

5. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

5.1. СПОСОБЫ И ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Потребление мощности в ЭЭС изменяется в течение времени. Разным режимам работы потребителей соответствуют разные потоки мощности, передаваемые по сети и, следовательно, разные потери напряжения. В режиме наибольших нагрузок сеть, как правило, сильно загружена и потери напряжения в ее элементах большие. В других нормальных режимах потери напряжения меньше, а в режиме наименьших нагрузок могут быть совсем незначительными.

Отклонение напряжения в узлах сети обычно определяется в процентах относительно номинального напряжения сети:

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (5.1)$$

Наибольшие отклонения напряжения у потребителей, как правило, наступают в аварийных режимах - при отключениях линий и выходе из работы крупного оборудования (генераторов, трансформаторов).

Работа электроприемников с наилучшими технико-экономическими показателями (высокий КПД, надежность, электромагнитная безопасность и т. и.) возможна только при небольших отклонениях напряжения на их выводах. ГОСТ 32144—2013 определяет отрицательное $\delta U_{(-)}$ и положительное $\delta U_{(+)}$ отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального / согласованного значения, % (см. раздел 4.1), а государственные стандарты на номинальные напряжения (см. табл. В.2 и раздел 2.5) устанавливают наибольшие рабочие напряжения для оборудования ЭЭС. Требования к отклонению напряжения в точках присоединения в сети электроприемников потребителей определяются самими электроприемниками. Для большинства электроприемников отрицательное и положительное отклонения напряжения не должны превышать 5 % номинального напряжения.

Нижний уровень напряжений в электрической сети определяется условиями регулирования напряжения в распределительных сетях и

устойчивостью работы ЭЭС. Указанные требования к отклонению напряжения в электрической сети и на выводах электроприемников обуславливают необходимость регулирования напряжения во всех видах электрических сетей. Различают централизованное и локальное регулирование напряжения.

При централизованном регулировании напряжение изменяют в центре питания (ЦП), которым могут быть шины электростанции, а также шины среднего или низкого напряжения понижающей подстанции. Локальное регулирование используется в питающих и распределительных сетях для отдельных групп потребителей или электроприемников (групповое регулирование). Иногда регулирование выполняется для отдельного электроприемника (индивидуальное регулирование).

Рассмотрим схему электрической сети, показанную на рис. 5.1. Напряжение на генераторе, равное номинальному напряжению генератора, на 5 % выше номинального напряжения сети. Если сеть имеет номинальное напряжение 10 кВ, то номинальное напряжение генератора 10,5 кВ. На генераторе допускается нормальное превышение напряжения относительно его номинального напряжения на 5 %. Пусть генератор (рис. 5.1) работает с наибольшим рабочим напряжением, тогда отклонение напряжение на его выводах составляет +10 % относительно номинального напряжения сети.

Силовые трансформаторы, как правило, имеют номинальные напряжения обмоток на 5... 10 % выше номинального напряжения сети, к которой они присоединены. Это требуется потому, что рабочее напряжение сети стремятся поддерживать выше номинального напряжения из условия необходимости компенсации потерь напряжения. Следовательно, трансформаторы работают на повышенном напряжении и с целью их работы с величиной тока намагничивания, соответствующего линейной части характеристики намагничивания, обмотки трансформатора рассчитывают на номинальное напряжение, большее чем номинальное напряжение сети.

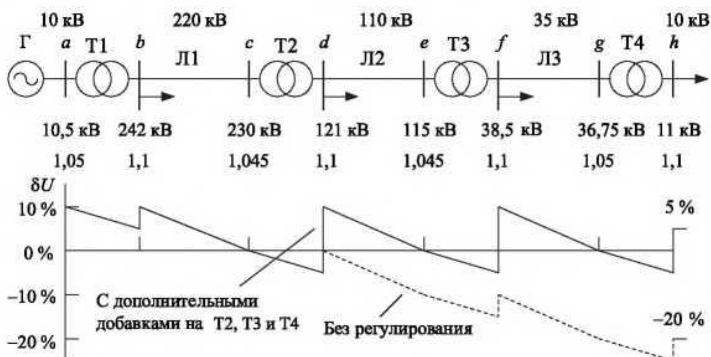


Рис. 5.1 Схема электрической сети и графики отклонения напряжения

В каждом элементе цепочки шин *a*, *b*, *h*, показанной на рис. 5.1, теряется напряжение. В режиме максимальных нагрузок эта величина в среднем для достаточно протяженных ВЛ равна 10 %, а для трансформаторов 5 %. Отклонение напряжения в конечной точке *h* без использования специальных средств составило бы величину:

