

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УСТРОЙСТВОМ РПН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Жорняк Л.Б., к.т.н., доц., Осинская В.И.

Запорожский национальный технический университет
Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, ЗНТУ, кафедра электрических аппаратов
тел.(0612) 64-46-25, факс:64-21-41, e-mail:zproton@zntu.edu.ua

Досліджені питання підвищення якості напруги мережі споживачів електроенергії. Виконано дослідження системи регулювання напруги силового трансформатора з РПН типу РНОА – 110/800 в пакеті програм Matlab (Simulink 4).

Исследованы пути повышения качества сетевого напряжения у потребителей электроэнергии. В пакете программ Matlab (Simulink 4) выполнено исследование системы регулирования напряжения силового трансформатора с РПН типа РНОА – 110/800.

Одна из важных задач, возникающих в процессе автоматизации управления режимами работы электрических сетей, – поддержание заданных уровней напряжения на шинах подстанций. Централизованное регулирование напряжения на подстанциях предусматривает широкое использование силовых трансформаторов и автотрансформаторов, содержащих устройство регулирования под нагрузкой (РПН). Автоматизация управления силовых трансформаторов с РПН в распределительных сетях с помощью широко распространенных автоматических регуляторов напряжения трансформаторов – эффективное средство улучшения качества регулирования и поддержания оптимальных уровней напряжения [1]. На узловых подстанциях связи сетей различного номинального напряжения регулирование напряжения приводит к перераспределению потоков реактивной мощности в энергосистеме. В этом случае даже небольшие изменения напряжения на одной из регулируемых подстанций могут привести к значительным перераспределениям потоков реактивной мощности.

Питающие сети энергосистемы, как правило, неоднородны. Высокую степень неоднородности создают автотрансформаторы связи в замкнутых контурах, что обуславливает неблагоприятное потокораспределение и, как следствие этого, снижение экономичности работы сети. Для экономического распределения мощностей в контур включается дополнительная ЭДС, создающая уравнивающую мощность [2]. Эта ЭДС, имеющая сдвиг по фазе по отношению к основному напряжению, создается последовательным регулировочным трансформатором с соответствующей схемой соединения обмоток. Регулирование осуществляется устройством, аналогичным по принципу действия РПН трансформаторов. Внедрение ЭВМ во всех звеньях управления режимами работы электрических сетей – современная тенденция создания автоматизированных систем энергетики [3, 4]. Энергосистемы уже имеют значительный арсенал вычислительных средств, который в настоящее время быстро изменяется как в качественном, так и в количественном отношении. Широко применяются также системы телемеханики, которые используются для сбора, обработки информации и передачи управляющих воздействий на энергетические объекты. Научно-исследовательскими организациями разработан целый ряд алгоритмов и программ оптимального регулирования

напряжения с целью получения минимума потерь активной мощности и снижения ущерба от некачественного электроснабжения потребителей. Все это обуславливает актуальность внедрения систем автоматизированного управления режимами электрических систем. Составная задача таких систем – телерегулирование напряжения на подстанциях в темпе изменения схемы и режима работы сети путем программного объединения технических средств, располагаемых непосредственно на подстанциях и диспетчерских пунктах энергосистемы, что позволяет осуществить автоматизацию дистанционного управления с выходом через управляющий вычислительный комплекс непосредственно на подстанции.

В настоящее время показатели качества напряжения у потребителей электроэнергии часто не отвечают установленным нормам [1]. Это свойственно как для производственных, так и для городских сетей. Проблема качества электроэнергии тесно связана с надежностью и ресурсом работы различного рода потребителей [2]. Более того, особо требовательные из потребителей могут функционировать только при высоком качестве напряжения [3, 4]. Важнейшим параметром качества электроэнергии является уровень напряжения. Для наиболее экономичной и безаварийной работы потребителя необходимо, чтобы отклонение фактической величины напряжения, при котором он получает электроэнергию, от своего номинального значения не превышало установленной нормами допустимой величины. При этом желательно, чтобы отклонения напряжения вообще были минимальными. Требования к точности поддержания напряжения различны для разных видов нагрузок. Особенно нежелательно отклонение напряжения в сторону его уменьшения, которое приносит убытки во всех областях промышленности [2-8]. Также понижение напряжения увеличивает потери мощности в электросетях [2, 3]. Поскольку колебания напряжения являются принципиально неизбежными (ввиду изменения режимов работы сетей и потребителей), то для обеспечения необходимых уровней напряжения требуется его регулирование.

Практически во всех энергосистемах применяется большое количество устройств, которые обеспечивают поддержание необходимого уровня напряжения. Это, прежде всего, трансформаторы с регулируемым под нагрузкой коэффициентом трансформации, конденсаторные батареи, реакторы, синхронные компен-

саторы, генераторы электростанций, и т. п. [2, 9]. Указанные устройства оснащаются регуляторами, которые обеспечивают поддержание напряжения на определенном уровне. Основными средствами регулирования напряжения в электрических сетях являются силовые трансформаторы с устройствами регулирования под нагрузкой (РПН). Существуют три основных направления повышения качества электроэнергии. В первую очередь, это – рационализация средств электроснабжения. К этому направлению относят повышение мощности сети, питание нелинейных потребителей повышенным напряжением и др. Второе направление предусматривает усовершенствование самих потребителей: обеспечение номинальной загрузки электродвигателей, использование многофазных схем выпрямления, включение в состав потребителей корректирующих устройств и т. д. Третье направление предполагает использование устройств коррекции качества – регуляторов одного или нескольких параметров электроэнергии или связанных с ними параметров потребляемой мощности [4, 5].

