

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА РЕГУЛИРОВАНИЯ ФАЗОСДВИГАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЗАДАНИИ ФИКСИРОВАННОГО ПЕРЕТОКА МОЩНОСТИ ПО ВЕТВИ

С.В. Локтионов

Национальный исследовательский университет (МЭИ)
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

***Аннотация.** Фазосдвигающий трансформатор (ФСТ) служит для принудительного перераспределения потоков активной мощности в контуре с целью снижения ее потерь, а также для изменения потока мощности по ветвям контура в коммерческих или иных целях. Ранее был предложен алгоритм, позволяющий определять наилучшее место его установки в контуре по критерию минимальных потерь активной мощности и угол регулирования аналитическим путем, избегая метода перебора. При выводе формулы расчета угла использовались уравнения баланса мощности в узле. В данной статье рассматривается алгоритм расчета угла регулирования ФСТ для обеспечения нужного потока активной мощности в одной из ветвей контура с применением данного подхода. Рассмотрены примеры применения алгоритма расчета угла на различных видах схем, показана возможность рассмотрения фрагментов схем для упрощения расчетов, а не всей схемы, состоящей из большого количества узлов и ветвей.*

***Ключевые слова:** рынок электроэнергии, управляемые системы электропередачи, фазосдвигающий трансформатор, расчет угла регулирования, управление перетоками мощности.*

Введение

В мировой и отечественной литературе последние несколько лет уделяется повышенное внимание проблеме управляемости электроэнергетических систем за счет применения специальных технических средств воздействия на ее режим. С одной стороны, это обусловлено введением рыночных отношений в электроэнергетике и децентрализацией управления ряда энергообъединений, требующей повышения гибкости их работы, а с другой – появлением нового класса регулирующих устройств, базирующихся на применении силовой электроники (FACTS). Электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей. Большой интерес к перспективам применения устройств FACTS в Единой энергосистеме России (ЕЭС) обусловлен наличием таких проблем, как недостаточная пропускная способность системообразующих электрических сетей, слабая управляемость сетей и недостаточный объем устройств регулирования напряжения и реактивной мощности, неоптимальное распределение потоков мощности по линиям электропередачи разного класса напряжения. Одним из известных и применяемых элементов, относящихся к FACTS-оборудованию, является ФСТ [1]. Это устройство, позволяющее осуществить преднамеренное поперечное регулирование напряжения, в результате

чего изменяется угол между векторами напряжений по концам электропередачи (в которую включен ФСТ) и, как следствие, происходит желаемое изменение мощности, передаваемой по этой электропередаче, вне зависимости от параметров шунтирующих связей. ФСТ может применяться для снижения потерь активной мощности, обусловленных неоднородностью электрической сети, а также для обеспечения заданного потока мощности в одной из ветвей контура. Также изучалась возможность создания гибких линий электропередачи на основе комплексного применения ФСТ с продольной емкостной компенсацией реактивного сопротивления ФСТ для снижения потерь активной мощности и повышения пропускной способности контура [2]. Применение ФСТ для снижения потерь мощности и поиск оптимального места его установки в электрической сети рассматривались как в зарубежных работах, так и работах ученых стран СНГ, в частности много внимания этому уделялось в исследованиях Института электроэнергетики (АН Молдовы) [3].

Для поиска оптимального места установки ФСТ в схеме использовались различные подходы, например изложенные в [4–9]. Каждый из них имел свои достоинства и недостатки [10]. Однако общим слабым местом всех подходов являлся тот факт, что после нахождения оптимального места установки ФСТ в контуре тем или иным способом величину угла регулирования, а также его знак (положительный или отрицательный) для каждого режима требовалось определять методом перебора. Вывести аналитическую формулу определения оптимального угла регулирования ФСТ, а также преодолеть недостатки иных предлагаемых подходов к решению задачи выбора наилучшего места установки ФСТ в контуре удалось с помощью принципа существования баланса мощности в узле в любой момент времени. Предложенный в [10] алгоритм позволял по параметрам схемы и исходного режима электроэнергетической системы с учетом параметров ФСТ для каждой из рассматриваемых ветвей определить безытерационно оптимальное значение угла регулирования $\theta^{\text{опт}}$ и соответствующее значение суммарных потерь активной мощности в схеме.

Кроме того, что ФСТ может перераспределять потоки активной мощности с целью снижения суммарных потерь, ФСТ способен решать и другие задачи, например для принудительного перераспределения трансграничных потоков мощности в контуре с целью избежать значительной платы или запрета на транзит по территории другого государства или по линиям, принадлежащим другому собственнику [11]. Особенно это стало актуальным сегодня в свете либерализации рынка электроэнергии. Первый установленный ФСТ в СНГ (Казахстан) был предназначен именно для снижения загрузки линии 220 кВ, проходящей через территорию России, с целью обойти запрет на транзит мощности [12]. ФСТ помогает перенаправлять потоки мощности от производителя к потребителю в рыночных условиях по заранее заданному маршруту, обходя узкие места. ФСТ также способен увеличивать загрузку воздушной линии для борьбы с гололедом. Первый собранный в СССР в 1991 году, но не установленный ФСТ предназначался для плавки гололеда в Одесской области. В специализированной технической литературе была информация о планах установки в конце второго десятилетия нашего века в России в районе Омска быстродействующего тиристорно-управляемого ФСТ. Для управления быстродействующим ФСТ и решения вопросов динамической устойчивости потребуются алгоритмы управления, возникнет необходимость их программирования и метод перебора для поиска угла регулирования будет неприемлем. Таким образом, встает вопрос о получении

расчетной формулы нахождения угла регулирования. Аналитический расчет угла регулирования для обеспечения необходимого значения перетока активной мощности в выбранной ветви контура может быть получен на основе аналогичного подхода, изложенного в [10].

Вывод расчетных выражений

При разработке алгоритма, изложенного в [10], принимались следующие допущения:

1. ФСТ вводится в схему замещения в виде постоянного продольного сопротивления $Z_f = R_f + jX_f$ с комплексным коэффициентом трансформации; создаваемый с помощью ФСТ фазовый сдвиг в контуре обозначается углом регулирования θ .

2. При включении ФСТ в схему и изменении угла регулирования от $\theta=0^\circ$ до другого значения модули напряжений в узлах сети будут постоянными и равными значениям напряжений в исходном режиме без ФСТ или при $\theta=0^\circ$ в зависимости от условий задачи.