$$\begin{aligned} \delta U_h = \delta U_a - \Delta U_{T1} - \Delta U_{Л1} - \Delta U_{T2} - \Delta U_{Л2} - \Delta U_{T3} - \\ - \Delta U_{Л3} - \Delta U_{T4} = 10 \% - 5 \% - 10 \% - 5 \% - 10 \% - 5 \% - \\ - 10 \% - 5 \% = -40 \%. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Такое снижение напряжения недопустимо для всякого потребителя и для электрической сети. Поэтому трансформаторы даже без каких-либо средств регулирования напряжения изготавливаются с таким соотношением напряжений обмоток, чтобы обеспечить добавку напряжения при трансформации порядка 5 %. На рис. 5.1 указаны действительные и относительные величины номинальных напряжений обмоток трансформаторов. Разность относительных напряжений для каждого трансформатора дает его добавку напряжения E_T , следовательно, в среднем можно считать, что при потерях напряжения в трансформаторе порядка 5 % они компенсируются добавкой напряжения трансформатора, и в расчете по формуле (5.2) отклонение напряжения в точке *h* окажется не -40 %, а -20 %. Этого, однако, также нельзя допустить, поскольку в конечном счете к точке *h* присоединяется распределительная сеть 10/0,38 кВ, где тоже есть потери напряжения, которые необходимо компенсировать положительным отклонением величины напряжения в точке *h* до 5...10 %. Следовательно, в цепочке *a*, ..., *h* требуется еще суммарная добавка напряжения порядка (5... 10%) - (-20 %) = 25...30 %. Это достигается установкой в сети устройств регулирования напряжения, которые либо обеспечивают снижение потерь напряжения в линиях и трансформаторах, либо вводят дополнительные добавки напряжения в трансформаторах. Следует отметить, что в рассматриваемой схеме сети трансформатор Т1 является повышающим, а все другие - понижающими. Повышающий трансформатор на электростанции не имеет устройства регулирования напряжения, и регулирование напряжения на электростанции возможно только за счет генераторов.

Способами регулирования напряжения являются:

- регулирование напряжения на электростанциях;
- с помощью регулирующих устройств трансформаторов на

понижающих подстанциях;

- с помощью изменения потерь напряжения в электрической сети.

Изменение напряжения на электростанциях в ЭЭС может одновременно изменить напряжения во всей передающей сети высокого и сверхвысокого напряжения и связано с перераспределением реактивной мощности между электростанциями. В случае сети, питающейся от одной электростанции (рис. 5.2, а), напряжения меняются во всех узлах сети.

Изменение коэффициента трансформации одного из понижающих трансформаторов влияет на напряжение шин низкого напряжения (НН) только на данном трансформаторе и на напряжения сети, которая питается от этих шин (рис. 5.2, а).

Установка КУ на одной из понижающих подстанций изменит потоки реактивной мощности в ЛЭП по пути от ЦП до данной подстанции и, следовательно, падения напряжения в этих ЛЭП. Это изменит напряжения во всех узлах сети, кроме ЦП (рис. 5.2, б). Изменить потери напряжения на участках электрической сети можно также отключением и включением части параллельных элементов в сети, например, одной цепи двухцепной ЛЭП (рис. 5.2, б).

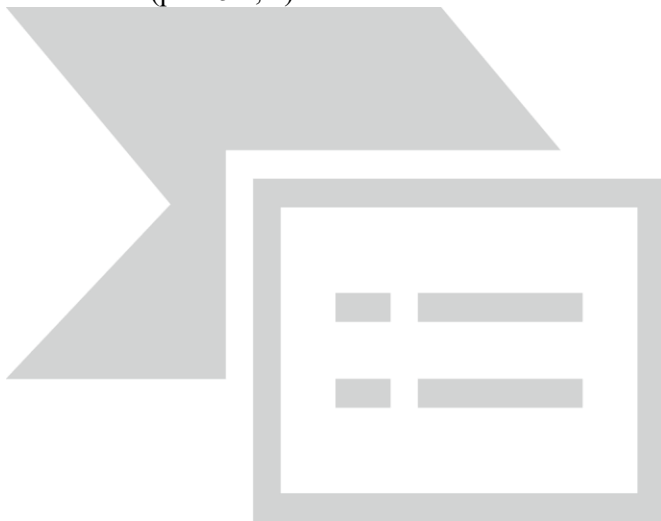


Рис. 5.2. Схема электрической сети с областями влияния при использовании различных способов регулирования напряжения

Регулирование напряжения в электрических сетях выполняется по одному из трех принципов:

- 1) стабилизация напряжения;
- 2) стабилизация по заданному графику напряжения;
- 3) встречное (согласное) регулирование.

В соответствии с принципом стабилизации напряжение на шинах нагрузки поддерживается всегда на заданном уровне (рис. 5.3, *а*). Регулирование по заданному графику предусматривает стабилизацию разных на различных временных интервалах заданных значений напряжений. В этом случае график напряжения будет ступенчатым, например, в часы утреннего и вечернего максимума напряжение поддерживается выше, чем в остальные часы суток (рис. 5.3, *б*). Принципы стабилизации используются при регулировании напряжения на электростанциях и в специальных случаях для индивидуального регулирования напряжения у некоторых электроприемников.

