

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (05.14.02)

УДК 621.311

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-11-20

Расчет параметров режима электрической сети с учетом изменяющегося реактивного сопротивления фазосдвигающего трансформатора

С.В. Локтионов, А.В. Кочергин, А.Н. Шаров, Г.С. Локтионов

Цель данной работы — исследование влияния изменения реактивного сопротивления фазосдвигающего трансформатора (ФСТ) на точность расчетов его угла регулирования и параметров режима электрической сети, получаемого в результате данного регулирования.

Параметры режима, в частности, перетоки активной мощности по ветвям контура электрической схемы, регулируются изменением угла ФСТ, но при этом, в силу конструктивных особенностей оборудования, варьируется реактивное сопротивление ФСТ. В зависимости от конструктивных особенностей различных моделей ФСТ и величины угла регулирования реактивное сопротивление может быть постоянным или колебаться в значительном диапазоне.

В связи с ростом применения ФСТ в промышленно развитых странах, а также появлением первых образцов в странах СНГ, в том числе и в России, в ряде отечественных и зарубежных публикаций уделяется повышенное внимание данной теме. Поднимаются вопросы, связанные с проблемами устойчивости электрических режимов в связи с зависимостью реактивного сопротивления ФСТ от изменения его угла регулирования, а также оценки влияния данной зависимости на параметры режима.

Рассмотрена необходимость учета изменения реактивного сопротивления фазосдвигающего трансформатора при расчетах его угла регулирования с целью управления потоками активной мощности для различных случаев. Принудительное изменение потоков активной мощности в замкнутых контурах электрической сети с помощью ФСТ можно использовать с целью снижения потерь активной мощности, а также для поддержания требуемой загрузки линий электропередач по тем или иным соображениям, например, в коммерческих целях или в случае трансграничных перетоков. В силу сложности расчетов обычно берут постоянные значения реактивного сопротивления ФСТ, однако такой подход справедлив не для всех типов конструкций. У большинства трансформаторов реактивное сопротивление меняется с ростом угла регулирования, поэтому неучет данного факта, особенно при больших углах регулирования, может привести к получению заведомо неверного соответствия между углом регулирования и величиной реактивного сопротивления трансформатора. Это вносит погрешность в точность расчета значения угла регулирования, а также в вычисления параметров режима, которые надо получить по итогам регулирования.

Ключевые слова: фазосдвигающий трансформатор, угол регулирования, параметры режима, влияние реактивного сопротивления, погрешность расчета.

Для цитирования: Локтионов С.В., Кочергин А.В., Шаров А.Н., Локтионов Г.С. Расчет параметров режима электрической сети с учетом изменяющегося реактивного сопротивления фазосдвигающего трансформатора // Вестник МЭИ. 2021. № 1. С. 11—20. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-11-20.

Calculating the Electric Network Operating Parameters Taking into Account the Phase-Shifting Transformer's Variable Reactance

S.V. Loktionov, A.V. Kochergin, A.N. Sharov, G.S. Loktionov

The aim of the work is to study the effect the variation of the phase-shifting transformer (PST) reactance has on the accuracy of calculating its control angle and the electrical network operating parameters obtained as a result of this control. The operating parameters, in particular, active power flows in the electrical circuit branches, are controlled by changing the PST angle; however, in view of the PST design features,

this control entails a change of its reactance. Depending on the design features of different PST models and the control angle value, the PST reactance may be constant or vary in a significant range.

In connection with a growing use of PSTs in industrially developed countries and with the fact that the first samples of this equipment have emerged in the CIS countries, including Russia, an increased attention is paid to this topic in a number of domestic and foreign publications. In particular, matters concerned with the stability of electric operation modes are considered in view of the fact that the PST reactance depends on its control angle, and the effect this dependence has on the operating parameters is estimated. The necessity of taking into account the varying PST reactance in calculating its control angle for controlling active power flows is considered for different cases. Forced redistribution of active power flows in the closed loops of an electrical network by means of a PST can be used to reduce active power losses and to maintain the required loading of the power lines for various reasons, for example, for commercial purposes or in the case of transit power flows between different countries. In view of the complexity of calculations, constant values of the PST reactance are usually assumed, but this approach is valid not for all types of PST designs. In the majority of PSTs, their reactance varies with increasing the control angle. Therefore, calculations carried out without taking this feature into account may yield a fortiori incorrect correspondence between the control angle and the transformer reactance value. In turn, an error will be introduced in the accuracy of the PST control angle calculations, as well as in the calculations of the operating parameters that should be obtained from the control action.

Key words: phase-shifting transformer, control angle, operating parameters, reactance influence, calculation error.

For citation: Loktionov S.V., Kochergin A.V., Sharov A.N., Loktionov G.S. Calculating the Electric Network Operating Parameters Taking into Account the Phase-Shifting Transformer's Variable Reactance. Bulletin of MPEI. 2021;1:11—20. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-11-20.

Введение

В последние годы уделяется повышенное внимание проблеме управляемости электроэнергетических систем за счет применения специальных технических средств воздействия. Это обусловлено введением рыночных отношений в электроэнергетике и децентрализацией управления ряда энергообъединений, что требует повышения гибкости их работы, а также появлением нового класса регулирующих устройств, базирующихся на применении силовой электроники (FACTS). Все указанное приводит к тому, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы.

Наличие в Единой энергосистеме России (ЕЭС) таких проблем, как недостаточная пропускная способность системообразующих электрических сетей, слабая управляемость, пониженный объем устройств регулирования напряжения и реактивной мощности, неоптимальное распределение потоков мощности по линиям электропередачи разного класса напряжения, а также наличие коммерческих интересов участников рынка электроэнергии, формирует интерес к использованию данных видов устройств в стране.