Наиболее экономически предпочтительным в настоящее время является третье направление, поскольку изменение структуры сети или обновление всех потребителей требует значительных затрат. Для обеспечения надежной работы существующего оборудования необходимо применять методы и средства регулирования качества электрической энергии.

Автоматическое регулирование напряжения на шинах электростанций и районных подстанций преимущественно осуществляется в виде встречного регулирования, при котором в период наибольших нагрузок напряжение устанавливается выше номинального напряжения сети (с целью компенсации потерь напряжения у потребителей). В период же наименьших нагрузок напряжение автоматически понижается. В условиях эксплуатации стремятся, по возможности, уменьшить количество переключений ответвлений трансформатора, сознательно идя на некоторое снижение качества регулирования, но добиваясь этим повышения надежности систем электроснабжения. Для этого задают закон регулирования, который нечувствителен к кратковременным колебаниям напряжения, но реагирующий на отклонения, большие, чем зона нечувствительности.

Для повышения устойчивости регулирования в [4, 5] предложена модель, которая позволяет учитывать знак производной огибающей регулируемого напряжения, что позволяет не производить дополнительного переключения ответвлений трансформатора, если регулируемый параметр находится вне зоны нечувствительности регулятора, но под влиянием внешних факторов движется в эту зону. Оценка устойчивости исследуемой системы автоматического регулирования (САР) в [6-9] совмещена с оценкой качества его переходных процессов (последние в случае устойчивой системы будут с течением времени затухать). В свою очередь, переходный процесс в системе оценивается по ее реакции на возможные наибольшие скачки задающих или возбуждающих воздействий напряжения. Очевидно, что синтезированная система относится к существенно нелинейным, а исследование ее устойчивости рационально осуществить путем компьютерного моделирования. Математическую модель САР напряжения силового трансформатора с РПН ти-

па РНОА – 110/800 (с восемью ступенями переключений) можно реализовать зависимостями [4]:

$$u(t) = K_1 [(U(t) - U_y) - K_2 (I(t) - I_{\min})];$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{если } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{если } u_{н.3} \leq u(t) \leq u_{в.3}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{если } \begin{cases} u(t) \geq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{в.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

$$U(t) \Big|_{t_{пер} \rightarrow \min} \rightarrow U_{ном} \pm \Delta U, \text{ если } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.31}; \\ u(t) \geq u_{в.31}. \end{cases}$$

$$U(t) \Big|_{t_{пер} \rightarrow \min} = U_{ном} \pm \Delta U, \text{ если } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.31}; \\ u(t) \geq u_{в.31}. \end{cases}$$

В данных зависимостях приняты следующие обозначения: $u(t)$ – приведенное действующее напряжение на шинах подстанции с учетом токовой компенсации; $u_{н.3}, u_{в.3}$ – соответственно нижняя и верхняя границы зоны нечувствительности трансформатора, которые задаются из условий надежности; U_y – уставка регулятора, которая соответствует номинальному напряжению $U_{ном}$ на шинах подстанции; $U(t)$ – текущее действующее значение номинального напряжения; I_{\min} – ток в шинах подстанции в режиме минимальной нагрузки; $I(t)$ – текущее действующее значение этого тока; $U_{н.н}$ – действующее напряжение на шинах низкой стороны трансформатора; U_i – действующее напряжение, которое индуцируется в обмотке трансформатора при подключении i -того ответвления; K_1 – коэффициент, характеризующий чувствительность регулятора;

$K_2 = \frac{0.05U_{ном}}{I_{max} - I_{min}}$ – коэффициент, определяющий наклон характеристики встречного регулирования; I_{max} – ток нагрузки в режиме максимума; τ_3 – время задержки сигнала; $u_{в.31}, u_{н.31}$ – соответственно верхняя и нижняя границы зоны, обусловленные качеством регулирования напряжения; $\frac{dU_{ог}}{dt}$ – производная огибающей контролируемого действующего напряжения; $t_{пер}$ – время регулирования, в течение которого значение напряжения возвращается в зону нечувствительности (заданную надежностью системы).