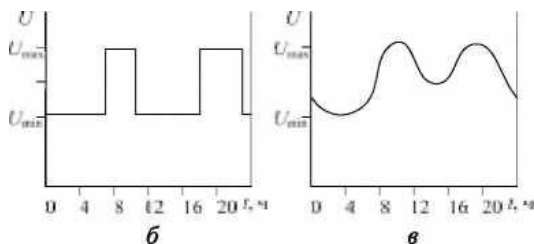


Рис. 5.3. Графики напряжения

Принцип встречного регулирования устанавливает значение напряжения на шинах НН понижающих подстанций в зависимости от тока нагрузки.

Согласно ПУЭ на шинах ЦП 6...20 кВ должно обеспечиваться встречное регулирование напряжения, при котором напряжение ЦП должно увеличиваться по мере роста нагрузки. В часы максимальной нагрузки напряжение поддерживается на 5... 10% выше номинального (не ниже 1,05 от номинального напряжения), а в часы

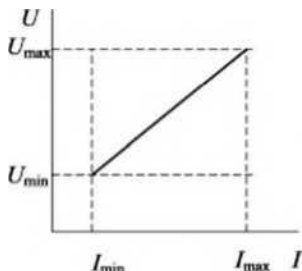


Рис. 5.4. Принцип встречного регулирования напряжения

минимальных нагрузок не выше номинального значения. График напряжения на шинах ЦП по форме повторяет график токовой нагрузки (рис. 5.3, в). Характеристика регулятора напряжения является линейной в зависимости от тока нагрузки (рис. 5.4).

К средствам регулирования напряжения относятся регуляторы напряжения на электростанциях, регулирующие устройства на понижающих трансформаторах, специальные регулировочные трансформаторы и КУ. Кроме того, к средствам регулирования напряжения можно отнести системы отключения (включения) части параллельно работающих элементов электрической сети.

5.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Рабочее напряжение на генераторах может изменяться в пределах от $0,95C/U_{\text{ном}}$ до $1,05C/U_{\text{ном}}$. Например, для сети с напряжением 10 кВ $U_{\text{Г ном}} = 10,5$ кВ, а пределы изменения рабочего напряжения от 10 до 11 кВ.

Регулирование напряжения на шинах электрической станции производится автоматически с помощью быстродействующего автоматического регулятора возбуждения (АРВ) синхронных генераторов.

В зависимости от электрической схемы станции устройства регулирования напряжения могут выполняться различным образом. В общем случае можно выделить индивидуальные АРВ генераторов, к которым подводятся сигналы по напряжению и току генератора, а также устройства группового регулирования напряжения (ГРН), которые должны обеспечивать автоматическое распределение реактивной мощности между генераторами и поддерживать заданное напряжение U_c на шинах электростанции или в другой точке ЭЭС согласно заданному режиму работы. Кроме того, к управляющим устройствам регулирования напряжения на электростанции следует отнести блоки ограничения перегрузки ротора — ОП и ограничения минимального возбуждения — ОМВ, которые, как указано выше, связаны с условиями нагрева стали статора и ротора генератора и статической устойчивостью. На рис. 5.5 показана управляющая схема автоматического регулирования напряжения на электростанции.

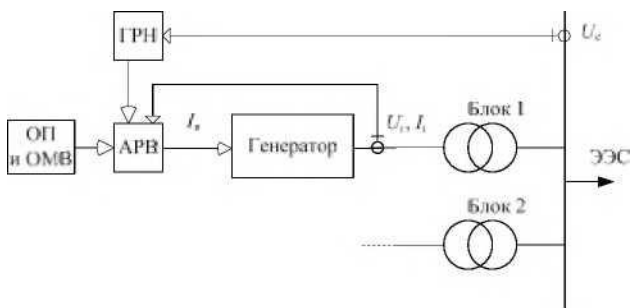


Рис. 5.5. Схема автоматического регулирования напряжения на электростанции

АРВ является первичным регулятором напряжения и аналогично АРС турбин при регулировании частоты имеет статизм (рис. 5.6). Характеристика регулирования АРВ I имеет крутизну, которая задается коэффициентом крутизны k_v .

$$k_v = -\frac{\Delta Q_{Г*}}{\Delta U_*}$$

$$\Delta Q_{Г*} = \frac{\Delta Q_{Г}}{Q_{Гном}}, \Delta U_* = \frac{\Delta U}{U_0}, U_0$$

- напряжение в шинах станции в исходном режиме.

Пересечение статической характеристики реактивной мощности потребления ЭЭС по напряжению $\Sigma Q_{п} = \psi_q(U)$ (рис. 5.6) с характеристикой АРВ I является рабочей точкой (а) исходного режима с напряжением на шинах станции U_0 . Реактивная мощность исходного режима равна Q_0 .

При изменении режима потребления реактивной мощности, например, увеличении потребления на ΔQ , в соответствии со статической характеристикой АРВ рабочая точка установится на пересечении новой статической характеристики $\Sigma Q_{п} + \Delta Q$ (точка b) -это стадия первичного регулирования напряжения устройство АРВ. Точке b соответствуют напряжение U_1 и реактивная мощность Q_1 , при этом $U_1 < U_0$.