Рассмотрим вывод алгоритма нахождения угла регулирования ФСТ для обеспечения необходимого значения перетока мощности в одной из ветвей контура электрической сети с использованием вышеперечисленных допущений. Для любой ветви с параметрами R, X можно записать выражения для активной мощности начала и конца ветви (рис. 1):

$$P = U_1^2 y \sin \alpha + U_1 U_2 y \sin(\delta - \alpha); \quad (1)$$

$$P' = -U_2^2 y \sin \alpha + U_1 U_2 y \sin(\delta + \alpha), \quad (2)$$

где $y = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}$; $\alpha = \arctg \frac{R}{X}$;

U_1, U_2 – модули напряжения в начале и конце ветви соответственно;

δ – угол между векторами напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 .

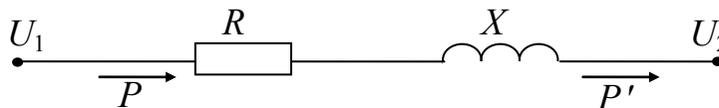


Рис. 1. Мощности в начале и конце ветви

На базе выражений (1), (2) был построен алгоритм и выведена формула расчета угла регулирования по критерию минимальных потерь активной мощности (первый алгоритм) [10]. Получив значения минимальных потерь активной мощности от установки ФСТ в разных ветвях контура, затем определяли наилучшую ветвь для его установки. При решении другой задачи, обеспечения необходимого перетока мощности по заданной ветви контура, также необходимо получить аналитическое выражение для расчета величины угла ФСТ, который надо установить для достижения намеченной цели.

Для решения этой практической задачи можно применить уже апробированный подход, в основе которого лежит существование баланса мощности в узле в любой момент времени. При получении аналитических выражений для расчета угла регулирования ФСТ будем опираться на расчеты и выводы, полученные ранее в [10] для первого алгоритма (определение угла регулирования по критерию минимальных потерь активной мощности).

Считаем, что ФСТ уже установлен в одной из ветвей контура и допустим по

критерию минимальных потерь активной мощности. Пусть какой-либо узел m многоконтурной схемы электрической сети связан с несколькими ветвями, по которым «приходит» к данному узлу или «отходит» от узла активная мощность. В любой момент времени в узле сохраняется баланс мощности – это значит, что изменение мощности в какой-либо ветви схемы приводит к изменению мощности в остальных ветвях. При этом сумма изменений мощностей в ветвях, связанных с данным узлом m , равна нулю. При записи уравнений баланса мощности примем следующие обозначения. Ветвь, соединяющая узлы m и k , обозначается как mk . Параметрам режима с включенным в ветвь mk ФСТ с углом регулирования $\theta_{mk} = 0$ присвоим индекс 0, при этом проводимости y_{mk} и углу α_{mk} ветви с ФСТ присвоим индекс f . Остальные ветви, связанные с узлом m , обозначим как l .

В [10] было показано, что ФСТ не только изменяет параметры режима своим углом регулирования, но также за счет своего значительного реактивного сопротивления перераспределяет потоки мощности по ветвям, действуя при этом как продольный реактор. Однако в случае решения нашей задачи считается, что ФСТ уже установлен. Это значит, что он вводится согласно принятым допущениям постоянным сопротивлением, при этом его сопротивление уже было просуммировано с сопротивлением ветви, в которой он находится. Таким образом, его сопротивление уже учитывается в расчете исходного установившегося режима и не влияет самостоятельно на последующее перераспределение мощности в контуре в качестве реактора. Поэтому остается только найти угол регулирования для обеспечения заданного перетока мощности в конкретной ветви контура.

В общем виде уравнение баланса активной мощности в узле m , составленное по принципу «было (до регулирования углом) – стало (после регулирования углом)», взятое из [10], имеет вид

$$\begin{aligned} & -U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \mp U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf}) + U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \pm \\ & \pm U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf} + \Delta \delta_{mk} + \theta_{mk}) - U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} + \\ & + U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml})] + U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} - \\ & - U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml} + \Delta \delta_{ml})] = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь для отходящей от узла m мощности используется выражение (1), а для приходящей мощности – выражение (2).

Если надо обеспечить фиксированный переток активной мощности P^{fix} по ветви mn , связанной с узлом m , в которой не стоит ФСТ, то выражение (3) примет вид

$$\begin{aligned} & -U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \mp U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf}) + U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \pm \\ & \pm U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf} + \Delta \delta_{mk} + \theta_{mk}) - U_m^2 y_{mn} \sin \alpha_{mn} \mp \\ & \mp U_m U_n y_{mn} \sin(\delta_{mn}^0 \mp \alpha_{mn}) \pm P_{mn}^{fix} - U_m^2 \sum_l (y_{ml} \sin \alpha_{ml}) + \\ & + U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml})] + U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} - \\ & - U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml} + \Delta \delta_{ml})] = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Если переток активной мощности задан в ветви, содержащей ФСТ, тогда выражение примет вид

$$\begin{aligned}
& -U_m^2 y_{mkf} \sin \alpha_{mkf} \mp U_m U_k y_{mkf} \sin(\delta_{mk}^0 \mp \alpha_{mkf}) \pm P_{mnf}^{fix} - \\
& -U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} + U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml})] + \\
& + U_m^2 \sum_l y_{ml} \sin \alpha_{ml} - U_m \sum_l [\mp U_l y_{ml} \sin(\delta_{ml}^0 \mp \alpha_{ml} + \Delta\delta_{ml})] = 0, \quad (5)
\end{aligned}$$

где для выражений (3)–(5) l – множество номеров узлов, непосредственно связанных с узлом m линиями или трансформаторами; $l \neq k \neq n$; верхний знак («+» или «–») соответствует отходящей от узла m мощности, а нижний знак соответствует приходящей к узлу мощности; если ветвь, в которую включен ФСТ, не связана с рассматриваемым узлом m , в выражении следует принять $y_{mkf} = 0$;

P_{mnf}^{fix} – требуемый переток активной мощности по линии;

$$\Delta\delta_{mk} = \delta_{mk} - \delta_{mk}^0, \Delta\delta_{ml} = \delta_{ml} - \delta_{ml}^0.$$

Выражение для заданной мощности имеет вид, согласно (1) и (2),

$$P_{mn}^{fix} = \pm U_m^2 y_{mn} \sin \alpha_{mn} + U_m U_n y_{mn} \sin(\delta_{mn}^0 + \Delta\delta_{mn} \mp \alpha_{mn}), \quad (6)$$

где верхний знак («+» или «–») соответствует отходящей от узла m мощности, а нижний знак соответствует приходящей к узлу мощности.