Следует отметить, что чем шире зона регулирования $\Delta U = u_{в.31} - u_{в.32}$ и больше время задержки сигнала τ_3 , тем ниже качество регулирования напряжения, но выше надежность, поскольку меньше пере-

ключений. Логическое условие $dU_{ог}/dt \leq 0$ позволяет повысить устойчивость регулирования за счет уменьшения числа переключений отпаек трансформатора, когда регулируемый параметр находится за зоной нечувствительности регулятора. Выполненный авторами анализ состояния рассматриваемых вопросов свидетельствует о том, что существующие модели систем регулирования напряжения силовых трансформаторов с устройствами РПН не позволяют в полной мере исследовать переходные процессы в этих устройствах при переключении отпаек трансформаторов, а в связи с этим – ограничивают возможность исследования режимов данных устройств и нахождение эффективных алгоритмов управления ими. Статья посвящена созданию на основе анализа уточненной модели системы регулирования напряжения силового трансформатора с устройством РПН и исследованию на этой модели рациональных алгоритмов переключения отпаек силового трансформатора, обеспечивающих повышение качества сетевого напряжения при одновременном повышении эксплуатационной надежности РПН.

Для решения зависимости (1) авторами создана в пакете программ Matlab (Simulink 4) [10] имитационная модель трехфазного двухобмоточного силового трансформатора с РПН, показанная на рис. 1.

Применяемый пакет прикладных программ (ППП) Matlab 5.2 дает возможность решать широкий круг математических задач и содержит в своем составе программу Simulink [10], с помощью которой можно задавать схемы моделирования исследуемых систем и получать результаты моделирования в удобном, наглядном виде. Поскольку каналы регулирования напряжения в сторону его уменьшения или увеличения работают одинаково, то в модели был реализован только один канал, что значительно упростило расчеты. Кроме этого можно учитывать, что при значительных отклонениях напряжения система регулирования проводит переключение устройства РПН без задержки (по крайней мере, на два положения). Поэтому для упрощения модели полагалось, что устройство РПН имеет лишь две секции. Трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой был смоделирован в пакете Matlab при использовании управляемой передаточной системы (FACTS) [10]. Это было возможно, поскольку РПН используется для переключения нагрузки и передачи тока в обмотках трансформатора без разрыва цепи. Так как реальное время переключения обмоток (30–60 мс) составляет намного меньше фактического времени выбора ответвления (3–10 сек), то этот блок можно представить векторной моделью для исследования устойчивости энергосистемы в диапазоне от нескольких секунд до нескольких минут.

На рис. 1 приняты следующие обозначения вводов и выводов трансформатора:

- 1) A, B, C – три ввода, соединенные с обмоткой 1;
- 2) a, b, c – три вывода, соединенные с обмоткой 2;
- 3) V_m – входное напряжение, которое контролируется регулятором напряжения (этот параметр вводится для трансформатора в третьем окне на рис. 3); данное напряжение представляет собой цифровой сигнал, соответствующий измеренному напряжению на вводах трансформатора (со стороны 1 или 2) или на дистанционной шине;

4) переключение отпаек в положение "ВЫШЕ" или "НИЖЕ" – вводится в третьем и четвертом окнах на рис. 4, когда определено управление устройством РПН, а, подав импульс на тот или иной вход, происходит изменение импульса с логического 0 на логическую 1;

5) m – выходной вектор моделирования, содержащий 16 выходных сигналов, которые являются как комплексными величинами (векторы тока, векторы напряжения), так и сигналами управления.

Задать значения последних можно в блоке "Выбор шины" (Bus Selector).

Параметры внешнего контроля устройства РПН определяются в блоке меню. Регулирование напряжения одной фазы регулируемого трансформатора происходит при изменении коэффициента трансформации V_2/V_1 устройством РПН (рис. 2). Устройство РПН может подсоединяться как к обмотке 1 (схема на рис. 2, а) так и к обмотке 2 (схема на рис. 2, б), а также выбирать любое количество ответвлений (начиная с нуля – для безвитковой коррекции и заканчивая максимально возможным числом N_{tap} – с максимальной витковой коррекцией). Устройство РПН имеет реверс, что позволяет подсоединять регулировочную обмотку встречно или согласно. Коэффициент умножения V_{nom2}/V_{nom1} (см. рис. 2) называется коррекцией напряжения и определяется как: $1/(1 + N \cdot \Delta U)$ – для РПН на обмотке 1 или $(1 + N \cdot \Delta U)$ – для РПН на обмотке 2. Здесь N – номер ответвления; ΔU – приращение напряжения на отпайке относительно напряжения обмотки 1 или 2. Отрицательное значение N соответствует реверсивному переключению (пунктирная линия).

Автоматический контроль напряжения на регулируемом трансформаторе осуществляется системой управления напряжением обычно на обмотках или шинах. Такая система управления в данном случае обеспечивается блоком "Three-Phase OLTC Regulating Transformer", которая автоматически определяет положение ответвлений, сравнивая измеренное напряжение V_m с заданным в блоке относительным значением напряжения V_{ref} .

При каждом переключении отпаек регулятор подает импульс на вход "ВЫШЕ" или "НИЖЕ" элемента управления (контроллера) устройством РПН. Для дальнейшего переключения регулятор проверяет соответствие следующему выражению:

$$abs(V_m - V_{ref}) > DeadBand/2 \text{ в течение времени (during time) } t > Delay, \quad (2)$$

где V_{ref} – заданное значение напряжения в блоке управления; $DeadBand$ – параметр зоны нечувствительности ΔU регулятора напряжения;

$Delay$ – временная задержка при переключении отпаек.