Для дополнительной корректировки напряжения на шинах станции используется вторичное регулирование напряжения с помощью устройства ГРН, которое воздействует на настройку (уставку) АРВ генераторов. При этом характеристика АРВ перемещается параллельно своему прежнему положению и устанавливается в положение 3, в котором пересекается с характеристикой $\Sigma Q_{п} + \Delta Q$ в точке d . Напряжение на шинах станции восстанавливается до прежнего значения U_0 . Мощность генератора равна Q_2 .

При отсутствии регулятора возбуждения (характеристика 2 с $k_v = 0$, рис. 5.6) напряжение на шинах станции снизилось бы до значения U_2 .

При астатической характеристике первичного регулятора напряжения $k_v = \infty$ (4, рис. 5.6) на всех генераторах станции их совместная работа не может быть организована, так как в этом случае возникает неопределенность в распределении реактивной мощности между генераторами. Статические регуляторы возбуждения генераторов обеспечивают распределение реактивной мощности между генераторами строго пропорционально коэффициентам крутизны характеристик АРВ.



Рис. 5.6. Первичное и вторичное регулирование напряжения

5.3 РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПЯЖЕНИЯ НА ПОНИЖАЮЩИХ ПОДСТАНЦИЯХ С ДВУХОБОМОТОЧНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Для регулирования напряжения на трансформаторах понижающих подстанций устанавливается специальное устройство - регулятор под нагрузкой (РПН). РПН представляет собой автоматическое устройство, меняющее рабочее ответвление витков обмотки трансформатора и изменяющее таким образом коэффициент трансформации трансформатора. РПН устанавливаются в трансформаторах напряжением 35 кВ и выше и размещаются в нейтрали обмотки ВН. Это, во-первых, позволяет иметь наиболее плавное регулирование, так как число витков у обмотки ВН больше, чем на НН; во-вторых, при переключениях выполняется коммутация меньших по величине токов, чем на стороне НН, и, в-третьих, включение РПН на ВН в конец обмотки, присоединенной к заземленной нейтрали, значительно снижает требования к уровню изоляции устройства регулирования.



Рис. 5.7 Упрощенная схема регулирования напряжения двухобмоточного трансформатора

В упрощенном виде схема переключений ответвлений двухобмоточного трансформатора показана на рис. 5.7.

На стороне ВН трансформатора последовательно соединяются нерегулируемая и регулируемая обмотки. Обе обмотки размещены на одном магнитопроводе, на котором также находится обмотка НН. Регулируемая обмотка может иметь 12, 16 или 18 ступеней регулирования по 1,5 или 1,78 % с диапазоном регулирования ± 9 , ± 12 или ± 16 % от $U_{ном}$. Для простоты на рис. 5.7 показаны всего 4 ступени (± 2). Переключающее устройство состоит из двух переключателей П1 и П2, двух контакторов К1 и К2 и токоограничивающего реактора Р. В положении, показанном на рис. 5.7, ток в обмотке ВН проходит через плечи реактора в противоположных направлениях, вследствие чего результирующий магнитный поток реактора очень мал и его сопротивление незначительно.

В среднем положении переключателей отпаяк (номинальное ответвление) трансформатор работает с основным (номинальным) коэффициентом трансформации (рис. 5.7). В других положениях (на других ответвлениях) коэффициент трансформации уменьшается или увеличивается в зависимости от того, согласно или встречно с витками основной обмотки включаются дополнительные витки регулируемой

обмотки. При подаче сигнала перехода на верхнюю соседнюю отпайку операции по переключениям выполняются в следующем порядке:

- отключается контактор К1;

- переключатель П1 переводится на верхнее соседнее ответвление;

- включается контактор К1;

- отключается контактор К2;

- переключатель П2 переводится на верхнее соседнее ответвление;

- включается контактор К2.

В то время, когда переключатели находятся на разных ответвлениях и оба контактора включены, по контуру, образованному всеми элементами переключающего устройства, протекает уравнивающий ток, вызванный ЭДС, наводимой в замкнутых через переключающее устройство витках регулируемой обмотки. Плечи реактора для этого тока *будут* соединены последовательно, и реактивное сопротивление реактора велико, что будет препятствовать короткому замыканию между ответвлениями.

При переходе на нижнее ответвление работа переключателей и контакторов происходит в обратном порядке, т. е. вначале срабатывают К2 и ГО, а затем К1 и П1.

Переключающее устройство размещают в баке трансформатора. Контактные органы устанавливаются в отдельном, залитом маслом стальном кожухе, укрепленном как снаружи бака трансформатора, что обеспечивает наиболее удобную ревизию и ремонт их элементов, так и внутри бака трансформатора.

Поскольку при напряжении 220 кВ и выше реакторы переключающего устройства РПН получаются очень громоздкими, в таких трансформаторах применяют переключающие устройства с активными сопротивлениями, рассчитанными на кратковременную работу, что обеспечивается использованием мощных быстродействующих приводов контакторов со скоростями срабатывания порядка десятых долей секунды.