При дальнейшем выводе уравнений для расчета оптимального угла регулирования ФСТ по критерию минимальных потерь полагали, что $\sin \Delta\delta_{mk} \approx \Delta\delta_{mk}$, $\cos \Delta\delta_{mk} \approx 1$, $\sin \Delta\delta_{ml} \approx \Delta\delta_{ml}$, $\cos \Delta\delta_{ml} \approx 1$ и решали линеаризованные в точке исходного установившегося режима уравнения, в которых приращения взаимных углов $\Delta\delta_{mk}$ и $\Delta\delta_{ml}$ выступали как неизвестные. Регулирование режима с помощью ФСТ означает фактическое снижение неоднородности сети путем введения дополнительного угла, который принудительно уравнивает углы наклона X/R разных ветвей [13, 14]. Это не требует введения значительного угла в контур сети, поэтому линеаризация всех уравнений не вносит серьезных погрешностей в вычисления. В нашем случае применяется одно полное нелинеаризованное уравнение мощности (6), а линеаризация остальных уравнений системы может дать серьезную погрешность. Так как перераспределение мощности может быть значительным и ничем не ограниченным (кроме термической стойкости провода и режимных ограничений по статике), то при этом угол регулирования может иметь большое значение. Поэтому надо решать систему уравнений по полным нелинеаризованным уравнениям. Количество неизвестных, равное числу ветвей, превышает количество уравнений, равное числу j узлов без балансирующего узла ($j = J - 1$, где J – число узлов в схеме). Необходимо добавить недостающие уравнения – это уравнения фазового сдвига в контуре. Их количество равно числу H независимых контуров. При записи каждого дополнительного уравнения суммирование производится по ветвям, образующим контур, и ставится знак «+», если произвольно выбранное направление обхода контура совпадает с направлением активной мощности в данной ветви в исходном режиме, и знак «–», если не совпадает:

$$\sum(\pm \Delta\delta_{pq}^0) = 0, \quad (7)$$

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

Полученная система из j уравнений вида (3)–(6) и H уравнений вида (7) решается любым известным способом.

Примеры применения алгоритма

Рассмотрим применение разработанного алгоритма поэтапно, как это делалось в [10, 15], сначала для простейшей одноконтурной схемы без промежуточного отбора мощности (рис. 2). Значения параметров схемы и исходного режима приведены в приложении 1. Сопротивление ФСТ будет суммироваться с сопротивлением той ветви, в которую он будет установлен.

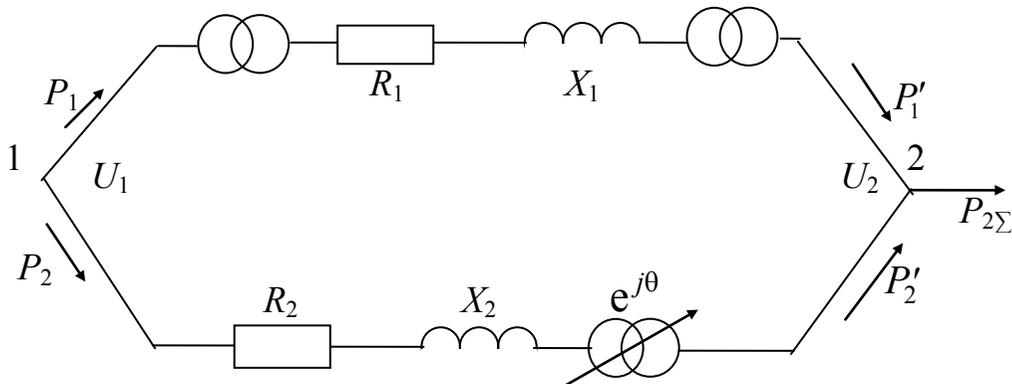


Рис. 2. Одноконтурная схема

В [10, 15] было показано, что включение ФСТ в линию 500 кВ (сопротивление $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$) приведет к увеличению суммарных потерь активной мощности, а также это будет существенно дороже из-за конструктивного выполнения на более высокое номинальное напряжение. Поэтому ФСТ устанавливается в ветви с номинальным напряжением 220 кВ (с сопротивлением $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$). В верхней ветви отсутствуют отборы мощности, поэтому последовательно соединенные трансформаторы и воздушную линию можно рассматривать как одну ветвь 1–2, присвоив ей индекс 1; нижней ветви присваивается индекс 2. Пусть в ветви 1 необходимо получить переток активной мощности, равный 900 МВт, для этого надо найти значение угла регулирования ФСТ, при котором он будет обеспечен. Считаем, что нагрузка узла 2 $P_{2\Sigma} = \text{const}$.

Баланс активной мощности «было – стало» для узла 2 можно записать в виде

$$P_1^{\prime 0} + P_2^{\prime 0} = P_1' + P_2' = P_{2\Sigma},$$

где $P_1^{\prime 0}, P_2^{\prime 0}$ – значения мощностей при угле регулирования ФСТ $\theta = 0^\circ$;

P_1', P_2' – значения мощностей при угле регулирования, обеспечивающем заданный переток активной мощности в ветви 1:

$$P_1^{\prime 0} - P_1' + P_2^{\prime 0} - P_2' = 0;$$

$$P_1^{\prime 0} - 900 + P_2^{\prime 0} - P_2' = 0.$$

Обе мощности приходят к узлу 2. Выражаем значения активных мощностей через параметры схемы и режима с помощью уравнения (2). Запишем уравнения вида (4) для узла 2:

$$\begin{aligned} & -U_2^2 y_{2f} \sin \alpha_{2f} + U_1 U_2 y_{2f} \sin(\delta^0 + \alpha_{2f}) + U_2^2 y_{2f} \sin(\alpha_{2f} - \\ & - U_1 U_2 y_{2f} \sin(\delta^0 + \Delta\delta_2 + \alpha_{2f} + \theta) - U_2^2 y_1 \sin \alpha_1 + \end{aligned}$$

$$+U_1U_2y_1 \sin(\delta^0 + \alpha_1) - P_1^{fix} = 0.$$

После преобразований получим

$$U_1y_2f \sin(\delta^0 + \alpha_{2f}) - U_1y_2f \sin(\delta^0 + \alpha_{2f} + \Delta\delta_2 + \theta) - \\ -U_2y_1 \sin \alpha_1 + U_1y_2 \sin(\delta^0 + \alpha_1) - \frac{P_1^{fix}}{U_2} = 0.$$