Одно из известных и применяемых устройств, относящихся к FACTS оборудованию, — фазосдвигающий трансформатор (ФСТ) [1]. Он позволяет выполнять преднамеренное поперечное регулирование напряжения и, как следствие, происходит желаемое изменение мощности, передаваемой по электропередаче. В развитых странах ФСТ используют для снижения потерь активной мощности, обусловленных неоднородностью электрической сети, а также для обеспечения заданного потока мощности в одной из ветвей электрического контура. ФСТ может работать как самостоятельно, так и в комбинации с другими типами оборудования, например конденсаторной батареей. Так, в институте электроэнергетики Молдовы и в Московском энергетическом институте изучалась возможность создания гибких линий электропередачи на основе применения

ФСТ с продольной емкостной компенсацией реактивного сопротивления ФСТ для снижения потерь активной мощности и повышения пропускной способности контура [2, 3].

Применение и принцип работы фазосдвигающего трансформатора

В настоящее время состояние энергетического комплекса развитых стран складывается из:

- увеличения концентрации нагрузки в городах;
- введения все новых экологических требований, усложняющих возможность строительства новых линий электропередачи;
- агрегирования электрических сетей в единые энергосистемы;
- возникновения крупных аварий, воздействующих на всю систему;
- интегрирования рыночных отношений в сферу электроэнергетики.

Одна из наиболее значимых проблем, возникающих при агрегировании простых сетей в сложносвязанные, — неэкономичное распределение нагрузки между сетями различных классов напряжений, снижающее устойчивость системы и уменьшающее пропускную способность в разрезе сечений межсистемных связей.

В большинстве развитых стран распространены сложносвязанные схемы (электропотребители и электростанции соединены между собой линиями различных классов напряжения). Один из случаев, наиболее ярко иллюстрирующий последствия распространения таких сетей, — контур, состоящий из параллельно проходящих линий различных классов напряжений, в котором линия низшего класса напряжения перегружена, а вторая линия высшего класса напряжения — недогружена. Согласно плану Министерства энергетики Российской Федерации, изложенным в приказе № 174 от 28 февраля 2019 г. «Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2019 — 2025 годы», планируется ввести в экс-

платацию 11542 километров линий электропередачи напряжением 220 кВ и выше. Это еще больше усложнит существующую систему, создавая дополнительные неоднородные контуры. Одним из вариантов решения данной задачи может служить установка ФСТ, позволяющая осуществлять преднамеренное поперечное регулирование напряжения, в результате чего изменится угол между векторами напряжения по концам электропередачи. Это породит желаемое изменение мощности, передаваемой по линии, вне зависимости от параметров шунтирующих связей. Управляя вектором напряжения с помощью ФСТ, можно контролировать поворот вектора суммарного напряжения в начале сети, и уже, как следствие, регулировать угол между векторами напряжений по концам электропередачи мощностью P_2 по линии 2 (рис. 1):

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{X_L + X_{\text{ФСТ}}} \sin(\delta + \theta),$$

где U_1, U_2 — модули напряжения в начале и конце линии электропередачи; δ — угол мощности (разность фаз между U_1 и U_2); $X_L, X_{\text{ФСТ}}$ — реактивные сопротивления линии и ФСТ; θ — угол ФСТ (разница фаз между напряжениями на клеммах ФСТ).

Данное устройство отлично подходит в случае необходимости перераспределения потока в контуре из параллельных линий различных классов напряжений. ФСТ, включенный последовательно в линию 2, добавляет к напряжению U_1 в начале линии дополнительное напряжение ΔU , перпендикулярное к нему. В результате итоговое напряжение U_3 за ФСТ смещается на угол θ по фазе, тогда угол мощности линии 2 равен $\delta + \theta$.

Изменение напряжения ΔU меняет угол θ_{13} , а значит, и поток активной мощности P_2 . Напряжение ΔU регулируется в диапазоне от отрицательных до положительных значений, что увеличивает или уменьшает угол мощности и, соответственно, активную мощность P_2 . ФСТ широко применяют в США и странах Евросоюза, но в странах СНГ их только начинают внедрять. В 2008 г. ФСТ впервые был установлен в Казахстане, а в 2018 г. — в России на Волжской ГЭС [4, 5].

Основные цели, для достижения которых необходим ФСТ:

- снятие перегрузки линий в нормальном режиме работы через перераспределение потоков мощности;
- возможность регулирования трансграничных потоков мощности между взаимосвязанными системами;

- оптимизация режима по критерию минимума потерь активной мощности.

Вне зависимости от цели установки ФСТ угол регулирования фазосдвигающего трансформатора для каждой конкретной задачи определяется исключительно методом подбора, путем выполнения последовательных итераций [6, 7]. Это создает определенные трудности при решении некоторых задач. Развитие силовой электроники позволит в недалеком будущем поставить вопрос о создании тиристорно-управляемых ФСТ для решения задач динамической устойчивости, но для мгновенного управления изменениями потоков мощности в сети требуется быстрый и точный расчет угла регулирования трансформатора в зависимости от текущего режима работы электрической сети [8, 9]. Для работы тиристорно-управляемых ФСТ потребуется разработка специального программного обеспечения, и итерационный метод расчета угла регулирования станет неприемлем.

Определение угла регулирования фазосдвигающего трансформатора

В зависимости от поставленной задачи угол регулирования ФСТ рассчитывают для разных случаев, два из которых являются самыми распространенными: оптимизация потоков активной мощности в контуре электрической сети с целью снижения суммарных потерь активной мощности и обеспечение заданного потока активной мощности по одной из ветвей контура, исходя из каких-либо требований.