Рассмотренное устройство РПН называют встроеным.

Трансформаторы городских и сельских электрических сетей напряжением ниже 35 кВ снабжаются устройством переключения без возбуждения (ПБВ), т. е. с возможностью переключения ответвлений только при снятом напряжении. Трансформаторы с ПБВ имеют основное ответвление с номинальным напряжением и четыре ступени регулирования по 2,5 %, т. е. дополнительные ответвления с изменением напряжения

относительно его номинального значения на +5; +2,5; -2,5 % и -5 % ($\pm 2 \times 2,5$ %). Коэффициенты трансформации этих трансформаторов изменяются либо при изменении схемы электроснабжения, либо при переходе от сезонных максимальных нагрузок к минимальным и наоборот. Суточное регулирование в этих сетях возлагается на ЦП.

Устройство ПБВ также является встроенным устройством регулирования.

При проектировании электрической сети выполняется расчет режимов наибольших и наименьших нагрузок и проверяется возможность регулирования напряжения с помощью РПН или ПБВ установленных понижающих трансформаторов. Для этого определяется номер или напряжение ответвления, необходимого для достижения желаемого напряжения на шинах НН подстанции. В этом случае, как правило, регулирование напряжения осуществляется в соответствии с принципом встречного регулирования. Так как на сопротивлениях трансформатора имеется падение напряжения, то при выборе ответвления необходимо вычислить напряжение за сопротивлением трансформатора $U_H^{(B)}$ - напряжение на выводах обмотки НН, приведенное к напряжению ВН (рис.5.8).

Напряжение на шинах НН вычисляется по формуле

$$U_H = U_H^{(B)} \frac{1}{k_T} = U_H^{(B)} \frac{U_{НН}}{U_{отв}}, \quad (5.4)$$

где $U_H^{(B)} = |U_B - \Delta U|$; ΔU - падение напряжения на сопротивлениях обмоток трансформатора; U_B - напряжение на шинах ВН; k_T - коэффициент трансформации, подлежащий определению; $U_{отв}$ - искомое напряжение ответвления.

Из (5.4) найдем напряжение ответвления $U_{отв}$ при условии, что напряжение на шинах НН равно желаемому напряжению $U_H = U_{жсл}$

(5.5)

$$U_{отв} = U_H^{(B)} \frac{U_{НН}}{U_{жсл}}.$$

Найденное по (5.5) напряжение ответвления следует использовать для определения ближайшего стандартного ответвления. Ряд стандартных напряжений ответвлений может быть получен по формуле

$$U_{\text{отв.ст}} = U_{\text{ВН}} \pm m \Delta U_{\text{отв}} = U_{\text{ВН}} \pm m \frac{\Delta U_{\text{отв.}\%}}{100} U_{\text{ВН}}, \quad (5.6)$$

где m — номер ответвления в сторону увеличения (знак плюс) или в сторону уменьшения (знак минус) коэффициента трансформации ($m = 0, 1, \dots, m_{\text{max}}$); m_{max} - максимально возможное количество ответвлений трансформатора в сторону увеличения $k_T - m_{\text{max}}^+$ или в сторону уменьшения m_{max}^- ; обычно $m_{\text{max}}^+ = m_{\text{max}}^-$; $\Delta U_{\text{отв}}$ и $\Delta U_{\text{отв.}\%}$ - шаг изменения напряжения при переходе на соседнее ответвление в киловольтах и процентах соответственно. Следует заметить, что уменьшение коэффициента трансформации понижающего трансформатора приводит к увеличению напряжения на шинах НН, а увеличение - к его уменьшению.

Действительное напряжение на шинах НН с учетом выбранного ответвления

$$U_{\text{Н}} = U_{\text{Н}}^{(\text{В})} \frac{U_{\text{ВВ}}}{U_{\text{отв.ст}}}. \quad (5.7)$$

Для проверки возможности регулирования напряжения с помощью ответвлений РПН или ПБВ можно не определять напряжения ответвлений, а вычислить номер ответвления, обеспечивающий желаемое напряжение. Из (5.6) выразим номер ответвления m , заменив стандартное напряжение ответвления $U_{\text{отв.ст}}$ на напряжение ответвления, полученное из (5.5):

$$m = \left\lceil \frac{100}{\Delta U_{\text{отв.}\%} U_{\text{Вном}}} \left(U_{\text{Н}}^{(\text{В})} \frac{U_{\text{Нном}}}{U_{\text{жел}}} - U_{\text{ВВ}} \right) \right\rceil. \quad (5.8)$$

Если m входит в допустимый диапазон номеров (0, 1, ..., m_{max}), то регулирование возможно; в противном случае необходимы до-

полнительные средства регулирования напряжения на данной подстанции или изменение сделанных ранее проектных решений.