Выбор управления происходит по следующему алгоритму:

- 1) определяется вход V_m ;
- 2) устанавливается позиция "ВЫШЕ" или "НИЖЕ";
- 3) прикладывается импульс на вход "ВЫШЕ" или "НИЖЕ" и осуществляется смена отпаек в прямом или обратном порядке, таким образом, сигнал меняется с логического нуля на единицу.

Диалоговые окна (рис. 3 и 4) задают параметры соответственно трансформатора и РПН (Transformer parameters; OLTC and Voltage Regulator parameters).

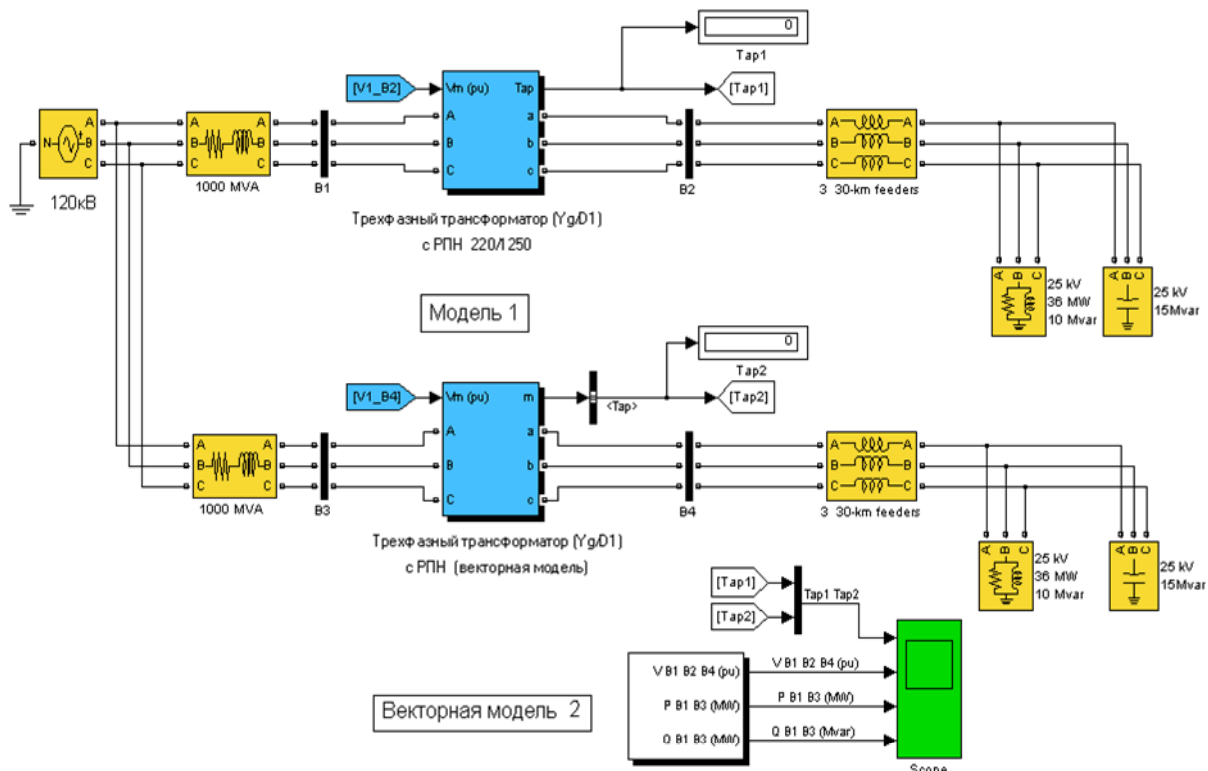


Рис. 1. Модель трехфазного регулируемого двухобмоточного силового трансформатора с РПН

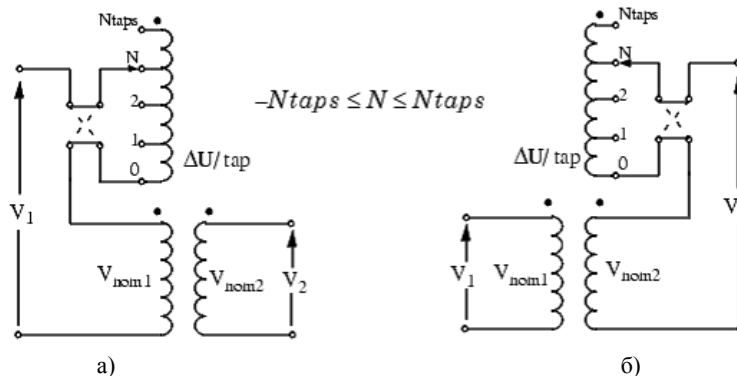


Рис. 2. Схема регулирования напряжения на одной фазе трехфазного регулируемого трансформатора:

а) на первой обмотке: $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{(1 + N \cdot \Delta U)} \times \frac{V_{nom2}}{V_{nom1}}$; б) на второй обмотке: $\frac{V_2}{V_1} = (1 + N \cdot \Delta U) \times \frac{V_{nom2}}{V_{nom1}}$

Для моделирования задавались следующие параметры:

