

На правах рукописи



Акимов Дмитрий Андреевич

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОПОВОРОТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ
ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в акционерном обществе «Научно-технический центр Единой энергетической системы»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Смоловик Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный
сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС», заместитель
Научного руководителя АО «НТЦ ФСК ЕЭС»
Новиков Николай Леонтьевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Диспетчерское управление
электрическими станциями, сетями и системами»
Петербургского энергетического института
повышения квалификации Министерства
энергетики Российской Федерации
Герасимов Сергей Евгеньевич

Ведущая организация: Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I (ПГУПС)

Защита состоится «29» июня 2018 г. в _____ на заседании диссертационного совета
Д212.229.11 при федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29,
Главное здание, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».
www.spbstu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.229.11
к.т.н., доцент



Попов Максим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Проводимая в последние десятилетия в ряде ведущих в области электроэнергетики стран интенсивная работа по реструктуризации и изменению принципов управления этой отраслью – переход к рыночным отношениям в сочетании с изменением состава генерирующих источников (распределенная генерация, ветроэнергетика и др.), а также наличие законодательных и социальных ограничений по строительству новых линий электропередачи привели к значительным трудностям в развитии электрических сетей, связанных, прежде всего, с сокращением инвестиций в их создание и развитие.

Проблемы повышения эффективности использования сетевой инфраструктуры решались путем применения более совершенных систем регулирования возбуждения синхронных машин, создания и применения устройств регулирования реактивной мощности, таких как синхронные компенсаторы, управляемые шунтирующие реакторы, трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой, фазоповоротные трансформаторы и статические тиристорные компенсаторы (СТК), а в последнее время – сложные силовые устройства, выполненные на основе преобразователей напряжения.

Оптимизация потокораспределения в сложной электрической сети базируется на выполнении двух критериев: исключение перегрузок сетевых элементов и снижение потерь мощности. Подобное потокораспределение может быть осуществлено в том числе и с помощью фазоповоротных трансформаторов (принцип их действия, а также другие возможные технические решения подробно рассмотрены в первой главе). Стоит отметить, что в настоящее время в сетях ЕЭС России ФПТ применяются мало, несмотря на большой потенциал их использования и удачный мировой опыт в осуществлении задач оптимизации потокораспределения. Многие исследования показывают своевременность и актуальность применения фазоповоротных технологий в сетях ЕЭС России. Также в этой связи следует отметить успех отечественного научно-исследовательского института имени Г.М. Кржижановского (ОАО «ЭНИН»), разработавшего в 2011-2014 гг. фазоповоротный трансформатор с тиристорным коммутатором (ТК), не имеющий аналогов в мире.

В настоящее время место установки ФПТ обычно выбирается исходя из локальных требований (снятие токовой перегрузки элементов энергосистемы или снижение трансграничных потоков мощности). Однако очевидно, что потенциал ФПТ, как средства повышения степени управления энергосистемой, маршрутизации потоков мощности и снижения потерь, гораздо выше. Выбор оптимального месторасположения ФПТ является актуальной и до конца не решенной на настоящий момент задачей.

В настоящий момент вопрос выбора оптимального угла регулирования ФПТ решается достаточно просто – угол регулирования обычно выбирается сезонно по

соображениям обеспечения допустимой загрузки элементов сети. Например, таким образом реализуется управление ФПТ, установленного в настоящее время на ЛАЭС. При таком подходе потенциал ФПТ для гибкого управления реализуется не в полной мере, например, не используется возможность снижения потерь. ФПТ с ТК, разработанный научно-исследовательским институтом имени Г.М. Кржижановского, за счет своего быстродействия является хорошим средством для гибкой подстройки параметров ФПТ под различные режимные требования. Таким образом, и выбор оптимального угла сдвига фазы ФПТ, как и выбор его оптимального расположения, являются актуальными задачами.

Целями работы являются разработка алгоритма выбора оптимального места установки ФПТ в энергосистеме (ЭС), разработка алгоритма выбора оптимального угла сдвига фазы и верификация данных алгоритмов в тестовых и реальных схемах.

Научная новизна работы соискателя. Произведено сравнение методов выбора оптимального места установки ФПТ, основанных на полной и линеаризованной моделях ЭС. Предложен алгоритм выбора оптимального места установки ФПТ. Из следствия билинейной теоремы получены зависимости потерь активной мощности участка сети от углов регулирования ФПТ, позволяющие выбрать оптимальные углы регулирования ФПТ. Получены удобные выражения зависимости параметров установившегося режима от угла регулирования ФПТ с учетом изменения сопротивления ФПТ и вещественной части коэффициента трансформации. Показана возможность выбора угла регулирования ФПТ для случая многокритериальной оптимизации.