Пример 5.1. На подстанции установлено два понижающих трансформатора типа ТРДН-40000/110. Выбрать ответвления РПН $\pm 9 \times 1,78 \%$ в режиме наибольших нагрузок при напряжении на шинах ВН $U_B = 102$ кВ. Мощность, передаваемая по трансформаторам со стороны ВН, равна $P_I + jQ_I = 62 + j23$ МВА. Номинальные напряжения обмоток трансформаторов $U_{B \text{ ном}} = 115$ кВ, $U_{H \text{ ном}} = 10,5$ кВ. Сопротивление схемы замещения обмоток трансформатора (для двух трансформаторов) $R = 0,7$ Ом, $X = 17,4$ Ом. Желаемое напряжение $U_{\text{жел}} = 10,5$ кВ.

Вычислим падение напряжения в сопротивлении схемы замещения трансформаторов:



Напряжение на обмотке НН, приведенное к напряжению обмотки ВН $U_H^{(B)}$, и напряжение ответвления

$$U_H^{(B)} = |U_B - \Delta U| = 98,21 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{отв}} = U_H^{(B)} \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{жел}}} = 98,21 \frac{10,5}{10,5} = 98,21 \text{ кВ}.$$

Это напряжение соответствует ближайшему стандартному ответвлению минус 8 ($m = -8$) $U_{\text{отв-8}} = 98,624$ кВ. Действительное напряжение на обмотке НН с учетом установленного ответвления:

$$U_H = U_H^{(B)} \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{отв-8}}} = 98,21 \frac{10,5}{98,62} = 10,46 \text{ кВ}.$$

Если сразу вычислить номер ответвления, то будем иметь

$$m = \frac{100}{1,78 \cdot 115} (98,21 - 115) = -8,2.$$

5.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОНИЖАЮЩИХ ПОДСТАНЦИЯХ С ТРЕХОБМОТОЧНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ И АВТОТРАНСФОРМАТОРАМИ

Трехобмоточные трансформаторы на 110 и 220 кВ изготавливают с РПН только в обмотке ВН, а обмотка СН может иметь ответвления ПБВ для изменения коэффициента трансформации $+2 \times 2,5 \%$ от $U_{СН}$.

Схема регулирования напряжения со стороны ВН на трехобмоточных трансформаторах такая же, как у двухобмоточных трансформаторов. Однако изменение числа витков на стороне ВН приводит к изменению коэффициента трансформации как между обмотками ВН и СН $k_{т.В-С}$, так и между ВН и НН $k_{т.В-Н}$, (рис. 5.9, а). Такое регулирование называется *связанным* (зависимым), т. е. обеспечение регулирования на одних шинах, например, на шинах НН, вынужденно меняет напряжения и на других шинах - СН. Если графики нагрузок на шинах СН и НН сходны по форме, то вполне возможно, что устройства РПН окажется вполне достаточно для регулирования напряжения в сетях обеих ступеней номинальных напряжений.



Рис. 5.9. Регулирование напряжения на подстанции с трехобмоточным трансформатором

Выбор ответвлений РПН трехобмоточного трансформатора выполняется точно так же, как и для двухобмоточного трансформатора, с той лишь разницей, что перед этим необходимо определить, на какой из двух обмоток, СН или НН, будет регулироваться напряжение. В зависимости от этого используется одна из следующих формул:

$$U_{\text{отв}} = U_{\text{С}}^{(В)} \frac{U_{\text{СН}}}{U_{\text{жел}}}, \quad U_{\text{отв}} = U_{\text{Н}}^{(В)} \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{жел}}}. \quad (5.9)$$

Здесь $U_{\text{жел}}$ в первой формуле соответствует напряжению обмотки СН, а во второй - обмотке НН.

В случае когда требования к регулированию напряжения на обеих системах шин противоречивы, устанавливаются дополнительные средства регулирования. К ним относятся КУ (рис. 5.9, б) и специальные регулировочные трансформаторы - линейные регуляторы (ЛР), которые включаются последовательно с одной из вторичных обмоток трансформатора (рис. 5.9, в).

ЛР выпускаются мощностью от 16 до 100 МВА на напряжение 6...35 кВ и предназначены для установки последовательно с нерегулируемыми обмотками трансформаторов, а также непосредственно в ЛЭП. Конструктивно по отношению к основному трансформатору эти устройства являются внешними.

На рис. 5.10 показана схема одной фазы ЛР типа ЛТДН с реверсивной обмоткой регулирования. Диапазон регулирования ЛР $+10 \times 1,5\% = +15\%$.

От регулируемой обмотки (РО) через переключатели П1 и П2 питается обмотка возбуждения (ОВ) последовательного трансформатора (ПТ). В последовательной обмотке (ПО), включенной в рассечку линии, наводится ЭДС ΔE , величина которой зависит от положения переключателей на регулируемой обмотке, а направление - от положения переключателя реверсирования (ПР).

В положении, показанном на рис. 5.10, отрегулированное напряжение в линии (точка б) выше подведенного (точка а).