- 1) номинальная мощность (ВА) и частота (Гц) [P_{nom} ; F_{nom}];
- 2) обмотка 1 [$V1$ $R1$ $X1$] – с номинальным межфазным напряжением обмотки 1 (В); сопротивлением обмотки (о.е.); сопротивлением утечки (о.е.);
- 3) соединение обмотки 1 может быть: Y (незаземленная звезда); Yg (заземленная звезда); треугольник D1 (угол сдвига фаз составляет 30 градусов); треугольник D11 (угол сдвига - 30 градусов);
- 4) обмотка 2 [$V2$, $R2$, $X2$];
- 5) соединение обмотки 2;
- 6) регулировочная обмотка [Rt , Xt] – с сопротивлением цепи и сопротивлением утечки, зависящим от положения ответвлений; сопротивление (в о.е.) необходимо выставить относительно максимального положения отпаек.
- 7) ветвь намагничивания [Rm , Xm] – с активным сопротивлением (о.е.) и реактивным сопротивлением

(о.е.) параллельных ветвей, смоделированными в зависимости от потерь в стали и токов намагничивания (без учета насыщения).

8) величина выходного тока обмотки 2 [Mag Phase] – начальная величина положительно направленного вектора тока (в о.е.), выходящего из обмотки 2. (Ток, входящий в обмотку 1 определяется так же). Начальное значение токов [0, 0]. После запуска системы, она примет установившееся состояние после окончания переходного процесса.

Исходные параметры РПН и регулятора напряжения для моделирования следующие (см. рис. 4):

- 1) подсоединение устройства РПН – к обмотке 1 либо обмотке 2;
- 2) напряжение ступени (Delta U) на одну отпайку;
- 3) минимальное или максимальное положение РПН [$MinTap$ $MaxTap$].
- 4) начальное положение отпаек N устанавливается с учетом выражения $MinTap \leq N \leq MaxTap$;
- 5) время выбора отпайки – определяет механиче-

скую задержку времени в секундах, позволяющую устройству РПН переместиться на 1 позицию. Временной диапазон составляет 3–10 секунд;

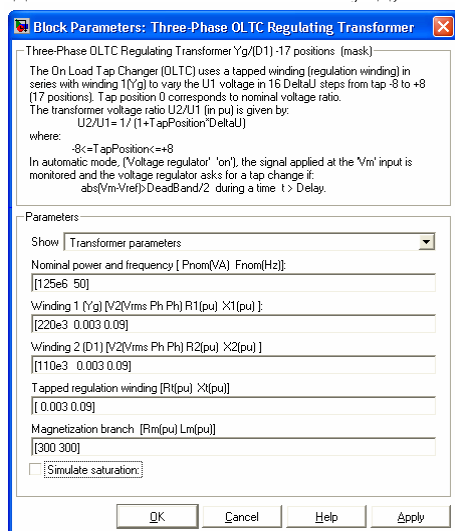


Рис. 3. Исходные значения параметров трехфазного трансформатора с РПН

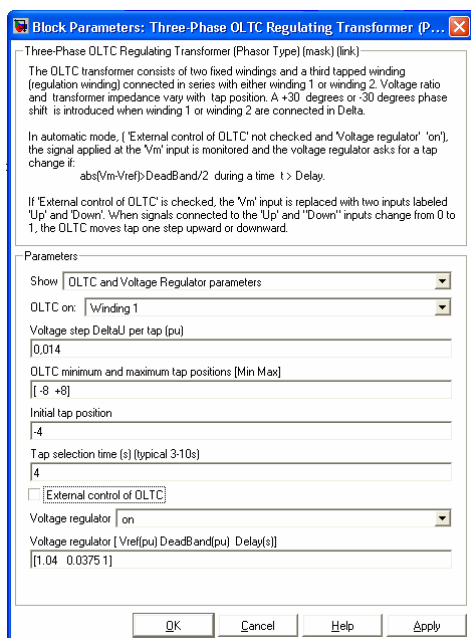


Рис. 4. Исходные значения параметров РПН и регулятора напряжения

б) внешнее управление устройством РПН осуществляется регулятором напряжения;

7) регулятор напряжения [V_{ref} DeadBand Delay] – этот параметр недоступен, когда выбрана установка внешних параметров управления устройством. В нашем случае регулятор установлен в положение "Вкл" ("on").

Определяется относительное напряжение V_{ref} (в о.е.), зона нечувствительности гистерезисного регулятора (в о.е.) и время задержки в секундах, за которое отклонение напряжения должно быть выше половины величины зоны нечувствительности устройства при прямом и обратном ходе регулирования. Зона нечувствительности устанавливается равной величине, превышающей в 2 раза напряжение ступени в окне "Напряжение ступени ΔU ". Все параметры указаны на рис. 4.

Распределительная сеть (см. рис. 1) имеет на

стороне высокого напряжения 220 кВ, трехфазный трансформатор с РПН, соединенный по схеме Y/Δ , мощностью 125 МВА типа РНОА – 110/800, на стороне низкого напряжения 110 кВ – 50 км параллельно соединенных питающих линий с источником на 136 МВт/20 МВАр. Компенсация реактивной мощности, поступающая на шину нагрузки, составляет 45 МВАр.