Теоретическая и практическая ценность результатов работы.

В настоящее время потери активной мощности в сетях ЕЭС России весьма велики. Существует необходимость снижения данных потерь. Одним из возможных вариантов является установка в электрических сетях фазоповоротных трансформаторов, позволяющих перераспределять потоки мощности. Для эффективной эксплуатации ФПТ требуются нахождение оптимальных мест их установки, а также методика выбора настроек ФПТ в зависимости от режима. Разработанные в настоящей работе методы позволяют это сделать и могут быть использованы в практике диспетчерского управления и научно-исследовательских организациях при решении задач улучшения характеристик режимов и развития электрических сетей и энергосистем. Показан выбор места установки и угла фазоповоротного трансформатора на примере проекта ФПТ на ПС 750 кВ Новобрянская. С помощью разработанного алгоритма в схеме ЕЭС России было найдено несколько возможных мест для установки ФПТ, определены их настройки. На примере существующего ФПТ на ПС 500 кВ Ульке показана возможность применения методов многокритериальной оптимизации для выбора оптимального угла сдвига фазы.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных в работе задач использовались: теория электрических цепей, теория систем линейных уравнений, методы математического моделирования, программно-вычислительные комплексы (ПВК) «Rastr», Matlab.

Основные положения (тезисы) диссертации, выносимые на защиту:

1. Показана эффективность использования матрицы угловой чувствительности ветвей для определения оптимального места установки ФПТ, использование которой позволяет наглядно оценить влияние ФПТ на потоки активной мощности в схеме, оценить требуемое число ФПТ, а также получить решения, инвариантные относительно различных режимных ситуаций.

2. Полученные на основе следствия билинейной теоремы аналитические зависимости параметров режима от угла регулирования ФПТ позволяют с приемлемой точностью и малых расчетных затратах определить оптимальные настройки ФПТ.

3. Использование многокритериальных методов применительно к задаче выбора настройки ФПТ позволяет получить множество решений, удовлетворяющих нескольким не сводимым друг к другу критериям, без оценки важности данных критериев относительно друг друга.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением классического метода расчета установившегося режима (метода узловых напряжений), а также сопоставлением результатов, полученных с помощью ПВК Matlab, с результатами, полученными в ПВК Rastrwin.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технической секции АО «НТЦ ЕЭС» и заседании кафедры «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ФГАОУ ВО СПбПУ). Материалы работы были использованы для участия в V Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2014» (Томск). Проект «Оптимизация режимов работ электроэнергетических систем на основе регулирования потоков мощности» является лауреатом конкурса грантов для аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, проводимого Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга в 2015 году.

По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в список рекомендуемых в перечне ВАК РФ.

Диссертация общим объемом 139 страниц состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 102 источников. Результаты исследований проиллюстрированы 74 рисунками и 7 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна и практическая значимость диссертационных исследований.

В первой главе описаны способы регулирования потоков мощности в электрических сетях переменного тока. Приведена классификация устройств управления мощностью в сети переменного тока (рисунок 1), даны краткие сведения об этих устройствах и их характеристики.