Уравнение содержит два неизвестных $\Delta\delta_2$ ($\Delta\delta_2 = \Delta\delta_1$) и θ . Чтобы их найти, необходимо добавить еще одно уравнение. Добавляем уравнение мощности в ветви 1 (6):

$$P_1^{fix} = -U_2^2y_1 \sin \alpha_1 + U_1U_2y_1 \sin(\delta^0 + \Delta\delta_1 + \alpha_1).$$

Решаем оба этих уравнения и получаем значение угла регулирования ФСТ равное, $-7,6^\circ$, которое необходимо установить, чтобы обеспечить поток активной мощности по ветви 1, равный 900 МВт. В качестве эталонной программы для проведения сравнения и оценки вычислений системный оператор ЕЭС (СО ЕЭС) России разрешает применять программу RastrWin. Расчет методом перебора угла с помощью программы RastrWin с гарантированной малой погрешностью (точный способ) дает аналогичный результат, найденный по приведенным формулам (приближенный) (см. табл. 1)

Таблица 1

Значения угла регулирования

ФСТ в ветви	Способ расчета	$\Delta\delta_1 = \Delta\delta_2$, град	θ° , град
2	RastrWin	1,085	-7,6
	Формула	1,085	-7,66

Рассмотрим одноконтурную схему с отбором мощности на стороне 220 кВ (рис. 3). Значения параметров схемы и исходного режима приведены в приложении 2.

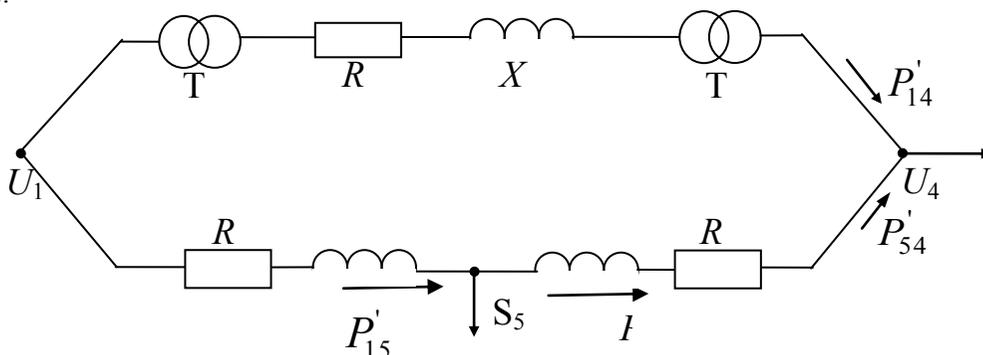


Рис. 3. Одноконтурная схема с промежуточным отбором мощности

Сопротивление ФСТ аналогично суммируется с сопротивлением той ветви, в которой он будет установлен. В данном случае это ветвь 1–5 с номинальным напряжением 220 кВ. Аналогично обозначим последовательно соединенные ветви (трансформаторы и воздушная линия) как одну ветвь 1–4. Пусть требуется

обеспечить поток активной мощности, равный 999,3 МВт, по ветви 1–4. Рассчитаем угол регулирования ФСТ, который необходимо при этом задать.

Для этого запишем уравнение баланса активной мощности в узле 5, воспользовавшись уравнением (4):

$$\begin{aligned} P'_{15}{}^0 - P'_{15} + P_{54} - P_{54}{}^0 &= 0; \\ P'_{15}{}^0 - P'_{15} + P_{54} - P_{54}{}^0 &= 0; \\ U_1 y_{15f} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15f}) - U_5 y_{15f} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15f} + \Delta\delta_{15} + \theta) - \\ - U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54}) + U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54} + \Delta\delta_{54}) &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Для узла 4 уравнения баланса мощности имеют вид

$$\begin{aligned} P'_{54}{}^0 - P'_{54} + P'_{14}{}^0 - P'_{14} &= 0; \\ P'_{54}{}^0 - P'_{54} + P'_{14}{}^0 - 999,3 &= 0; \\ -U_1 y_{14} \sin \alpha_{14} + U_1 y_{14} \sin(\delta_{14}^0 + \alpha_{14}) - \frac{P_{14}^{fix}}{U_4} + U_5 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 + \alpha_{54}) - \\ - U_1 y_{14} \sin(\delta_{54}^0 + \alpha_{54} + \Delta\delta_{54}) &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения (8), (9) содержат четыре неизвестных: $\Delta\delta_{15}$, $\Delta\delta_{54}$, $\Delta\delta_{14}$, θ . Поэтому для их нахождения надо добавить еще два уравнения. Одним из уравнений будет уравнение суммы приращения взаимных углов в контуре (7), которое с учетом направлений потоков активной мощности в исходном режиме имеет вид

$$\Delta\delta_{54} + \Delta\delta_{15} - \Delta\delta_{14} = 0. \quad (10)$$

Второе уравнение – это уравнение приходящей активной мощности для ветви (6):

$$P_{14}^{fix} = -U_4^2 y_{14} \sin \alpha_{14} + U_1 U_4 y_{14} \sin(\delta_{14}^0 + \Delta\delta_{14} + \alpha_{14}). \quad (11)$$

Решение системы, состоящей из уравнений (8)–(11), даст решение относительно поиска угла ФСТ. В табл. 2 приведены значения приращений взаимных углов и угол регулирования ФСТ, рассчитанные по формулам и полученные с помощью программы RastrWin методом перебора. Значения углов практически равны.

Таблица 2

Значения приращений взаимных углов для одноконтурной схемы

ФСТ в ветви	Способ расчета	$\Delta\delta_{15}$, град	$\Delta\delta_{54}$, град	$\Delta\delta_{14}$, град	θ° , град
1–5	RastrWin	4,45	-3.08	1,46	-10,6
	Формула	4,537	-3.08	1,457	-10,26

Рассмотрим двухконтурную схему с отбором мощности в качестве следующей иллюстрации работы алгоритма. Схема, представленная на рис. 4, содержит ветви 1–3 и 3–4 с напряжением 500 кВ, ветви 1–5 и 5–4 с напряжением 220 кВ (параметры режима и схемы – см. приложение 3). ФСТ установлен в ветви 1–5 (его сопротивление просуммировано с сопротивлением ветви 1–5), являющейся оптимальным местом установки ФСТ по критерию минимальных потерь активной мощности. Данный расчет был показан в [10].