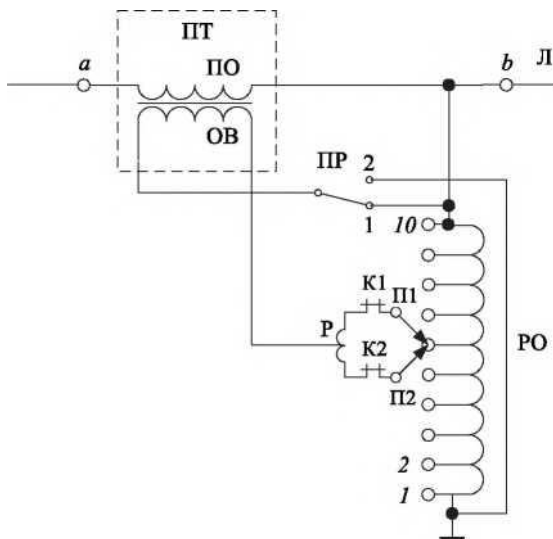


Рис. 5.10. Схема одной фазы ЛР

Работа переключающего устройства в ЛР выполняется так же, как и в РПН двухобмоточного трансформатора. При необходимости снижения выдаваемого напряжения ЛР (точка b) переключатели П1 и П2 переводятся на одно ответвление вверх по направлению к ответвлению 10. После достижения последнего ответвления 10 (это соответствует регулированию 0 % от $U_{ном}$) переключатель реверсирования ПР переходит из положения 1 в положение 2, а переключатели П1 и П2, вращаясь по кругу (ответвления 10 и 1 являются соседними), на ответвление 1. Направление ЭДС в последовательной обмотке изменится на обратное, и передвижение переключающего устройства вверх от ответвления 1 к ответвлению 10 будет приводить к дальнейшему понижению напряжения в точке b .

Повышение выдаваемого напряжения идет в обратном порядке.

Выбор ответвлений для ЛР, как правило, не выполняется. Так как сопротивление последовательной обмотки ЛР очень мало (см. приложение, табл. П.24), то в целях проверки эффекта от регулирования нужно просто увеличить или уменьшить подводимое напряжение к ЛР в $(1 \pm m \Delta U_{отп}^*)$ раз. Здесь m - номер ответвления ($m = 0 \dots 10$), а $\Delta U_{отп}^*$ - относительная величина ступени регулирования ЛР (для 1,5 % это составляет 0,015). Таким образом, максимальная величина добавки напряжения ЛР составляет $\pm 0,15 U$ (U — величина подведенного напряжения к ЛР).

На подстанциях с номинальным напряжением 220 кВ и выше устанавливаются автотрансформаторы.

Устройство регулирования напряжения (РПН) у автотрансформаторов встраивается на линейном конце обмотки СН, что обеспечивает изменение коэффициента трансформации только между обмотками ВН и СН – $K_{т,В-С}$ (рис 5.11, а) Регулирование напряжения на обмотке НН автотрансформатора может быть выполнено путем установки ЛР последовательно с обмоткой НН или с помощью КУ.

Для выбора ответвлений РПН на автотрансформаторе следует вычислить ориентировочное напряжение ответвления


$$(5.10)$$

где $U_{\text{жел}}$ - желаемое напряжение на обмотке СН; $U_C^{(B)}$ - напряжение на стороне СН, приведенное к напряжению обмотки ВН.

Полученное напряжение ответвления используется для подбора ближайшего стандартного напряжения ответвления.



Рис. 5.11 Схемы регулирования напряжения автотрансформатора:
а- на линии со стороны СН; б- с помощью ВДТ

Пример 5.2. Выбрать ответвление на автотрансформаторе типа АДЦТН-125000/220/110 с РПН в обмотке СН +6х2% в режиме наибольших нагрузок.

Расчетная схема замещения автотрансформатора с сопротивлениями обмоток и нагрузками на сторонах СН и НН представлена на рис. 5.12.

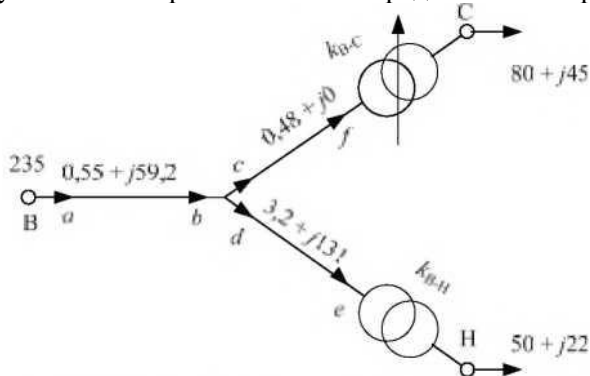


Рис. 5.12. Расчетная схема замещения автотрансформатора

Номинальные напряжения обмоток ВН/СН/НН: 230/121/11 кВ.

Напряжение со стороны обмотки ВН в рассматриваемом режиме $U_B = 235$ кВ. Желаемое напряжение на шинах СН $U_{жел}$ не ниже 122 кВ.