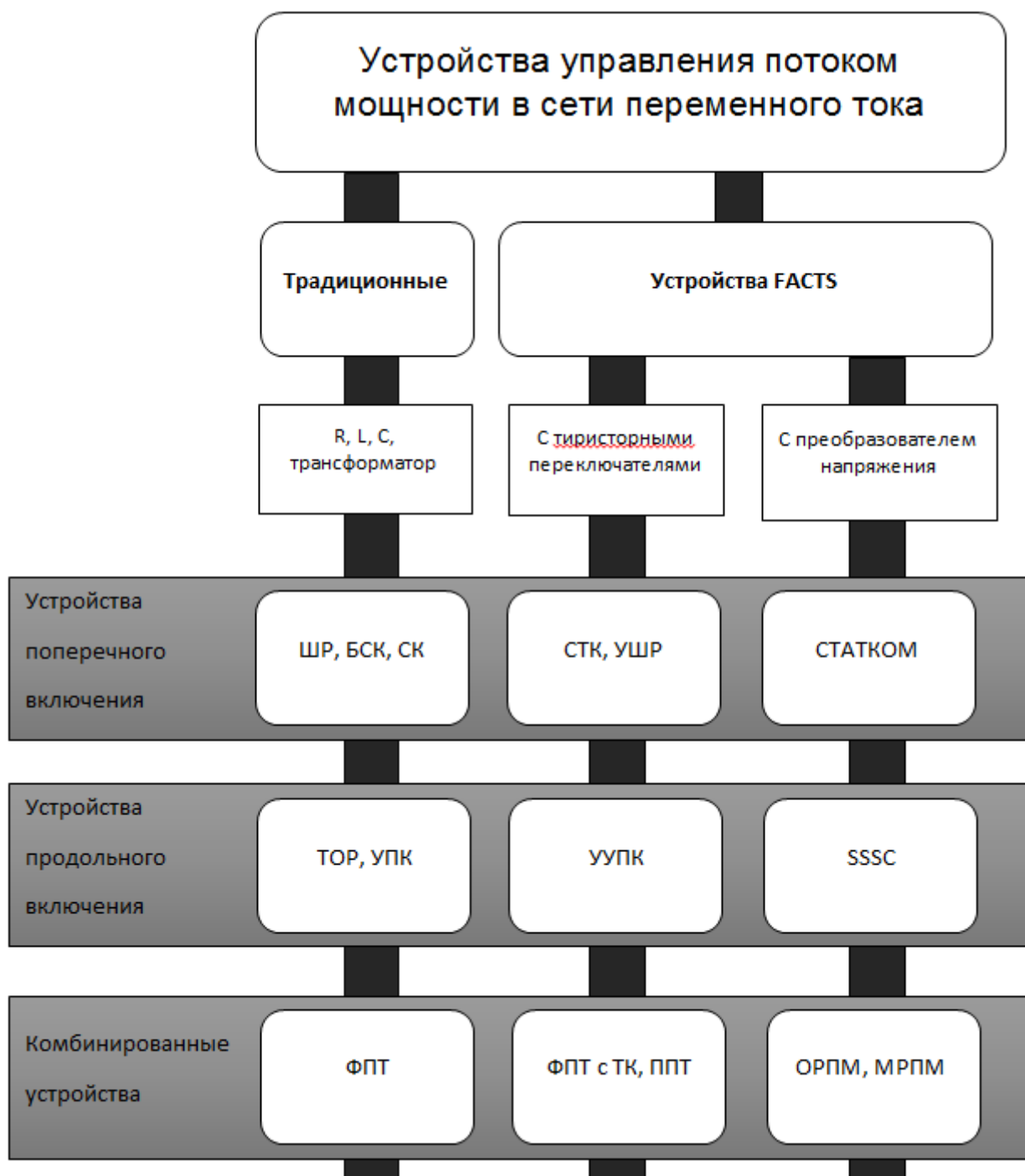


Рисунок 1 – Классификация устройств управления потоком мощности в сетях переменного тока. Принятые сокращения:

ШР – шунтирующий реактор;
 БСК – батарея статических конденсаторов;
 СК – синхронный компенсатор;
 ТОР – токоограничивающий реактор;
 УПК – устройство продольной компенсации;
 СТК – статический тиристорный компенсатор (*англ.* Static VAR Controller (SVC));
 УШР – управляемый шунтирующий реактор (*англ.* Thyristor Controlled Reactor (TCR));
 УУПК – управляемое устройство продольной компенсации (*англ.* Gate Turn-off Thyristor Controlled Series Compensator (GCSC), Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), Thyristor Switched Series Compensator (TSSC));
 ФПТ с ТК – фазоповоротные трансформаторы с тиристорными коммутаторами (*англ.* Thyristor Controlled Phase-shifting Transformer (TCPST));
 ППТ – передача постоянного тока (*англ.* High Voltage Direct Current (HVDC));
 СТАТКОМ – статический синхронный компенсатор (*англ.* Static Synchronous Compensator (STATCOM));
 SSSC – Static Synchronous Series Compensator (*рус.* продольный статический синхронный компенсатор);
 ОРПМ – обобщенный регулятор потоков мощности (*англ.* Unified Power Flow Controller (UPFC));
 МРПМ – межлинейный регулятор потоков мощности (*англ.* Interline Power Flow Controller (IPFC)).

Также в первой главе описаны принцип действия (рисунок 2) и основные конструкции ФПТ. На рисунке 2 представлена типичная зависимость значений потоков активной и реактивной мощности в ветви с ФПТ от угла регулирования ФПТ.