Пусть требуется обеспечить поток активной мощности по линии 1–3, равный 1405 МВт. Для этого требуется рассчитать угол регулирования, который надо установить на ФСТ. Составим систему уравнений.

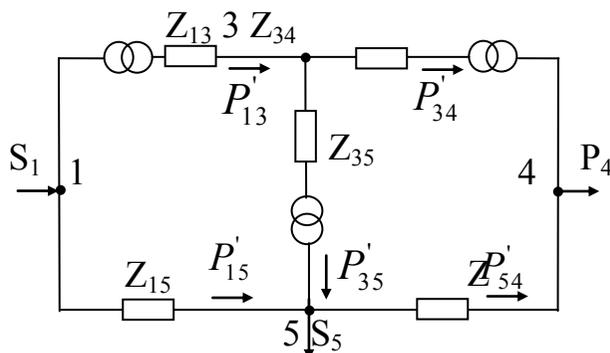


Рис. 4. Двухконтурная схема

Для узла 3 уравнение (4) имеет вид

$$-U_3 y_{34} \sin \alpha_{13} + U_1 y_{13} \sin(\delta_{13}^0 + \alpha_{13}) - \frac{P'_{13}{}^{fix}}{U_3} - U_4 y_{34} \sin(\delta_{34}^0 - \alpha_{34}) + \\ + U_{34} y_{34} \sin(\delta_{34}^0 - \alpha_{34} + \Delta\delta_{34}) - U_5 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 - \alpha_{35}) + U_5 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 - \\ - \alpha_{35} + \Delta\delta_{35}) = 0.$$

Для узла 5 уравнение (3) запишем

$$U_1 y_{15} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15}) - U_1 y_{15} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15} + \Delta\delta_{15} + \theta) + U_3 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 + \\ + \alpha_{35}) + U_3 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 + \alpha_{35} + \Delta\delta_{35}) - U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54}) + \\ + U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54} + \Delta\delta_{54}) = 0.$$

Для узла 4 уравнение (3)

$$U_3 y_{34} \sin(\delta_{34}^0 + \alpha_{34}) - U_3 y_{34} \sin(\delta_{34}^0 + \alpha_{34} + \Delta\delta_{34}) + U_5 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 + \\ + \alpha_{54}) - U_5 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 + \alpha_{54} + \Delta\delta_{54}) = 0.$$

Так как имеется два независимых контура, то уравнения контурного сдвига (7) записываются в виде

$$\Delta\delta_{15} - \Delta\delta_{35} - \Delta\delta_{13} = 0; \\ \Delta\delta_{54} - \delta_{34}\Delta\delta_{35} + \Delta\delta_{35} = 0.$$

Дополнительное уравнение мощности для ветви 1–3 записывается в виде

$$P'_{13}{}^{fix} = -U_3^2 y_{13} \sin \alpha_{13} + U_1 U_3 y_{13} \sin(\delta_{13}^0 + \Delta\delta_{13} + \alpha_{13}).$$

Решение системы уравнений дает значения неизвестных $\Delta\delta_{15}$, $\Delta\delta_{35}$, $\Delta\delta_{13}$, $\Delta\delta_{34}$, $\Delta\delta_{54}$, θ . Данные, полученные аналитическим путем и с помощью программы RastrWin методом перебора, сведены в табл. 3.

Значения приращений взаимных углов

ФСТ в ветви	Способ расчета	$\Delta\delta_{15}$, град	$\Delta\delta_{54}$, град	$\Delta\delta_{35}$, град	$\Delta\delta_{13}$, град	$\Delta\delta_{34}$, град	θ° , град
1-5	RastrWin	3,286	-0,764	0,965	2,321	0,202	-20
	Формула	3,301	-0,802	0,973	2,238	0,1711	-20,32

Как видно из табл. 3, погрешность в определении значения угла регулирования составляет 1,5 %, в абсолютных величинах 0,32°. Значения активных мощностей по ветвям контура при разных углах регулирования ФСТ, установленного в ветви 1–5, представлены в табл. 4. В таблице даны значения приходящих мощностей к узлам схемы 3, 5, 4, полученные с помощью расчетов по программе RastrWin. Из таблицы видно, что увеличение значения отрицательного угла ФСТ запирает ветвь 1–5 (220 кВ) и вытесняет поток активной мощности в линию 1–3 (500 кВ). Значения напряжений в узлах даны в табл. 5.

Таблица 4

Значения активных мощностей

θ° , град	P'_{15} , МВт	P'_{54} , МВт	P'_{13} , МВт	P'_{34} , МВт	P'_{35} , МВт
0	186,8	145,3	1229,6	854,7	364,3
-10	100,8	139,4	1315,4	860,6	443,9
-14	69,8	137,1	1346,4	862,9	472,5
-20	11,3	132,6	1404,9	867,4	526,2
-25	-34	128,9	1450,2	871,1	567,6

Таблица 5

Значения напряжений в узлах при различных углах регулирования

θ° , град	U_1 , кВТ	U_3 , кВТ	U_5 , кВТ	U_4 , кВТ
0	220	212,94	212,24	220
-10	220	212,82	212,73	220
-14	220	212,69	212,77	220
-20	220	212,35	212,65	220
-25	220	211,98	212,39	220

Анализ значений активных мощностей из табл. 4 при изменении угла ФСТ показывает, что они сильно меняются только в самом контуре, где он установлен. Это ветви 1–5, 1–3, 3–5, а также ветвь 5–4. В ветви 1–5 поток активной мощности при угле регулирования -25° меняет свое направление, но в ветви 3–4 при этом он меняется незначительно. Из табл. 5 видно, что значения напряжений в узлах 3 и 5 меняются слабо. В [15] проведенный анализ потокораспределения в многоконтурных схемах показал, что чем дальше ветвь расположена от ФСТ, тем меньше его воздействие на изменение величины активной мощности в этой ветви. Так, в [10, 15] в рассматриваемой двухконтурной схеме, представленной на рис. 4, ФСТ был установлен сначала в ветви 1–5, затем в ветви 5–4. Влияние ФСТ на изменение потока активной мощности по ветви определяется значением производной приращения взаимного угла $\Delta\delta$ от угла регулирования ФСТ θ . Если оно незначительно, то степень влияния ФСТ на поток активной мощности в этой

ветви мало. Знак производной указывает на степень увеличения (+) или снижения (-) передаваемой мощности по ветви. Взятые из [10] значения производных приращений взаимных углов по углу регулирования (табл. 6), которые рассчитывались для нахождения оптимального угла регулирования (θ^{opt}) по критерию минимальных потерь активной мощности для схемы на рис. 4, показывают, что идет уменьшение значений производных по мере удаления ветвей от места установки ФСТ.