Расчет угла регулирования представляет собой сложную задачу в силу наличия квадратичных и тригонометрических уравнений, поэтому вывод аналитического выражения угла затруднителен для многих исследователей. С помощью разных методов и подходов для поиска оптимального места установки ФСТ в электрической сети с целью получения режима с наименьшими потерями активной мощности расчет угла регулирования велся итеративным способом. При эксплуатации ФСТ для конкретной схемы итеративно вычисляли углы регулирования, обеспечивающие нужные потоки мощности по ветвям контуров сети. Затем создавали специальные таблицы, графики, в которые (для конкретных значений мощностей, текущих по ветвям сети) вставляли соответствующие значения углов регулирования, обеспечивающих потоки мощности. В зависимости от поставленной задачи угол регулирования мог менять знак и быть как положительным, так

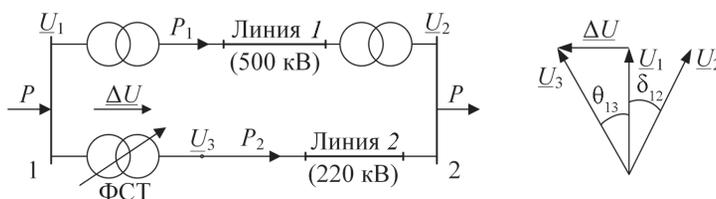


Рис. 1. Управление потоком активной мощности с использованием ФСТ: принципиальная схема и векторная диаграмма для линии с ФСТ

и отрицательным. Серии таблиц, графиков писали для разных режимов, но при этом значения углов и мощностей получали статическими, неизменными. Если параметры режима или схемы менялись, то надо было подбирать новое значение угла регулирования.

В НИУ «МЭИ» были созданы алгоритмы, позволяющие безытерационным способом по параметрам исходного режима и параметрам схемы получить аналитически значение угла регулирования ФСТ для различных случаев. Метод помогает рассчитывать угол регулирования, используя текущие (до начала регулирования) параметры режима и существующую топологию сети. В результате одновременно определяются величина и знак угла регулирования. В основу указанного метода положено условие существования баланса мощности в узле. При выводе формул алгоритма сделаны определенные допущения о постоянстве комплексного сопротивления ФСТ и модулей напряжений в узлах. Полученное аналитическое выражение угла регулирования по критерию минимальных потерь, а также сам первый алгоритм расчета угла и поиска оптимального места установки ФСТ в электрической сети представлены в [10, 11].

В связи с развитием рынка электроэнергии для решения задач, связанных с межгосударственными перетоками мощности, а также различных технических целей возникает необходимость обеспечения в линиях электропередачи потока активной мощности определенной величины. Для этого следует установить соответствующее значение угла регулирования ФСТ, полученное аналитическим способом на основе изложенного подхода (наличия баланса мощности в узлах). Значение угла регулирования выводится из решения системы уравнений. Второй алгоритм расчета угла приведен в [11, 12].

Полученные выражения для расчета оптимального угла регулирования ФСТ по различным критериям следующие.

Выражение в общем виде для расчета оптимального угла регулирования ФСТ, установленного в ветви mk по критерию минимальных потерь активной мощности, имеет вид (алгоритм I):

$$\theta_{mk} = \frac{-U_m U_k y_{mk\text{ФСТ}} \delta_{mk}^{(0)} (\sin \alpha_{mk\text{ФСТ}}) \left(\frac{d\Delta\delta_{mk}}{d\theta_{mk}} + 1 \right) - \sum_{i,j=1}^n U_i U_j y_{ij} \delta_{ij}^{(0)} (\sin \alpha_{ij}) \frac{d\Delta\delta_{ij}}{d\theta_{mk}}}{U_m U_k y_{mk\text{ФСТ}} (\sin \alpha_{mk\text{ФСТ}}) \left(\frac{d\Delta\delta_{mk}}{d\theta_{mk}} + 1 \right)^2 + \sum_{i,j=1}^n U_i U_j y_{ij} \delta_{ij}^{(0)} (\sin \alpha_{ij}) \left(\frac{d\Delta\delta_{ij}}{d\theta_{mk}} \right)^2} \quad (1)$$

$$i \neq j; ij \neq mk; m \neq k; y_{ij} = \frac{1}{\sqrt{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}}; \alpha_{ij} = \arctg \frac{r_{ij}}{x_{ij}};$$

$$y_{mk\text{ФСТ}} = \frac{1}{\sqrt{r_{mk\text{ФСТ}}^2 + x_{mk\text{ФСТ}}^2}}; \alpha_{mk\text{ФСТ}} = \arctg \frac{r_{mk\text{ФСТ}}}{x_{mk\text{ФСТ}}}.$$

где ФСТ — индекс, обозначающий учет параметров ФСТ, установленного в ветви mk ; U_m, U_k, U_i, U_j — модули напряжений исходного установившегося режима (без ФСТ) начала и конца соответствующих ветвей; $\delta_{mk}^{(0)}, \delta_{ij}^{(0)}$ — углы между векторами напряжений начала и конца соответствующих ветвей при включенном в ветвь mk ФСТ с углом регулирования $\theta_{mk} = 0^\circ$; $\Delta\delta_{mk}, \Delta\delta_{ij}$ — изменения соответствующих углов в результате воздействия угла регулирования ФСТ.

Значения производных найдем из уравнения фазового сдвига по контуру, продифференцированного по θ_{mk} :

$$\sum \left(\pm \frac{d\Delta\delta_{pq}}{d\theta_{mk}} \right) = 0, \quad (2)$$

где $p \neq q$.

Для одноконтурной схемы (см. рис. 1) уравнения (1), (2) выглядят следующим образом:

$$\theta_{13} = \frac{-y_{12\text{ФСТ}} \delta_{12}^{(0)} (\sin \alpha_{12\text{ФСТ}}) \left(\frac{d\Delta\delta_{12}}{d\theta_{12}} + 1 \right) - y_{12} \delta_{12}^{(0)} (\sin \alpha_{12}) \frac{d\Delta\delta_{12}}{d\theta_{12}}}{y_{12\text{ФСТ}} (\sin \alpha_{12\text{ФСТ}}) \left(\frac{d\Delta\delta_{12}}{d\theta_{12}} + 1 \right)^2 + y_{12} \delta_{12}^{(0)} (\sin \alpha_{12}) \left(\frac{d\Delta\delta_{12}}{d\theta_{12}} \right)^2};$$

$$\frac{d\Delta\delta_{12}}{d\theta_{13}} = - \frac{1}{1 + \frac{\cos(\delta_{12}^0 + \alpha_{12})}{\cos(\delta_{12}^0 + \alpha_{12\text{ФСТ}})} \sqrt{\frac{r_{12}^2 + x_{12}^2}{r_{12\text{ФСТ}}^2 + x_{12\text{ФСТ}}^2}}},$$

где r_{12}, x_{12} — сопротивления верхней ветви; $r_{12\text{ФСТ}}, x_{12\text{ФСТ}}$ — сопротивления нижней ветви.