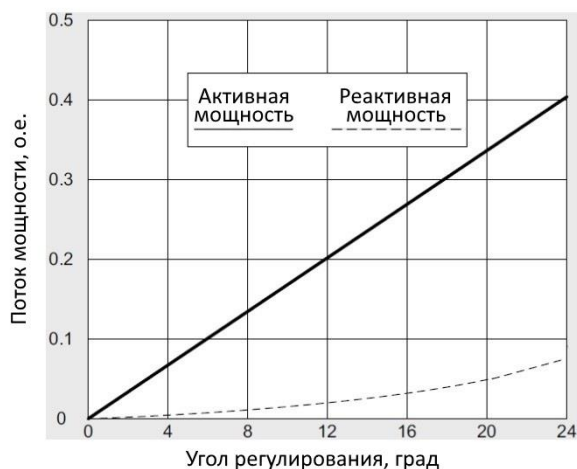


Рисунок 2 – Типичная зависимость значений потоков активной и реактивной мощности от угла регулирования ФПТ

Также приведены история и опыт применения ФПТ – перечислены и приведены характеристики ФПТ, установленные в энергосистемах Франции, Бельгии, Голландии и США.

Во второй главе описан основной метод расчета установившихся режимов электрических цепей (метод узловых напряжений), с помощью которого в дальнейшем получены выражения зависимости параметров установившегося режима от регулируемого угла сдвига фазы ФПТ. Приведено описание существующих методов выбора места установки и угла сдвига фаз ФПТ, отражены их недостатки:

1. получаемые решения настройки и установки ФПТ математически оптимальны лишь для единственной исследуемой схемно-режимной ситуации;
2. невозможность оценки эффективности получаемых решений на перспективу;
3. подобные подходы не позволяют учесть другие возможные цели и критерии, закладываемые при установке ФПТ, такие как ограничение токовых перегрузок, снижение трансграничных потоков и пр.

Далее в работе предложен альтернативный подход к выбору места установки и настройки ФПТ, основанный на разбиении электрической сети на зоны влияния потенциальных ФПТ (кластеры) и выборе в каждом из них оптимальной ветви установки и угла ФПТ.

Для выбора оптимального места установки ФПТ необходимо иметь возможность оценить, что может дать установка ФПТ в ту или иную ветвь расчетной схемы, какое изменение в потоках мощности и соответственно токах по линии это произведет. Для этого целесообразно построить матрицу чувствительности ветвей размерности $L \times L$ (L – количество ветвей в расчетной схеме), которая будет отражать величину изменения потоков мощности по линиям в зависимости от внесенного «возмущения» в виде изменения угла ФПТ, установленного в той или иной ветви.

Получение подобной матрицы влияния изменения угла сдвига векторов напряжений по концам ветви на потоки активной мощности возможно двумя путями:

1. «Ручным» внесением изменения угла в каждую ветвь расчетной схемы, расчетом соответствующего установившегося режима, оценкой разности полученных и исходных значений потоков мощности;
2. С помощью подхода, основанного на линеаризации модели сети переменного тока и соответствующих операциях с матрицами инцидентности и проводимости (1).

$$PSDF = B_d - (B_d \cdot A) \cdot (A^T \cdot B_d \cdot A)^{-1} \cdot (B_d \cdot A)^T, \quad (1)$$

где $PSDF$ – Phase Shifting Distribution Factor (матрица угловой чувствительности), A – матрица инцидентности, B – матрица проводимости.

Для тестовой 14-узловой схемы IEEE показано, что:

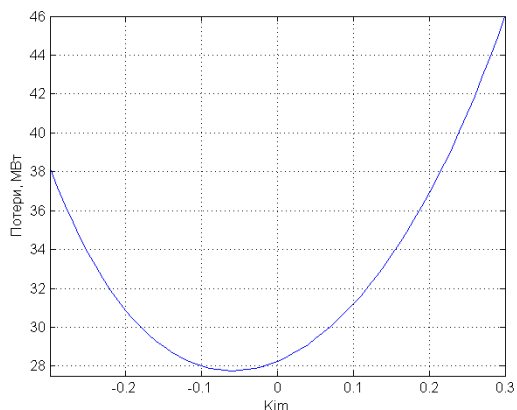
1. Изменение потоков активной мощности по ветвям схемы происходит практически пропорционально вносимому углу регулирования ФПТ при его изменении в диапазоне от 0° до 20° ;
2. Матрица угловой чувствительности ветвей близка к симметричной;
3. Анализ матриц угловой чувствительности ветвей позволяет выделить границы кластеров – зон влияния устанавливаемых ФПТ;
4. Установка ФПТ в ветвь в большей степени изменяет поток по ней самой;
5. Матрица угловой чувствительности ветвей позволяет наглядно оценить последствия установки ФПТ в ту или иную ветвь.