Таблица 6

Значения производных по углу регулирования

ФСТ в ветви	$d\Delta\delta_{13}/d\theta$	$d\Delta\delta_{15}/d\theta$	$d\Delta\delta_{35}/d\theta$	$d\Delta\delta_{34}/d\theta$	$d\Delta\delta_{54}/d\theta$
1–5	-0,11	-0,156	-0,046	-0,008	-0,038
5–4	-0,002	0,049	0,052	-0,111	-0,162

На основании этого в [10, 15] был сделан вывод о возможности в целях упрощения расчетов по определению θ^{opt} и потерь активной мощности не принимать во внимание ветви, удаленные от рассматриваемого контура. Данное предположение было подтверждено в [15] на примере схемы реальной энергосистемы, включающей ОЭС Северо-Запада, Центра и Средней Волги, состоящей из 894 узла и 1383 ветви. Были выделены два фрагмента этой схемы, в которых загруженные ЛЭП 220 кВ работают в контуре с ЛЭП 500 кВ. Каждый из фрагментов, кроме самого контура, в который включается ФСТ, содержал смежные с ним контуры и отдельные ветви, непосредственно примыкающие к этому контуру. По алгоритму для каждого фрагмента схемы и с помощью программы RastrWin для всей схемы целиком были рассчитаны значения оптимального угла регулирования ФСТ по критерию минимальных потерь и потери активной мощности при установке ФСТ в различных ветвях этих фрагментов. Несмотря на то, что по алгоритму рассчитывались фрагменты схемы, а по программе – вся схема целиком, было совпадение по знаку угла и значения оптимальных углов получились близкими. Сделанный вывод в [10, 15] должен быть справедлив и при расчете угла регулирования ФСТ по предложенной методике, который нужно установить для обеспечения заданного значения потока активной мощности по ветви контура.

Покажем это на примере двухконтурной схемы, изображенной на рис. 4. Установленный в ветви 1–5 ФСТ, как видно из табл. 6, слабо влияет на изменение потока мощности в ветви 3–4, так как производная в этой ветви имеет наименьшее значение. Исключим данную ветвь из рассмотрения вместе с узлом 4. Оставим для рассмотрения узлы 3, 5 контура 1–3–5–1 и ветвь 5–4, потому что она непосредственно граничит с ветвью, в которой установлен ФСТ.

Составим систему уравнений (3, 4) для оставшихся узлов 3 и 5.

Для узла 3

$$-U_3 y_{13} \sin \alpha_{13} + U_1 y_{13} \sin(\delta_{13}^0 + \alpha_{13}) - \frac{P_{13}^{fix}}{U_3} - U_5 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 - \alpha_{35}) + \\ + U_5 y_{35} \sin(\delta_{13}^0 - \alpha_{35} + \Delta\delta_{35}) = 0.$$

Для узла 5

$$U_3 y_{15} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15}) - U_1 y_{15} \sin(\delta_{15}^0 + \alpha_{15} + \Delta\delta_{15} + \theta) + U_3 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 + \\ + \alpha_{35}) + U_5 y_{35} \sin(\delta_{35}^0 + \alpha_{35} + \Delta\delta_{35}) - U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54}) +$$

$$+U_4 y_{54} \sin(\delta_{54}^0 - \alpha_{54} + \Delta\delta_{54}) = 0.$$

Уравнения контурного сдвига (6) записываются в виде

$$\Delta\delta_{15} - \Delta\delta_{35} - \Delta\delta_{13} = 0;$$

$$\Delta\delta_{54} + \Delta\delta_{35} = 0.$$

Дополнительное уравнение записывается в виде

$$P'_{13}{}^{fix} = -U_3^2 y_{13} \sin\alpha_{13} + U_1 U_3 y_{13} \sin(\delta_{13}^0 + \Delta\delta_{13} + \alpha_{13}).$$

В результате решения системы уравнений для упрощенной схемы сети получаем решения, представленные в табл. 7. Значение угла регулирования ФСТ получилось близким к значению, полученному по программе RastrWin для полной схемы. Погрешность составляет 7 %, что в абсолютных величинах составляет 1,5°. Приращения взаимных углов в контуре 1–3–5–1 получились практически совпадающими, исключение составляют приращения в ветви 3–5, связанной с отбрасываемой ветвью 3–4, и в ветви 5–4, связанной с исключенным из рассмотрения узлом 4. Надо заметить, что, исключив из двухконтурной схемы второй контур, мы пошли на очень грубые упрощения, по сути убрав половину схемы, однако несмотря на это знак угла регулирования совпал и его значение получилось близким к полученному по программе RastrWin. В более сложных многоконтурных схемах с большим количеством отборов мощностей погрешность расчета по упрощенной методике будет уменьшаться, так как влияние ФСТ на потоки мощностей в ветвях будет слабее.

Таблица 7

Расчет по упрощенным выражениям

ФСТ в ветви	Способ расчета	$\Delta\delta_{13}$, град	$\Delta\delta_{15}$, град	$\Delta\delta_{35}$, град	$\Delta\delta_{34}$, град	$\Delta\delta_{54}$, град	θ° , град
1–5	RastrWin	2,321	3,286	0,965	0,202	-0,764	-20
	Формула	2,328	3,376	1,0428	–	-1,0428	-18,5

Сформулируем алгоритм расчета угла регулирования ФСТ для обеспечения фиксированного значения потока активной мощности по ветви конура.

1. Определяются параметры y_{ij} и α_{ij} ветвей исследуемой схемы и параметры рассчитанного исходного установившегося режима (модули напряжений в узлах U_i , углы между векторами напряжений по концам ветвей δ_{ij}^0). При этом для ветви с установленным в ней ФСТ проводимость ветви и ее угол записываются с учетом сопротивления ФСТ.

2. Для каждого узла схемы, кроме балансирующего, формируется уравнение (3) для определения приращений углов $\Delta\delta_{ij}^0$ от угла регулирования ФСТ.

