алгоритмы определения параметров режимов замкнутых сетей	217
--	-----

4.2. Решения задач.....	230
4.3. Задачи для самостоятельного решения	282

ГЛАВА 5

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И КПД В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ

СЕТЯХ.....	288
5.1. Основные положения и принципиальные основы	288
5.2. Решения задач.....	302
5.3. Задачи для самостоятельного решения	347

ГЛАВА 6

ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ

ОСНОВНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

ОСНОВНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ	352
6.1. Основные экономические показатели и критерии технико-экономической эффективности.....	352
6.2. Решения задач.....	374
6.3. Задачи для самостоятельного решения	452

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛИТЕРАТУРА

466

Учебное издание

ГЕРАСИМЕНКО Алексей Алексеевич,
ФЕДИН Виктор Тимофеевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Ответственный редактор *Д. Волкова*
Технический редактор *Г. Логвинова*

Формат 84x108^{1/32} Бумага офсетная.
Тираж 2000 экз. Заказ №

Издатель и Изготовитель: ООО «Феникс»
Юр. и факт. адрес: 344011, Россия, Ростовская обл.,
г. Ростов-на-Дону, ул. Варфоломеева, 150.
Тел./факс: (863) 261-89-50, 261-89-59.

Изготовлено в России. Дата изготовления: 11.2022.
Срок годности не ограничен.

Отпечатано в АО «Первая Образцовая типография»
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»
432980, Россия, Ульяновская обл.,
г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14.