Матрицы угловой чувствительности могут быть использованы для анализа возможных мест установки ФПТ для ликвидации токовых перегрузок элементов электрической сети или уменьшения трансграничных потоков. В случае если задачу ликвидации токовых перегрузок или уменьшения трансграничных потоков планируется решать другими способами, то возможно применение ФПТ для уменьшения активных потерь в схеме за счет улучшения распределения потоков мощности – выделить зоны влияния ФПТ, устанавливаемых в те или иные ветви расчетной схемы, найти постоянные коэффициенты для полученного выражения зависимости потерь активной мощности от угла ФПТ (2) с помощью следствия билинейной теоремы, выбрать ветвь и настройку ФПТ, приводящие к максимальному снижению потерь активной мощности. В частности, применение указанной технологии позволяет получить выражения вида:

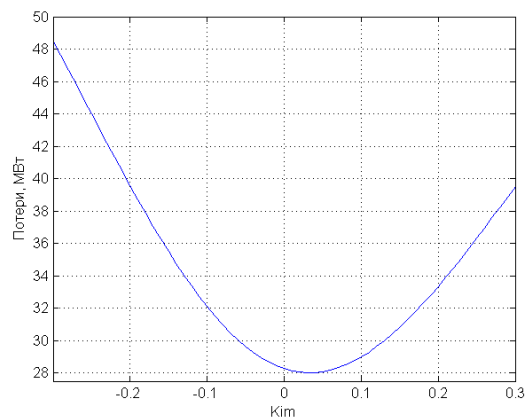
$$\Delta P = \sum_{p=1}^{p=w} \frac{((B_{0,m} - B_{0,n}) + (B_{1,m}^p - B_{1,n}^p) \cdot \kappa_p^{Im} + (B_{2,m}^p - B_{2,n}^p) \cdot (\kappa_p^{Im})^2)^2}{3 \cdot \dot{Z}_p^2 \cdot (1 + C^p \cdot (\kappa_p^{Im})^2)^2} \cdot R_p, \quad (2)$$

где ΔP – потери активной мощности в схеме, p – номер ветви, w – количество ветвей, $B_{0,m}$, $B_{0,n}$, $B_{1,m}$, $B_{1,n}$, $B_{2,m}$, $B_{2,n}$, C^p – константы, определяемые в результате расчетов нескольких установившихся режимов, κ_p^{Im} – мнимая часть коэффициента трансформации ФПТ, установленного в ветви p .

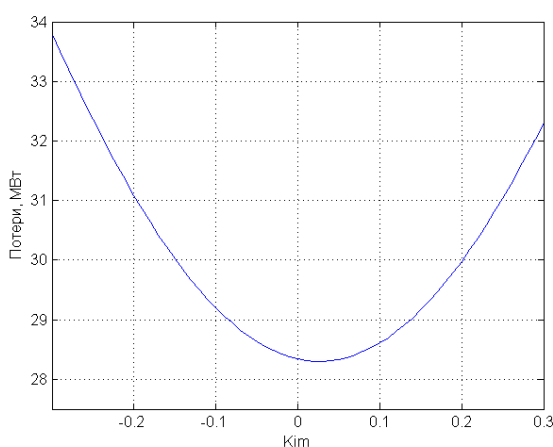
Так, для тестовой 57-узловой схемы IEEE были выявлены 3 зоны влияния ФПТ, в каждой из которых была найдена ветвь, установка ФПТ в которую приводила к максимальному снижению потерь активной мощности (рисунок 3).



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3 – а) Установка ФПТ в ветвь №2-№3 в зоне влияния ФПТ №1

($k^{Im} = -0,069$, $\Delta P = 27,78$ МВт);

б) Установка ФПТ в ветвь №13-№49 в зоне влияния ФПТ №2

($k^{Im} = 0,036$, $\Delta P = 28,02$ МВт);

в) Установка ФПТ в ветвь №23-№24 в зоне влияния ФПТ №3

($k^{Im} = 0,024$, $\Delta P = 28,30$ МВт).

Для более точного моделирования ФПТ был произведен учет изменения его сопротивления от угла сдвига фаз (3).

$$\dot{U}_i = \frac{B_{0,i} + B_{1,i}^p \cdot \kappa_p^{Im} + B_{2,i}^p \cdot (\kappa_p^{Im})^2 + B_{3,i}^p \cdot \kappa_p^{Im} \cdot \arcsin^2(\kappa_p^{Im}) + B_{4,i}^p \cdot (\kappa_p^{Im})^2 \cdot \arcsin^2(\kappa_p^{Im})}{1 + C_{1,i}^p \cdot \kappa_p^{Im} + C_{2,i}^p \cdot (\kappa_p^{Im})^2 + C_{3,i}^p \cdot \kappa_p^{Im} \cdot \arcsin^2(\kappa_p^{Im}) + C_{4,i}^p \cdot (\kappa_p^{Im})^2 \cdot \arcsin^2(\kappa_p^{Im})}, \quad (3)$$

где U_i – напряжение в узле i , p – номер ветви, $B_{0,i}$, $B_{1,i}$, $B_{2,i}$, $B_{3,i}$, $B_{4,i}$, $C_{1,i}$, $C_{2,i}$, $C_{3,i}$, $C_{4,i}$ – константы, определяемые в результате расчетов нескольких установившихся режимов, k_p^{Im} – мнимая часть коэффициента трансформации ФПТ, установленного в ветви p .