3. Кроме уравнения (3) для каждого независимого контура записываются уравнения суммы приращений углов $\Delta\delta_{ij}^0$ в контуре с учетом направлений активной мощности в исходном режиме (7), а также уравнение мощности для ветви с заданным потоком мощности (6).

4. Решение системы уравнений дает значение угла регулирования ФСТ.

Выводы

1. Предложенный алгоритм позволяет по параметрам электрической схемы сети и исходного установившегося режима в результате безытеративных расчетов определять знак угла регулирования ФСТ и его значение, которые необходимо установить для обеспечения интересующего значения потока активной мощности в одной из ветвей схемы сети.

2. Алгоритм позволяет анализировать схемы любой конфигурации и учитывает сопротивление ФСТ.

3. Алгоритм содержит однотипные уравнения, которые можно программировать.

4. Для расчета угла регулирования ФСТ достаточно рассмотреть фрагмент схемы сети, содержащий ветви контура, в который он установлен, и ветви контуров, примыкающих к контуру. Это значительно упрощает расчеты для больших сложнотокмоуных электрических схем.

Приложение 1

Для схемы, представленной на рис. 2, параметры верхней ветви с номинальным напряжением 500 кВ приведены к напряжению нижней ветви 220 кВ. Сопротивления ветвей и ФСТ: $\underline{Z}_1 = 1,233 + j19,96$ Ом, $\underline{Z}_2 = 19,6 + j84$ Ом, $\underline{Z}_f = 3 + j30$ Ом. В узле 1 поддерживается напряжение $U_1 = 220$ кВ, узел 2 – это шины с постоянным напряжением и постоянной активной нагрузкой. Параметры исходного режима при включенном ФСТ и при $\theta = 0^\circ$ (без регулирования) имеют следующие значения: $U_1 = 220$ кВ, $U_2 = 219,997$ кВ, $\delta^0 = 21,065^\circ$, $P = 1000$ МВт.

Приложение 2

Для схемы, представленной на рис. 3, параметры исходного режима с установленным ФСТ в ветви 1–5 и с углом регулирования, равным нулю, имеют следующие значения: $U_1 = 220$ кВ, $U_4 = 219,997$ кВ, $U_5 = 207,81$ кВ, $\delta_{14}^0 = 23,41^\circ$, $\delta_{15}^0 = 19,47^\circ$, $\delta_{54}^0 = 3,87^\circ$, $P_4 = 1000$ МВт, $\underline{S}_5 = 150 + j50$ МВ·А. Параметры схемы: $\underline{Z}_{14} = 1,233 + j19,96$ Ом, $\underline{Z}_{15} = 9,8 + j42$ Ом, $\underline{Z}_{54} = 9,8 + j42$ Ом, $\underline{Z}_f = 3 + j30$ Ом.

Приложение 3

Для двухконтурной схемы, представленной на рис. 4, параметры исходного режима с включенным ФСТ без регулирования ($\theta = 0^\circ$) имеют следующие значения: $U_1 = 220$ кВ, $U_4 = 219,997$ кВ, $U_3 = 212,94$ кВ, $U_5 = 212,24$ кВ, $\delta_{13}^0 = 23,41^\circ$, $\delta_{15}^0 = 19,47^\circ$, $\delta_{54}^0 = 3,87^\circ$. В узлах 1 и 4 напряжение поддерживается постоянным. Постоянная нагрузка $P_4 = 1000$ МВт, $\underline{S}_5 = 400 + j40$ МВ·А. Сопротивление ветвей и ФСТ: $\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{34} = 0,62 + j9,99$ Ом, $\underline{Z}_{54} = \underline{Z}_{15} = 9,8 + j42$ Ом, $\underline{Z}_{35} = 0,09 + j4,62$ Ом, $\underline{Z}_f = 3 + j30$ Ом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.: Торус Пресс, 2011. – 311 с.
2. Экспериментальное исследование параметров и режимов линии электропередачи с управляемой продольной компенсацией / В.А. Солдатов, Л.П. Калинин, М.В. Киорсак, С.В. Локтионов, Р.С. Бейм, С.Ю. Сыромятников // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 46–50.
3. Гибкие линии электропередачи с продольно-емкостной компенсацией и фазоповоротным

- трансформатором / М. Киорсак, В. Солдатов, Д. Зайцев, Л. Калинин. – Кишинев: АН Молдовы, 1997. – 213 с.
4. Han Z. Phase Shifter and Power Flow Control // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1982. – Vol. PAS-101, № 10. pp. 3790–3795.
 5. Xihg K., Kusic G. Application of Thyristor-controlled phase-shifters to minimize real power losses and augment stability of power systems // IEEE – Vol. 3, № 4, 1988, pp. 792–798.
 6. Baker R., Ciith G., Eglin P. Control algorithm for a static phase shifting transformer to enhance transient and dynamic stability of large power systems // IEEE Transactions on Power Apparatus and systems. – 1982. – Vol. PAS-101. № 9. pp. 3532–3542.
 7. Солдатов В.А., Дубков А.А. Применение фазового управления для снижения потерь мощности в энергосистемах // Изв. АН МССР. Сер. Физикотехнические и математические науки. – 1989. – № 2. – С. 48–51.
 8. Солдатов В.А., Дубков А.А. Применение продольных реакторов для снижения потерь мощности в электрических сетях // Изв. АН МССР. Сер. Физикотехнические и математические науки. – 1990. – С. 25–28.
 9. Verboomen J., Spaan F.J., Schavemaker P.H. Method for Calculating Total Transfer Capacity by Optimising Phase Shifting Transformer Settings // CIGRE 2008, С. 1–111.
 10. Локтионов С.В., Сыромятников С.Ю. Разработка алгоритма для выбора места установки фазорегулирующего трансформатора в энергосистеме // Вестник МЭИ. – 2003. – № 1. – С. 41–49.
 11. О применении фазосдвигающих трансформаторов в электрических сетях / П.П. Карымов, С.В. Локтионов, С.Ю. Сыромятников // Энергоаудит. – 2009. – № 3. – С. 27–31.
 12. Фазопоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане / Г.А. Евдокунин, Р.Н. Николаев, А.К. Исакаев, Б.К. Оспанов, Н.И. Утегулов // Новости электротехники. – 2007. – № 6 (48). – С. 38–41.
 13. Олыванг М.В., Остапенко Е.И., Кузнецова Г.А., Лоханин Е.К. Ступенчато регулируемые автотрансформаторы как средство оптимизации потокораспределения в электрических сетях // Симпозиум «Электротехника», 2010 г. Сборник докладов. Т. 1. В 2 ч. – Ч. 1. М.: ВЭИ, 1997. – С. 114–119.
 14. Khrennikov A.Yu., Gol'dshtein V.G., Skladchikov A.A. An analysis of the condition of the 6–500 kV overhead power lines of the Samara region // Power Technology and Engineering. – 2010. – № 44(4). – С. 322–326.
 15. Локтионов С.В. Разработка алгоритма для выбора мест установки фазорегулирующих трансформаторов в электрических сетях: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 2003. – 20 с.
 16. Технологии и технические средства управления режимами электроэнергетических систем / А.Ф. Бондаренко, А.А. Басов, В.Э. Воротницкий, С.В. Локтионов, Б.И. Макоклюев и др. Под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 358 с.