Для сравнения характеристик, рассчитанных на двух разных моделях, дублируем эту же цепь на выходах В2 и В4. Модель 1 является типичной моделью трансформатора с РПН и может быть использована как для дискретных решений (с целью получения точных волновых графиков), так и для векторного моделирования (для наблюдения изменений величин токов и напряжений).

Модель 2 является упрощенной векторной моделью, в которой трансформатор с РПН управляет источниками тока. Такая модель используется только при векторном моделировании и для исследования установившихся процессов (так как отличается повышенным быстродействием).

Функционирование двухтрансформаторных моделей с РПН происходит следующим образом. Оба трансформатора с РПН имеют параметры: 47 МВА, 120 кВ/25 кВ, Y/Δ , соединены на высоковольтной стороне (220 кВ) и предназначены для регулирования напряжения на шинах В2 и В4. Регулирование напряжения происходит изменением коэффициента трансформации. Данное регулирование происходит при различном соединении фаз; обмотка с отводами (регулирующая обмотка) соединена последовательно с каждой обмоткой (отличается на $220/\sqrt{3}$ кВ).

Таблица 1
Обозначение сигналов, принятых в модели на рис. 1

Сигнал	Группа сигналов	Сигнал	Описание
1-3	VABC (cmplx)	VA (pu), VB (pu), VC (pu)	Векторные напряжения (фаза на землю) на вводах А, В, С (о.е.) трансформатора
4-6	Vabc (cmplx)	Va (pu), Vb (pu), Vc (pu)	Векторные напряжения (фаза на землю) на выводах а, b, с (о.е.) трансформатора
7-9	IABC (cmplx)	IA (pu), IB (pu), IC (pu)	Векторные входные токи на фазах А, В, С
10-12	Iabc (cmplx)	Ia (pu), Ib (pu), Ic (pu)	Векторные выходные токи на фазах а, b, с
13-14	Z (cmplx)	Z1 (pu), Z0 (pu)	Положительное и нулевое значения комплексного сопротивления ($R+jX$)
15	Тар (Отпайка)	Тар	Положение отпайки
16	Ready (Готово)	Ready	Логический сигнал контроллера устройства РПН. Этот сигнал показывает работу регулятора напряжения. Сигнал "Готово" (1) поступает после завершения выбора отпайки и показывает готовность к выбору следующей. Импульсы "ВЫШЕ" и "НИЖЕ" блокируются до подачи следующего сигнала готовности (т.е. пока сигнал "Готово" равен 0)

Девять положений регулятора позволяют переключать 8 отпаяк (включая нулевую с коэффициентом трансформации 220 кВ/110 кВ). Реверс в устройстве РПН позволяет встречно или согласно подсоединять регулировочную обмотку. Для фиксированного значения вторичного напряжения 110 кВ каждое ответвление обеспечивает витковую коррекцию ± 0.01875 о.е. (или $\pm 1.875\%$ номинального напряжения 220 кВ). Общее число положений составляет 17 (так как включает нулевую отпайку) и позволяет изменять напряжение в пределах от 0.85%. (при напряжении 187 кВ) до 1.15% (при напряжении 253 кВ) со ступенью 0.01875% (с напряжением 1.4 кВ). Положительное напряжение, измеряемое на шинах В4 и В2, используется как входное напряжение регулятора (input 'Vmeas' of the transformer blocks).

Параметры меню блока трансформатора были такими:

- подключен регулятор напряжения ('Voltage regulator "on"');
- установлено относительное напряжение 1.04%;
- для запуска модели выбирается начальное положение -4, а напряжение трансформатора увеличивается коэффициентом $1/(1-4 \cdot 0,01875)=1,081$.

Первая модель имеет постоянное число ответвлений (равное 8), а векторная модель является более гибкой и позволяет подобрать любое соединение обмоток трансформатора и менять число отпаяк при необходимости. Переключение отпаяк происходит при кратковременном закорачивании двух смежных отпаяк через резисторы (с сопротивлением 5 Ом, временем переключения – 60 мс, которое вводится через блок меню). В векторной модели питание от источни-

ка тока характеризуется величиной падения напряжения, которая зависит от сопротивления обмотки, реактивного сопротивления утечки и положения отпаяк. Обе модели снабжены регуляторами напряжения, которые вырабатывают импульсы в положениях "прибавить" или "убавить" для переключения в прямом или обратном направлении. Регулирование напряжения зависит от величины зоны нечувствительности DB (которая вдвое превышает величину напряжения ступени и составляет 0,00375 о.е.). Это означает, что максимальное отклонение напряжения на шинах В2 и В4 должно составлять 0,01875 о.е. Пока максимальная величина количества отпаяк (-8 или +8) не будет достигнута, напряжение остается в пределах:

$$(V_{ref} - DB/2 < V < 1.04 + DB/2) = (1.021 < V < 1.059).$$

Так как механический процесс выбора ответвления происходит относительно быстро (4 сек.), то устанавливается время симуляции, равное 120 секундам. Трехфазный источник, изменяющий напряжение в сети 220 кВ, предназначен для исследования характеристик РПН. Изначально источник вырабатывает свое номинальное напряжение. Затем напряжение падает до $0.95 \cdot U_n$ за 10 секунд и вновь повышается до $1.1 \cdot U_n$ через 50 секунд. Все процессы при запуске наблюдаются на осциллографе (Scope). На рис. 5 приведены осциллограммы процесса переключения отпаяк. В частности, осциллограмма а) показывает текущее положение отпайки, равное -4; осциллограмма б) – положительное напряжение (220 кВ) на шине В1 (график 1), 110 кВ на шине В2 (график 2) и на шине В4 (график 3). Осциллограммы в) и г) – активную и реактивную мощности, рассчитанные на высоковольтной стороне (при 220 кВ) для шин В1 и В3.

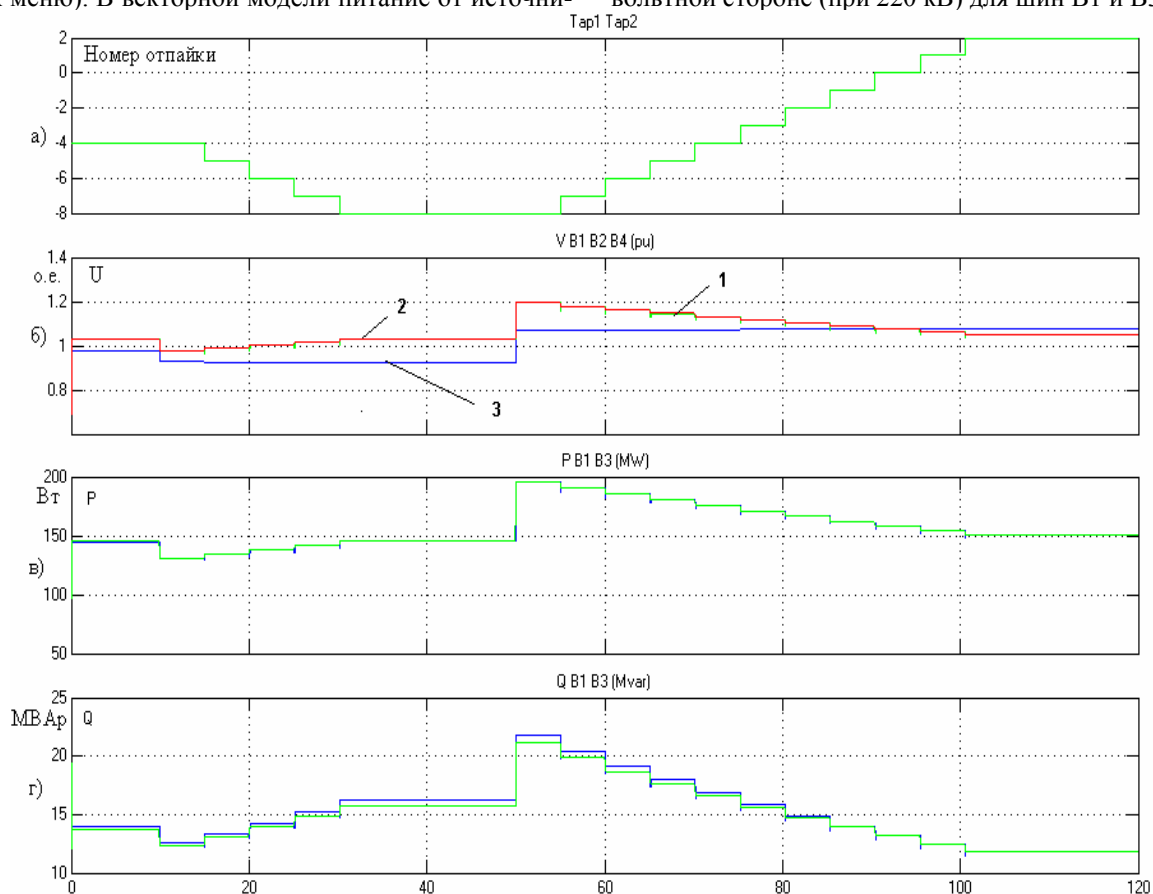


Рис. 5. Осциллограммы процессов: а) переключения отпаяк; б) напряжения на шинах В1, В2 и В4; в) активной мощности на стороне высокого напряжения (220 кВ); г) реактивной мощности на стороне высокого напряжения (220 кВ)

Моделирование начинается с запуска системы в положении -4, полученное напряжение на шинах В2 и В4 составило при этом $1,038 \cdot U_n$. При времени $t=10$ секунд внешнее напряжение источника снизилось до $0,95 \cdot U_n$, падение напряжения при 25 кВ составило $0,986 \cdot U_n$, что не соответствует допустимому диапазону ($1,021 < V < 1,059$). Регулятор повышает напряжение и РПН останавливается на -6 отпайке ($V=1,025 \cdot U_n$) (см. рис. 5, а). Через 50 секунд внешнее напряжение источника увеличилось до $1,1 \cdot U_n$, поэтому регулятор напряжения подает сигнал на понижение напряжения до ($V=1,043 \cdot U_n$), и РПН устанавливается в положении +1 (осциллограмма на рис. 5, а).