Для случая принудительного перераспределения потоков активной мощности с целью получения заданного значения активной мощности в одной из ветвей контура, решена система уравнений, составленная на базе уравнений баланса мощности в узлах дополненными уравнениями фазового сдвига в контуре [11, 12]. Уравнения системы (алгоритм II) выглядят как:

$$P_{mk} = \pm U_m^2 y_{mk} \sin \alpha_{mk} + U_m U_k y_{mk} \sin (\delta_{mk}^{(0)} + \Delta\delta_{mk} + \theta \mp \alpha_{mk}), \quad (4)$$

где m, k — конец и начало ветви, $m \neq k$.

Если в данной ветви не находится ФСТ, то в (4) θ равен нулю.

Уравнение фазового сдвига в контуре имеет вид:

$$\sum (\pm \Delta\delta_{pq}^{(0)}) = 0,$$

где p, q — номера узлов по концам ветвей, входящих в рассматриваемый независимый контур ($p \neq q$).

В обоих случаях приращение углов векторов напряжений узлов схемы получено по формуле:

$$\Delta\delta_{mk} = \delta_{mk} - \Delta\delta_{mk}^{(0)},$$

где m, k — начало и конец ветви.

Расчет угла регулирования выполнен по (4), содержащей в себе величину угла регулирования θ . При расчете постоянное значение реактивного сопротивления ФСТ $x_{\text{фст}}$ суммировано с реактивным сопротивлением линии, в которой был установлен ФСТ, и учтено, как общая проводимость линии.

Существуют конструкции ФСТ, у которых не меняется значение реактивного сопротивления с изменением угла регулирования [3]. Однако, это верно не для всех конструкций ФСТ. Для большинства реактивное сопротивление увеличивается с ростом значения угла регулирования.

Функция реактивного сопротивления ФСТ от изменения угла регулирования обычно приводится в виде табличной или графической зависимости, выполненной на основе экспериментальных исследований для каждого ФСТ, или в виде уравнения, содержащего начальное значение $x_{\text{фст}}$ принимаемое при нулевом угле регулирования, и дополнительное слагаемое, зависящее от величины угла регулирования [13, 14]. Следует заметить, что в преобладающем большинстве исследований реактивное сопротивление ФСТ принимают неизменной величиной из-за сложности расчетов. Однако в последние годы, в связи с увеличением количества ФСТ, а также их мощности и диапазона рабочего угла регулирования, в некоторых зарубежных исследованиях предлагается рассматривать в расчетах увеличение значения реактивного сопротивления ФСТ, особенно при работе с большими углами регулирования, например, в расчетах статической или динамической устойчивости [13]. Так, для трансграничного перетока мощности от 1000 МВт и выше через польско-германскую границу отмечена необходимость обеспечения угла регулирования ФСТ равного $\pm 45^\circ$ [15, 16].

Большинство графических функций $x_{\text{фст}}$ от угла регулирования для разных конструкций представлены в [3]. Приведенные кривые имеют одинаковый характер и отличаются степенью крутизны и начальной точкой графика. В качестве примера на рис. 2 продемонстрирована типичная зависимость изменения реактивного сопротивления ФСТ от его угла регулирования. При анализе видно, что на довольно длительном отрезке (примерно до 20°) значение $x_{\text{фст}}$ можно считать условно постоянным и равным начальному реактивному сопротивлению при нулевом угле регулирования, затем наблюдается резкий рост значения реактивного сопротивления ФСТ с увеличением угла регулирования. Используя графики зависимостей реактивных сопротивлений от угла регулирования, можно сделать расчет угла регулирования ФСТ с учетом изменения значения $x_{\text{фст}}$ и определить погрешность расчета угла регулирования по отношению к вычислению, в котором $x_{\text{фст}}$ принималось в качестве постоянной величины.

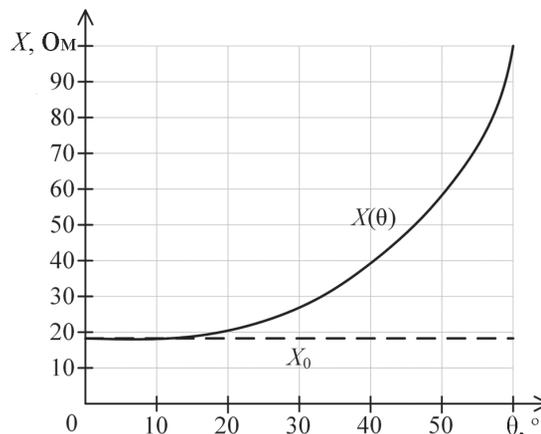


Рис. 2. Зависимость изменения реактивного сопротивления ФСТ от угла регулирования

Исследование влияния зависимости реактивного сопротивления фазосдвигающего трансформатора от его угла регулирования при расчете режимов сети

Рассмотрим случай расчета угла регулирования θ по критерию минимума потерь активной мощности (алгоритм I) на примере одноконтурной схемы электрической сети. Возьмем схему, где верхняя линия выполнена напряжением 500, а нижняя — 220 кВ. (рис. 3, а). Реактивное сопротивление ФСТ при нулевом угле регулирования примем равным $x_{\text{фст}} = 18$ Ом, параметры линий даны в табл. 1. До регулирования потери активной мощности в контуре составляют 32,371 МВт.