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2018 г.

CALCULATION OF THE CONTROL ANGLE OF THE PHASE-SHIFTING TRANSFORMER (PST) AT A TASK OF THE FIXED POWER FLOW THROUGH A BRANCH

S.V. Loktionov

National Research University (MPEI)
14, Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russian Federation

Abstract. Phase-shifting transformers (PST) are used for forced redistribution of active power flows in the circuit in order to reduce its losses, as well as to change the power flow along the circuit branches for commercial or other purposes. Previously, an algorithm was proposed that allows to determine the best place of its installation in the circuit by the criterion of minimum active power losses and calculate the angle of PST control analytically, avoiding the search method. When deducing the formula for calculating the angle, the

S.V. Loktionov (Ph.D. (Techn.)), Senior Research.

equations of power balance in the node were used. In this article the algorithm of calculation of regulation angle FST for providing the necessary flow of active power in one of branches of a circuit with application of this approach is considered. Examples of application of the algorithm for calculating the angle on different types of schemes are considered, the possibility of considering fragments of schemes for simplification of calculations, rather than the entire scheme consisting of a large number of nodes and branches is shown.

Keywords: electricity market, the operated systems of an electricity transmission, phase shifting transformer (PST), calculation of the control angle, power flow control.

REFERENCES

1. Kochkin V.I., Shakaryan Y.G. Primenenie gibkikh (upravlyaemykh) system elektroperedachi peremennogo toka v energosistemakh. – M.: Torus Press, 2011. – 311 c.
2. Eksperimentalnoe issledovanie parametrov i regimov linii elektroperedachi c uprvlyaemoi prodolnoi kompensacii / V.A. Soldatov, L.P. Kalinin, M.V. Kiorsak, C.V. Loktionov, R.S. Beim, S.Y. Syromyatnikov // Elektricheskie stantcii. – 2001. – № 9. – С. 46–50.
3. Gibkie linii elektroperedachi c prodolno-emkostnoi kompensaciei I fazopovorotnym transformatorom / M. Kiorsak, V. Soldatov, D. Zaitcev, L. Kalinin. – Kishinev: AN Moldovy, 1997. – 213 c.
4. Han Z. Phase Shifter and Power Flow Control // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1982. – Vol. PAS-101, № 10. pp. 3790–3795.
5. Xihg K., Kusic G. Application of Thyristor-controlled phase-shifters to minimize real power losses and augment stability of power systems // IEEE. – Vol. 3, № 4, 1988, pp. 792–798.
6. Baker R., Ciith G., Eglin P. Control algorithm for a static phase shifting transformer to enhance transient and dynamic stability of large power systems // IEEE Transactions on Power Apparatus and systems. – 1982. – Vol. PAS-101. № 9. pp. 3532–3542.
7. Soldatov V.A., Dubkov A.A. Primenenie fazovogo upravleniya dlia snizheniya poter' mostchnosti v energosistemakh // Izv. AN MSSR. Serya fizikotekhnicheskikh i matematicheskikh nauk. – 1989. – № 2. – С. 48–51.
8. Soldatov V.A., Dubkov A.A. Primenenie prodolnykh reaktorov dlia snizheniya poter' moshchnosti v elektricheskikh setiakh // Izv. AN MSSR. Serya fizikotekhnicheskikh i matematicheskikh nauk. – 1990. – С. 25–28.
9. Verboomen J., Spaan F.J., Schavemaker P.H. Method for Calculating Total Transfer Capacity by Optimising Phase Shifting Transformer Settings // CIGRE 2008, C. 1–111.
10. Loktionov S.V., Syromyatnikov S.Y. Razrabotka algoritma dlia vybora mesta ustanovki fazoreguliruyushchego transformatora v energosisteme // Vestnik MEI. – 2003. – № 1. – С. 41–49.
11. O primenении fazosdvigayushchikh transformatorov v elektricheskikh setiakh / R.R. Karymov, S.V. Loktionov, S.Y. Syromyatnikov // Energoaudit. – 2009. – № 3. – С. 27–31.
12. Fazopovorotny transformator v pervyie v SNG primenen v Kazakhstane / G.A. Evdokunin, R.N. Nikolaev, A.K. Isakov, B.K. Ospanov, N.I. Utegulov // Novosti elektrotekhniki. – 2007. – № 6 (48). – С. 38–41.
13. Ol'shvang M.V., Ostapenko E.I., Kuznetsova G.A., Lokhanin E.K. Stupenchato reguliruemye avto-transformatory kak sredstvo optimizatsii potokoraspredeleniya v elektricheskikh setiakh // Simpozium Elektrotekhnika 2010 god. Sbornik dokladov T.1 v 2-kh chastiakh. – Ch. 1. Moskva: VEI. – 1997. – С. 114–119.
14. Khrennikov A.Yu., Gol'dshteyn V.G., Skladchikov A.A. An analysis of the condition of the 6-500 kV overhead power lines of the Samara region // Power Technology and Engineering. – 2010. – № 44(4). – С. 322–326.
15. Loktionov S.V. Razrabotka algoritma dlia vybora mest ustanovki fazoreguliruyushchikh transformatorov v elektricheskikh setiakh: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk. – Moskva, MEI, 2003. – 20 c.
16. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva upravleniya rezhimami elektroenergeticheskikh system / A.F. Bondarenko, A.A. Basov, V.E. Vorotnitskii, S.V. Loktionov, B.I. Makoklyuev i dr. Pod red. Y.V. Sharova. – M.: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017. – 358 c.