Было показано, что чем больше по модулю значение принимает мнимая часть коэффициента трансформации, тем большее влияние имеет учет сопротивления ФПТ и его изменения от угла сдвига фаз (рисунок 4).

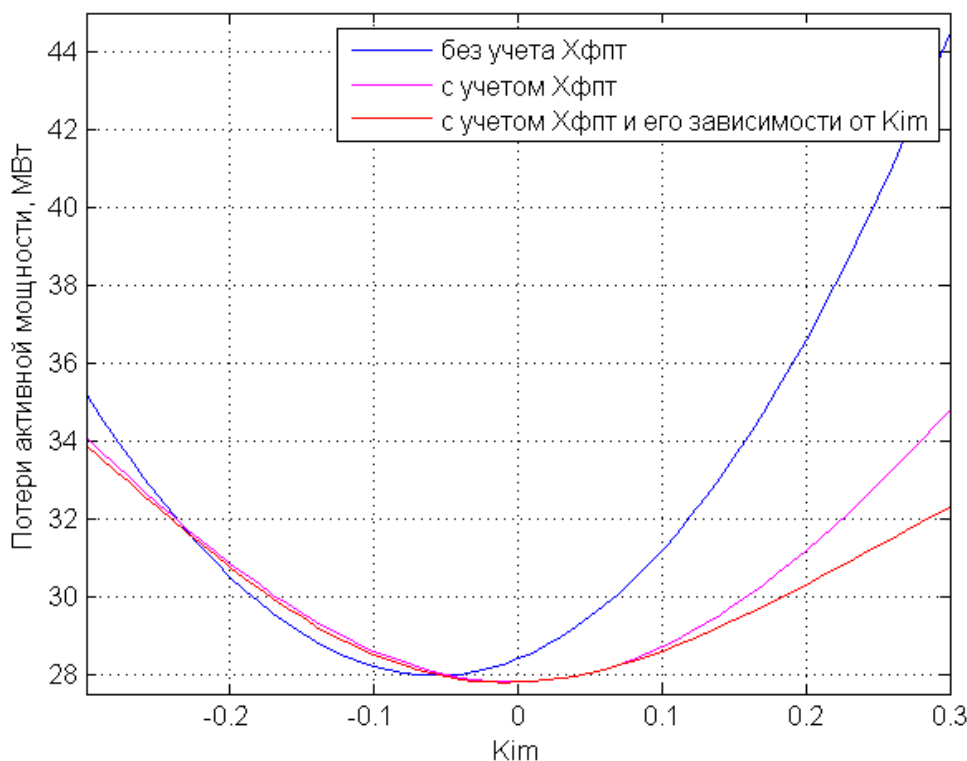


Рисунок 4 – Зависимость потерь активной мощности (МВт) в тестовой 57-узловой схеме IEEE от мнимого коэффициента трансформации в ветви №2-№3 без учета сопротивления ФПТ, при учете сопротивления ФПТ и при учете изменения его сопротивления при варьировании значения мнимой части коэффициента трансформации

Разработанная методика позволяет получить выражения зависимостей параметров установившегося электроэнергетического режима от вещественного и мнимого коэффициентов трансформации (4), а также от мнимых коэффициентов трансформации ФПТ (5), установленных в одной зоне влияния. Графики данных зависимостей приведены на рисунке 5.

$$\dot{U}_i = \frac{B_{0,i} + B_{1,i} \cdot k_{kj}^{Re} + B_{2,i} \cdot k_{kj}^{Im} + B_{3,i} \cdot (k_{kj}^{Re})^2 + B_{4,i} \cdot (k_{kj}^{Im})^2}{1 + C_{1,i} \cdot k_{kj}^{Re} + C_{2,i} \cdot k_{kj}^{Im} + C_{3,i} \cdot (k_{kj}^{Re})^2 + C_{4,i} \cdot (k_{kj}^{Im})^2}, \quad (4)$$