Для простоты расчетов пренебрежем активными сопротивлениями обмоток, а для удобства обозначения параметров режима на схеме введем обозначения точек в начале и конце каждой ветви.

Все величины, изображенные на расчетной схеме и приведенные ниже в расчете, выражены в киловольтах, мегаваттах, мегаварах и омах. Расчеты выполним в системе Mathcad.

$$U_{Bnom} := 230 \quad U_{Cnom} := 121 \quad U_{Hnom} := 11 \quad U_{nom} := 22$$

$$x_B := 59.2 \quad x_C := 0 \quad x_H := 131$$

$$U_B := 235 \quad U_{need} := 122$$

$$P_C := 80 \quad Q_C := 45$$

$$P_H := 59 \quad Q_H := 22$$

$$P_b := P_C + P_H \quad P_a := P_b \quad P_a = 139$$

$$Q_c := Q_C \quad Q_d := Q_H + \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_{nom}^2} \cdot x_H \quad Q_d = 32.732$$

$$Q_b := Q_c + Q_d \quad Q_b = 77.732$$

$$Q_a := Q_b + \frac{P_b^2 + Q_b^2}{U_{nom}^2} \cdot x_B \quad Q_a = 108.754$$

Расчет напряжения на обмотке СН, приведенного к напряжению обмотки ВН:

$$\Delta U := \frac{Q_a \cdot x_B}{U_B} + j \cdot \frac{P_a \cdot x_B}{U_B} \quad \Delta U = 27.397 + 35.016j$$

$$U_f := |U_B - \Delta U| \quad U_f = 210.54$$

Напряжение ответвления:

$$U_{otv} := U_{Bnom} \cdot \frac{U_{need}}{U_f} \quad U_{otv} = 133.28$$

Подберем стандартную отпайку. Возьмем отпайку +5:



Действительное напряжение на обмотке СН:

$$U_C := U_f \cdot \frac{U_{отв5}}{U_{Вном}}$$

$$U_C = 121.84$$

Это значение соответствует требуемому условию для $U_C \approx U_{жел} = 122$ кВ.

До 1985 г. у автотрансформаторов устройства РПН устанавливались встроенными в нейтраль (как у трехобмоточных трансформаторов), что обуславливало связанное регулирование напряжения на обмотках СН и НН. Это обстоятельство существенно ограничивало возможности регулирования на автотрансформаторах.

Иногда для регулирования напряжения в автотрансформаторах используются устройства, сходные с ЛР, которые называются вольтодобавочными трансформаторами (ВДТ), специальная обмотка которых соединяется последовательно с обмотками фаз ВН (рис. 5.11. б).

ВДТ состоит из двух трансформаторов: питающего трансформатора, состоящего из питающей обмотки (ПО) и регулирующей обмотки (РО), и последовательного трансформатора, который имеет последовательную обмотку - ПО и вольтодобавочную обмотку - (ВДО) (рис. 5.13).

Первичная обмотка питающего трансформатора может получать питание от фазы А или фаз В,С. Вторичная обмотка питающего трансформатора имеет такое же переключающее устройство как РПН.

Один конец обмотки возбуждения последовательного трансформатора подключен к средней точке (нулевому ответвлению) регулирующей обмотки, другой - к переключающему устройству ПУ.

Вольтодобавочная обмотка последовательного трансформатора соединена последовательно с обмоткой ВН автотрансформатора, и добавочная ЭДС ΔE складывается с напряжением обмотки ВН. Питание ВДТ осуществляется от обмотки НН автотрансформатора.

Регулирование с помощью ВДТ добавляет ЭДС к напряжению обмотки ВН и СН:

$$k_{т\text{В-С}} = \frac{U_{ВН} \pm \Delta E_{ВДТ}}{U_{СН} \pm \Delta E_{ВДТ}}, \quad (5.11)$$

$$k_{т\text{В-Н}} = \frac{U_{ВН} \pm \Delta E_{ВДТ}}{U_{НН}}.$$



Рис. 5.13. Схема регулирования ВДТ для одной фазы АТ

Если на первичную обмотку питающего трансформатора подается напряжение фазы А, то напряжение обмотки ВН автотрансформатора регулируется по модулю (рис 5.14, а). Если питание осуществляется от фаз В и С, то ΔE оказывается сдвинутой по фазе относительно ЭДС фазы А автотрансформатора (рис. 5.14, б).



Рис. 5.14. Векторные диаграммы фаз напряжений:

а - при продольном; б - поперечном и в - продольно-поперечном регулировании напряжения

Регулирование напряжения по модулю, когда $\Delta \underline{E}_A$ и \underline{U}_A совпадают по фазе, называют *продольным*. Регулирование напряжения по фазе, когда $\Delta \underline{E}_A$ и \underline{U}_A сдвинуты на 90° , называют *поперечным*. Регулирование напряжения по модулю и фазе называется *продольно-поперечным* (рис. 5.14, в).