Углы регулирования ФСТ рассчитывали двумя способами: по алгоритмам (аналитически) и с помощью программного вычислительного комплекса (ПВК) расчета режимов RastrWin, используемого системным оператором ЕЭС России (итерационный способ). Если принять значение реактивного сопротивления ФСТ постоянной величиной, то расчет оптимального угла регулирования ФСТ по критерию минимальных потерь активной мощности, полученный итеративным способом, даст значение $-16,6^\circ$, при этом, потери составят 25,966 МВт. Потоки мощности изображены на рис. 3, б.

Расчет угла регулирования по формуле (3) показал аналогичное значение угла — $-16,52^\circ$. Потери мощности — 25,965 МВт. Используя графическую зависимость изменения реактивного сопротивления ФСТ от угла регулирования, попытаемся итеративным способом

Таблица 1

Параметры линий одноконтурной схемы

Ветви	Сопротивления ветвей, приведенные к 220 кВ, Ом	
	активное	реактивное
ЛЭП 1 (500 кВ)	1,233	19,96
ЛЭП 2 (220 кВ)	19,60	84,00

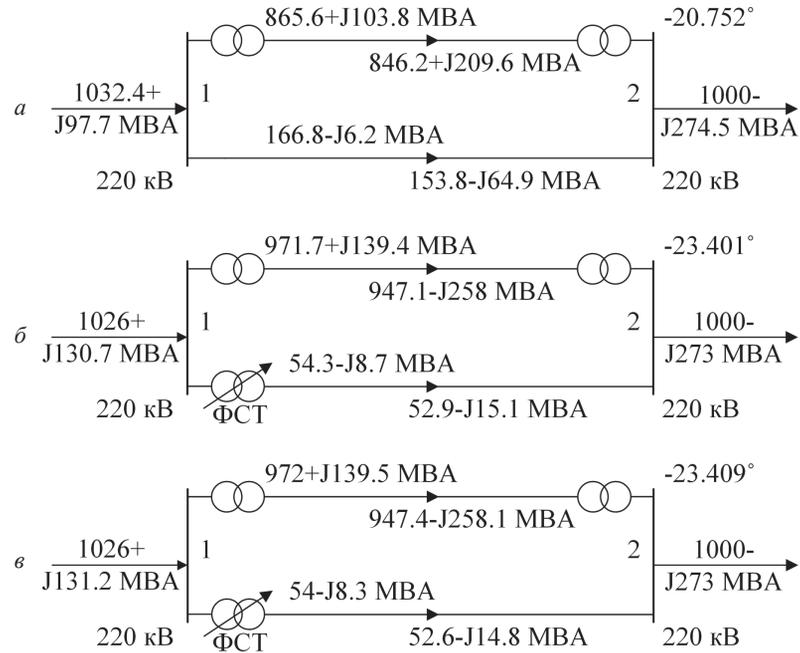


Рис. 3. Поток мощности при угле регулирования:

a — $\theta = 0^\circ$, $x_{\text{ФСТ}} = 18$ Ом, $\Delta P = 32,371$ МВт; $б$ — $\theta = -16,6^\circ$, $x_{\text{ФСТ}} = 18$ Ом, $\Delta P = 25,966$ МВт; $в$ — $\theta = -16,5^\circ$, $x_{\text{ФСТ}} = 20,35$ Ом, $\Delta P = 25,962$ МВт

с помощью вычислительного комплекса расчета режимов и формулы (3) алгоритма определить значение угла регулирования ФСТ при соответствующем ему значении сопротивления. Угол регулирования получился равным $-16,5^\circ$, ему соответствует сопротивление ФСТ — $x_{\text{ФСТ}} = 20,35$ Ом. Потери активной мощности — $25,962$ МВт (рис. 3, в). Расчет по алгоритму дал значение угла в $-16,35^\circ$, при $x_{\text{ФСТ}} = 20,32$ Ом потери составили $25,96$ МВт. Значения углов регулирования обоих расчетов близки, при этом значения углов не превышают 20° . Погрешность расчета значений углов при неучете изменения реактивного сопротивления — менее 1% (табл. 2).

Для фрагмента реальной схемы энергосистемы России, содержащей воздушные линии разных классов номинального напряжения, включая 500 и 220 кВ, состоящей из 893 узлов и 1383 ветвей, исследована возможность снижения потерь активной мощности за счет установки ФСТ в одном из ее контуров. Для этого сделан итеративный расчет двумя способами: по алгоритму и с помощью ПВК RastrWin. Расчет угла регулиро-

вания итеративным способом дал значение — $-18,55^\circ$ при сопротивлении ФСТ — $20,94$ Ом, по алгоритму — -17° при сопротивлении в $20,46$ Ом. При этом угол регулирования при постоянном реактивном сопротивлении ФСТ 18 Ом — $-18,65^\circ$ (табл. 3).

Изменением угла регулирования ФСТ можно принудительно перераспределить потоки активной мощности, устраняя неоднородность электрического контура сети и приводя естественное потокораспределение к экономическому. Неоднородность электрической сети обусловлена разными значениями отношения R/X линий электрического контура, а также величинами промежуточных нагрузок, если они имеются [17, 18]. Разница углов комплексных сопротивлений линий класса номинального напряжения 220 и 500 кВ составляет примерно $5...8^\circ$ [17], поэтому для экономического распределения потоков активной мощности не требуется большого значения угла регулирования ФСТ. При небольших углах регулирования можно принять $x_{\text{ФСТ}}$ постоянным. Это допущение не вносит большой погрешности в найденное значение угла.