где U_i – напряжение в узле i , kj – ветвь с узлом начала k и узлом конца j , $B_{0,i}$, $B_{1,i}$, $B_{2,i}$, $B_{3,i}$, $B_{4,i}$, $C_{1,i}$, $C_{2,i}$, $C_{3,i}$, $C_{4,i}$ – константы, определяемые в результате расчетов нескольких установившихся режимов, k_{kj}^{Re} и k_{kj}^{Im} – вещественная и мнимая части коэффициента трансформации ФПТ, установленного в ветви kj .

$$\dot{U}_i = \frac{B_{0,i} + B_{1,i} \cdot (k_{kj}^{lm})^2 + B_{2,i} \cdot k_{kj}^{lm} + B_{3,i} \cdot (k_{lm}^{lm})^2 + B_{4,i} \cdot k_{lm}^{lm} + B_{5,i} \cdot (k_{kj}^{lm})^2 \cdot (k_{lm}^{lm})^2 + B_{6,i} \cdot (k_{kj}^{lm})^2 \cdot k_{lm}^{lm} + B_{7,i} \cdot k_{kj}^{lm} \cdot (k_{lm}^{lm})^2}{1 + C_{1,i} \cdot (k_{kj}^{lm})^2 + C_{2,i} \cdot k_{kj}^{lm} + C_{3,i} \cdot (k_{lm}^{lm})^2 + C_{4,i} \cdot k_{lm}^{lm} + C_{5,i} \cdot (k_{kj}^{lm})^2 \cdot (k_{lm}^{lm})^2 + C_{6,i} \cdot (k_{kj}^{lm})^2 \cdot k_{lm}^{lm} + C_{7,i} \cdot k_{kj}^{lm} \cdot (k_{lm}^{lm})^2} \cdot U_i$$

(5)

где U_i – напряжение в узле i , kj – ветвь с узлом начала k и узлом конца j , lm – ветвь с узлом начала l и узлом конца m , $B_{0,i}$, $B_{1,i}$, $B_{2,i}$, $B_{3,i}$, $B_{4,i}$, $B_{5,i}$, $B_{6,i}$, $B_{7,i}$, $C_{1,i}$, $C_{2,i}$, $C_{3,i}$, $C_{4,i}$, $C_{5,i}$, $C_{6,i}$, $C_{7,i}$ – константы, определяемые в результате расчетов нескольких установившихся режимов, k_{kj}^{lm} и k_{lm}^{lm} – мнимые части коэффициентов трансформации ФПТ, установленных в ветвях kj и lm .

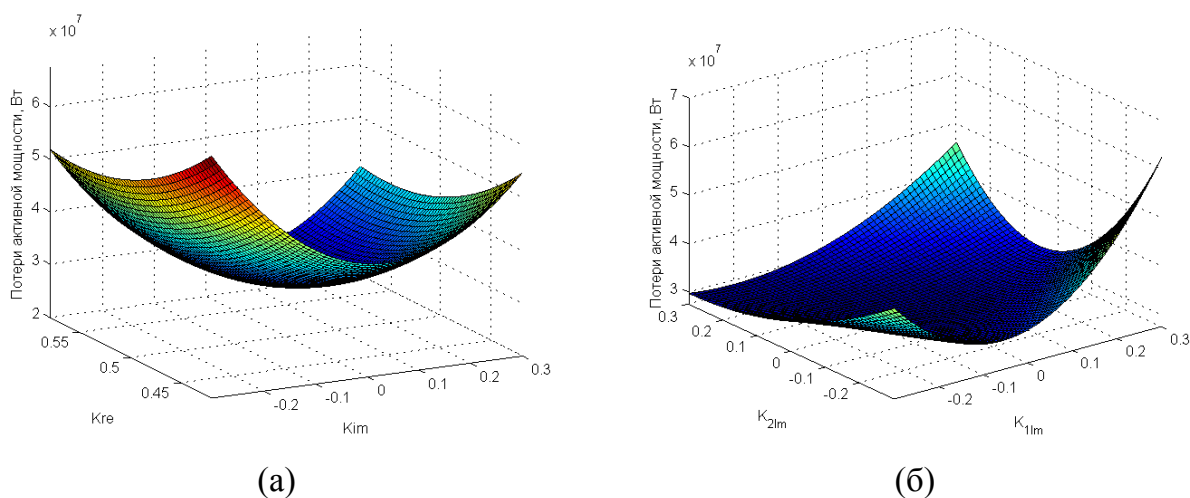


Рисунок 5 – а) Зависимость потерь активной мощности в схеме от вещественной и мнимой частей коэффициентов трансформации ФПТ, установленного в ветви №13-№49 тестовой 57-узловой схемы IEEE;

б) Зависимость потерь активной мощности в схеме от мнимых частей коэффициентов трансформации ФПТ, установленных в ветви №23-№24 (k_1^{lm} на рисунке) и №27-28 (k_2^{lm} на рисунке) тестовой 57-узловой схемы IEEE.