Перепады напряжения в модели происходят при $t = 10$ секунд (напряжение увеличивается) и $t=50$ секунд (напряжение уменьшается) (см. рис. 5). Это вызвано передаточной функцией (задающий цикл за определенный промежуток времени), принятой в алгебраических циклических моделях.

Проверка окончания процесса переключения трансформатора с одной ступени на другую происходит по формуле (1). Расчетные графики напряжений U (в безразмерном виде: через ноль или единицу, – в зависимости от длительности переходного процесса в момент переключения отпайки на РПН типа РНОА – 110/800 с восемью ступенями переключений) представлены на рис. 6 – рис. 8.

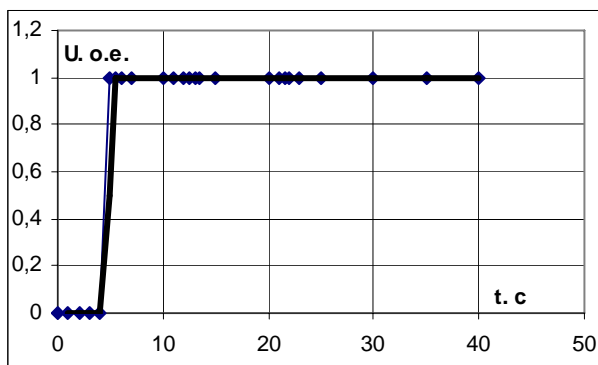


Рис. 6. График сигнала возбуждения РПН

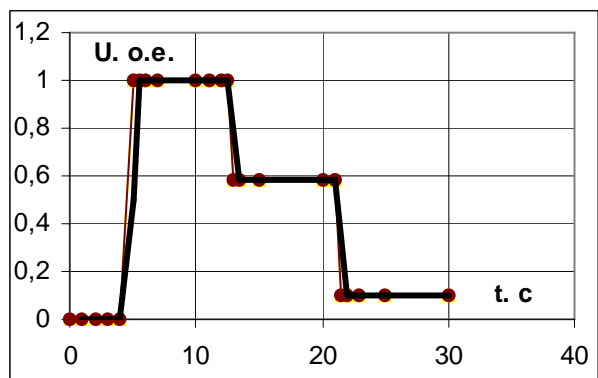


Рис. 7. График переходного процесса при аperiodическом характере сигнала управления U_m

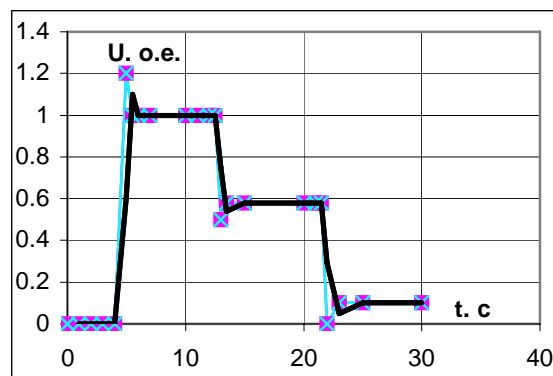


Рис. 8. График переходного процесса при колебательном характере сигнала управления U_m

Эти графики позволяют оценить насколько быстро в синтезированной системе автоматического регулирования напряжения силового трансформатора с РПН типа РНОА – 110/800 происходит затухание переходных процессов при воздействии на них ступенчатого возбуждения. А также – требуется ли дополнительное переключение ответвлений РПН, пока не закончился переходный процесс? Если графики демонстрируют затухание переходного процесса, то процесс переключений можно закончить, а броски напряжения у потребителя уменьшить. Это, в свою очередь, позволит при модернизации существующих подстанций сократить затраты за счет увеличения времени службы контактов устройств РПН силовых трансформаторов, снизить потерю мощности и электроэнергии в сетях, предупредить нежелательные аварийные режимы работы у потребителей этой энергии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 13109-87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-67. Введ. 16.12.87. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 20 с.
- [2] Говоров Ф.П. К вопросу о регулировании напряжения в городских электрических сетях // Энергетика и электрификация. – 1993. - №4. – С. 42-44.
- [3] Розанов Ю.К., Рябчинский М.В. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) // Электротехника. – 1998. - №3. – С. 10-17.
- [4] Мокин Б.И., Выговский Ю.Ф. Автоматические регуляторы в электрических сетях. – К.: Техніка, 1985. – 104 с.
- [5] В.В. Грабко. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005, 109 с.
- [6] Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – К.: Техника, 1981. – 160 с.
- [7] Поспелов Г.Е., Сыч Н.М. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Под ред. Г.Е. Поспелова. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 216 с.
- [8] Орлов В.С. Дополнительные потери мощности и энергии при отклонении напряжения и частоты // Изв. Вузов: Сер. Энергетика. – 1985. - №6. – С. 19-23.
- [9] Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
- [10] Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб: Питер, 2002. – 528 с.

Поступила 05.10.2006