Таблица 2

Расчет углов регулирования

Режим	Реактивное сопротивление $x_{\text{ФСТ}}$, Ом		Угол θ , °		Потери ΔP , МВт	
	RastrWin	алгоритм I	RastrWin	алгоритм I	RastrWin	алгоритм I
Начальный	18	18	0	0	32,371	32,371
$x_{\text{ФСТ}} = \text{const}$	18	18	-16,6	-16,52	25,966	25,965
$x_{\text{ФСТ}} = \text{var}$	20,35	20,32	-16,5	-16,35	25,962	25,96

Таблица 3

Расчет угла регулирования для ЭЭС

Режим	Реактивное сопротивление $x_{\text{ФСТ}}$, Ом		Угол θ , °		Потери ΔP , МВт	
	RastrWin	алгоритм I	RastrWin	алгоритм I	RastrWin	алгоритм I
Начальный	18	18*	0	0	65,85	65,642
$x_{\text{ФСТ}} = \text{const}$	18	18*	-18,65	-17,32*	58,144	58,105
$x_{\text{ФСТ}} = \text{var}$	20,94	20,46*	-18,55	-17,00*	58,168	58,120

* — расчет по алгоритму I выполнен для фрагмента ЭЭС

Для второго случая, связанного с более глубоким перераспределением потоков активной мощности в электрической сети (транзит, коммерческие поставки, плавка гололода), требуется значительная величина угла регулирования ФСТ. В современных ФСТ рабочий диапазон угла регулирования достигает 30...45°, однако, в исключительных случаях, величина угла может достигать 60° [15, 16, 19]. В связи с этим следует учитывать изменение $x_{\text{ФСТ}}$ от угла регулирования ФСТ.

Эту задачу можно решить итерационным способом с учетом зависимостей реактивного сопротивления ФСТ от угла регулирования. Так, для схемы на рис. 4, а требуется обеспечить поток активной мощности в верхней ветви контура, равный 1500 МВт.

Принимая индуктивное сопротивление ФСТ постоянным и равным 18 Ом, считая итеративным способом с помощью RastrWin, получим значение угла регулирования — -26,3° (рис. 4, б). Аналитический расчет по

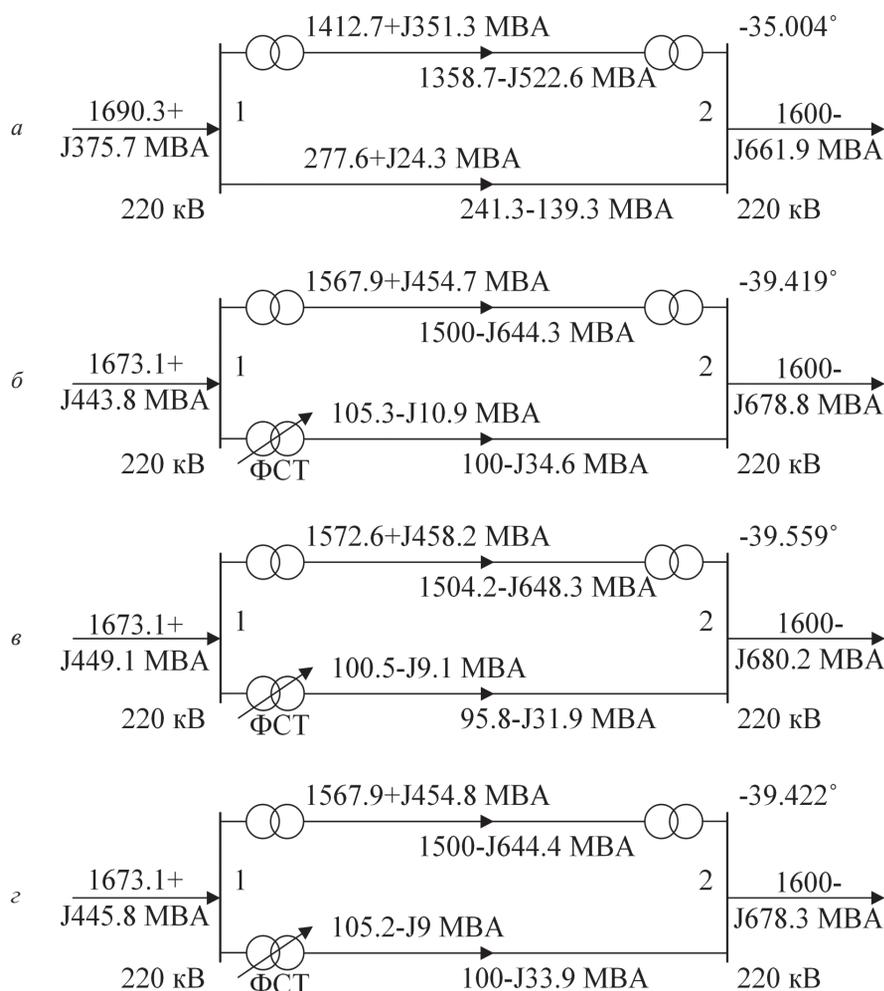


Рис. 4. Распределение активной мощности в ветвях контура:

а — при угле ФСТ 0° и сопротивлении 18 Ом; б — при угле ФСТ -26,3° и сопротивлении 18 Ом; в — при угле ФСТ -26,3° и сопротивлении 24,41 Ом; г — при угле ФСТ -25,6° и сопротивлении 24 Ом

Расчет угла регулирования для заданного перетока мощности

Режим	Реактивное сопротивление $x_{\text{ФСТ}}$, Ом		Угол θ , °		Активная мощность P_{12} , МВт
	RastrWin	алгоритм П	RastrWin	алгоритм П	
Начальный	18	18	0	0	1358,7
$x_{\text{ФСТ}} = \text{const}$	18	18	-26,3	-26,327	1500,0
$x_{\text{ФСТ}} = \text{var}$	24,41	24,41	-26,3	-26,327	1504,2
	24	24	-25,6	-25,59	1500,0

второму алгоритму при постоянном сопротивлении показал угол равным $-26,33^\circ$. Значения углов получаются близкими, но надо учитывать, что, согласно графической зависимости (см. рис. 2), углу регулирования $-26,3^\circ$ соответствует значение сопротивления ФСТ в 24,41 Ом. Если выполнить расчет, используя это значение сопротивления и найденное значение угла регулирования, то поток мощности составит 1504,2 МВт, что отличается от требуемого значения (см. рис. 3, в). Последующий расчет итеративным способом с помощью ПВК дал значение угла регулирования $-25,6^\circ$, при этом ФСТ имел соответствующее реактивное сопротивление, равное 24 Ом (см. рис. 3, з). Расчет по второму алгоритму продемонстрировал угол в $-25,59^\circ$ при сопротивлении 24 Ом. Затем вычисления значения угла проходили по формулам алгоритма с уточнением величины сопротивления ФСТ по графической зависимости. Выполнено меньшее количество итераций, чем при расчете первым способом. Вычисления обоими способами дали одинаковые результаты угла и сопротивления ФСТ. Погрешность расчета угла регулирования составила 3%. Расчеты параметров режима и значения активной мощности (в абсолютных величинах) привели к погрешности 4,2 МВт (табл. 4).

Литература

1. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.: Торус Пресс, 2011.
2. Солдатов В.А. и др. Экспериментальное исследование параметров и режимов линии электропередачи с управляемой продольной компенсацией // Электрические станции. 2001. № 9. С. 46—50.
3. Киорсак М.В., Солдатов В.А., Зайцев Д.А., Калинин Л.П. Гибкие линии электропередачи с продольно-емкостной компенсацией и фазоповоротным трансформатором. Кишинев: АН Молдовы, 1997.
4. Евдокунин Г.А., Николаев Р.Н., Исаков А.К., Оспанов Б.К., Утегулов Н.И. Фазоповоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане // Новости электротехники. 2008. № 6(48). С. 38—41.
5. Крицкий В.А., Евдокунин Г.А., Брилинский А.С., Смирнова Л.С. Применение фазоповоротного трансформатора в схеме выдачи мощности Волжской ГЭС // Электрические станции. 2018. № 12. С. 26—30.

Заключение

Согласно проведенным исследованиям для случая нахождения угла регулирования ФСТ, изменения его реактивного сопротивления по критерию минимальных потерь можно не учитывать. Это возможно в силу небольшого значения угла (не превышает 20°). Погрешность расчета величины угла регулирования и параметров режима незначительна.

При анализе случаев с более глубоким перераспределением потоков активной мощности, когда нужно одну линию контура электрической сети сильно загрузить или наоборот разгрузить, необходимы большие значения угла регулирования ФСТ. При них желательно учитывать изменение реактивного сопротивления ФСТ от угла регулирования. С ростом величины угла увеличивается реактивное сопротивление. Пренебрежение указанной зависимостью может привести к погрешности в расчете угла, а также параметрах режима, в частности, потоках активной мощности в ветвях. Значения углов регулирования, полученные по формулам обоих алгоритмов и с помощью итерационного расчета в ПВК RastrWin, практически совпадают.

References

1. Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G. Primenenie Gibkikh (Upravlyayemykh) Sistem Elektroperedachi Peremennogo Toka v Energosistemakh. M.: Torus Press, 2011. (in Russian).
2. Soldatov V.A. i dr. Eksperimental'noe Issledovanie Parametrov i Rezhimov Linii Elektroperedachi s Upravlyayemoy Prodol'noy Kompensatsiyey. Elektricheskie Stantsii. 2001;9:46—50. (in Russian).
3. Kiorsak M.V., Soldatov V.A., Zaytsev D.A., Kalinin L.P. Gibkie Linii Elektroperedachi s Prodol'no-emkostnoy Kompensatsiyey i Fazopovorotnym Transformatorom. Kishinev: AN Moldovy, 1997. (in Russian).
4. Evdokunin G.A., Nikolaev R. N., Isakov A.K., Ospanov B.K., Utegulov N.I. Fazopovorotnyy Transformator Vpervye v SNG Primenen v Kazakhstane. Novosti Elektrotekhnik. 2008;6(48):38—41. (in Russian).
5. Kritskiy V.A., Evdokunin G.A., Brilinskiy A.S., Smirnova L.S. Primenenie Fazopovorotnogo Transformatora v Skheme Vydachi Moshchnosti Volzhskoy GES. Elektricheskie Stantsii. 2018;12:26—30. (in Russian).

6. **Xihg K., Kusic G.** Application of Thyristor-controlled Phase-shifters to Minimize Real Power Losses and Augment Stability of Power Systems // IEEE Trans. Energy Conversion. 1988. V. 3. No. 4. Pp. 792—798.
7. **Солдатов В.А., Дубков А.А.** Применение фазового управления для снижения потерь мощности в энергосистемах // Известия АН МССР. Серия «Физико-технические и математические науки». 1989. № 2. С. 48—51.
8. **Стельмаков В.Н., Тарасов А.Н.** Анализ электромагнитных процессов в фазоповоротном устройстве с тиристорным управлением // Электричество. 2015. № 11. С. 4—11.
9. **Асташев М.Г., Панфилов Д.И.** Фазоповоротные устройства с тиристорными коммутаторами для активно-адаптивных электрических сетей // Электричество. 2013. № 8. С. 60—65.
10. **Локтионов С.В., Сыромьятников С.Ю.** Разработка алгоритма для выбора места установки фазорегулирующего трансформатора в энергосистеме // Вестник МЭИ. 2003. № 1. С. 41—49.
11. **Бондаренко А.Ф. и др.** Современные тенденции развития техники и технологий электроэнергетических систем. М.: Изд-во МЭИ, 2018.
12. **Локтионов С.В.** Определение угла регулирования фазосдвигающего трансформатора при задании фиксированного перетока мощности по ветви // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». 2018. № 3(59). С. 165—179.
13. **Verboomen K.J., Van Hertem D., Schavemaker P.H., Kling W.L., Belmans R.** The Influence of Phase-shifting Transformers on Transient Stability // Proc. UPEC Conf. 2005. Pp. 1—5.
14. **Doğan E., Yörükeren N.** Investigation of Control of Power Flow by Using Phase Shifting Transformers: Turkey Case Study // Turkish J. Electrical Eng. & Computer Sci. 2019. V. 27. Pp. 2259—2275.
15. **Lubicki W., Kocot H., Korab R., Przygodzki M., Tomasik G., Żmuda K.** Improving the Cross-border Transmission Capacity of Polish Power System by Using Phase Shifting Transformers // Rep. CIGRE. 2014. C1-108.
16. **Korab R., Owczarek R.** Impact of Phase Shifting Transformers on Cross-border Power Flows in the Central and Eastern Europe Region // Bull. Polish Academy of Sci. Techn. Sci. 2016. V. 64. No. 1. Pp. 127—133.
17. **Кузнецова Г.А., Лоханин Е.К. Ольшванг М.В., Остапенко Е.И.** Ступенчато регулируемые автотрансформаторы как средство оптимизации потоков распределения в электрических сетях // Электротехника: Сб. докл. М.: Изд-во ВЭИ, 1997. Т. 1. Ч. 1. С. 114—119.
18. **Холмский В.Г.** Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. М.: Высшая школа, 1975.
19. **Verboomen K.J., Spaan F.J., Schavemaker P.H.** Method for Calculating Total Transfer Capacity by Optimising Phase Shifting Transformer Settings // Rep. CIGRE. 2008. C1-111.
6. **Xihg K., Kusic G.** Application of Thyristor-controlled Phase-shifters to Minimize Real Power Losses and Augment Stability of Power Systems. IEEE Trans. Energy Conversion. 1988;3;4:792—798.
7. **Soldatov V.A., Dubkov A.A.** Primenenie Fazovogo Upravleniya dlya Snizheniya Poter' Moshchnosti v Energosistemakh. Izvestiya AN MSSR. Seriya «Fiziko-tehnicheskie i Matematicheskie Nauki». 1989;2:48—51. (in Russian).
8. **Stel'makov V.N., Tarasov A.N.** Analiz Elektromagnitnykh Protssesov v Fazopovorotnom Ustroystve s Tiristornym Upravleniem. Elektrichestvo. 2015;11:4—11. (in Russian).
9. **Astashev M.G., Panfilov D.I.** Fazopovorotnyye Ustroystva s Tiristornymi Kommutatorami dlya Aktivno-adaptivnykh Elektricheskikh Setey. Elektrichestvo. 2013; 8:60—65. (in Russian).
10. **Loktionov S.V., Syromyatnikov S.Yu.** Razrabotka Algoritma dlya Vyboru Mesta Ustanovki Fazoreguliruyushchego Transformatora v Energosisteme. Vestnik MEI. 2003;1:41—49. (in Russian).
11. **Bondarenko A.F. i dr.** Sovremennyye Tendentsii Razvitiya Tekhniki i Tekhnologiy Elektroenergeticheskikh Sistem. M.: Izd-vo MEI, 2018. (in Russian).
12. **Loktionov S.V.** Opredelenie Ugla Regulirovaniya Fazosdvigayushchego Transformatora pri Zadaniy Fiksirovannogo Peretoka Moshchnosti po Vetvi. Vestnik Samarskogo Gos. Tekhn. Un-ta. Seriya «Tehnicheskie Nauki». 2018;3(59):165—179. (in Russian).
13. **Verboomen K.J., Van Hertem D., Schavemaker P.H., Kling W.L., Belmans R.** The Influence of Phase-shifting Transformers on Transient Stability. Proc. UPEC Conf. 2005:1—5.
14. **Doğan E., Yörükeren N.** Investigation of Sontrol of Power Flow by Using Phase Shifting Transformers: Turkey Case Study. Turkish J. Electrical Eng. & Computer Sci. 2019;27:2259—2275.
15. **Lubicki W., Kocot H., Korab R., Przygodzki M., Tomasik G., Żmuda K.** Improving the Sross-border Transmission Capacity of Polish Power System by Using Phase Shifting Transformers. Rep. CIGRE. 2014. C1-108.
16. **Korab R., Owczarek R.** Impact of Phase Shifting Transformers on Cross-border Power Flows in the Central and Eastern Europe Region. Bull. Polish Academy of Sci. Techn. Sci. 2016;64;1:127—133.
17. **Kuznetsova G.A., Lokhanin E.K., Ol'shvang M.V., Ostapenko E.I.** Stupenchatu Reguliruemye Avtotransformatory kak Sredstvo Optimizatsii Potokoraspredeleniya v Elektricheskikh Setyakh. Elektrotehnika: Sb. Dokl. M.: Izd-vo VEI, 1997;1;1:114—119. (in Russian).
18. **Kholm'skiy V.G.** Raschet i Optimizatsiya Rezhimov Elektricheskikh Setey. M.: Vysshaya Shkola, 1975. (in Russian).
19. **Verboomen K.J., Spaan F.J., Schavemaker P.H.** Method for Calculating Total Transfer Capacity by Optimising Phase Shifting Transformer Settings. Rep. CIGRE. 2008. C1-111.

Сведения об авторах:

Локтионов Сергей Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: o-ringen2014@mail.ru

Кочергин Алексей Валерьевич — аспирант кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: KocherginAV@hotmail.com

Шаров Алексей Николаевич — старший преподаватель кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: SharovAN@mpei.ru

Локтионов Глеб Сергеевич — магистрант кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», инженер-метролог метрологического отдела ООО «Сонел», e-mail: loktionov.gleb@bk.ru

Information about authors:

Loktionov Sergey V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electric Power Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: o-ringen2014@mail.ru

Kochergin Aleksey V. — Ph.D.-student of Electric Power Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: KocherginAV@hotmail.com

Sharov Aleksey N. — Senior Lecturer of Electric Power Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: SharovAN@mpei.ru

Loktionov Gleb S. — Master's student of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., NRU MPEI, Engineer Metrologist of Metrological Dept., LLC «Sonel», e-mail: loktionov.gleb@bk.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 09.04.2020

The article received to the editor: 09.04.2020