Анализ данных зависимостей позволяет более точно подобрать оптимальные настройки ФПТ.

В третьей главе на примере ПС 750 кВ Новобрянская был рассмотрен выбор оптимальных настроек ФПТ, который способен менять угол сдвига фаз напряжений на автотрансформаторе (АТ) 500/220 кВ. При отключении одного АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская в режиме зимних максимальных нагрузок 2018 года перегрузка оставшегося в работе второго автотрансформатора составит около 82%. Для устранения данной перегрузки возможно применение фазопоротного трансформатора, который будет осуществлять изменение угла на АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская, тем самым снижая значение потока мощности через данный автотрансформатор до допустимых величин. Анализ матрицы угловой чувствительности

ветвей показывает, что ветвями с наибольшим влиянием на поток мощности через АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская являются сами ветви АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская. С технической точки зрения установка в дополнение к автотрансформатору вольтодобавочного трансформатора (ВДТ), осуществляющего изменение угла в ветви, также вполне возможна и является опробованным на практике решением (например, на ПС 500 кВ Ульке).

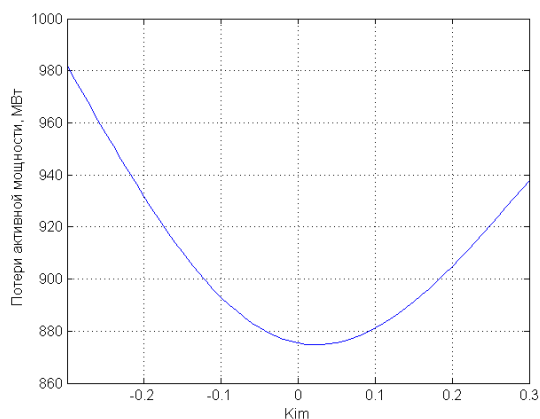
Аналитическое выражение требуемого эффекта от ФПТ на АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская может быть записано в следующем виде:

$$\begin{cases} I_{AT} \leq I_{доп AT} \\ \Delta P_{ОЭС Центра} \rightarrow \min \end{cases} \quad (6)$$

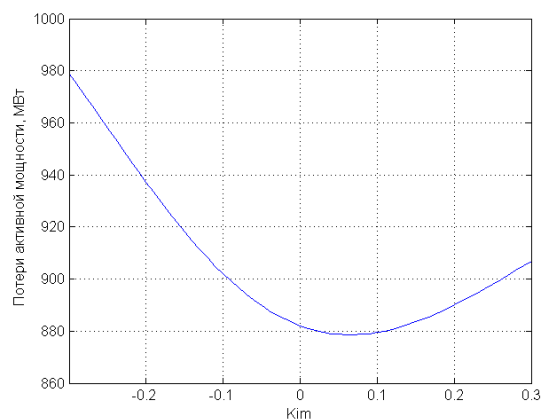
Потери активной мощности в ОЭС Центра будут складываться из постоянной составляющей, определяемой потерями в ветвях, значения потоков активной мощности в которых не зависят от изменяемого угла на АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская, и переменной, которая будет определяться потерями активной мощности в ветвях, чьи потоки мощности изменяются при варьировании угла на АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская.

$$\Delta P_{ОЭС Центра} = \Delta P_{пер} + \Delta P_{пост} \quad (7)$$

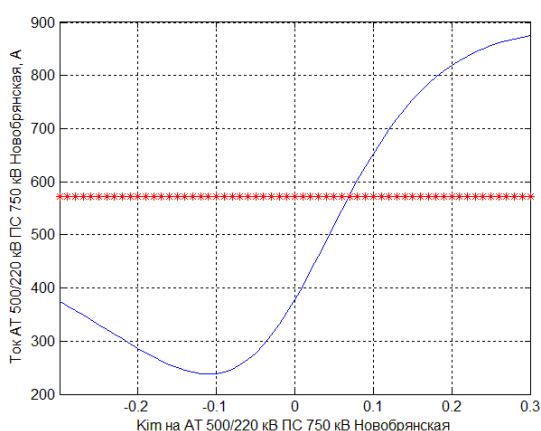
С помощью полученных в работе формул можно получить следующие графики зависимостей тока АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская и потерь активной мощности в ОЭС Центра от угла ФПТ (рисунок 6).



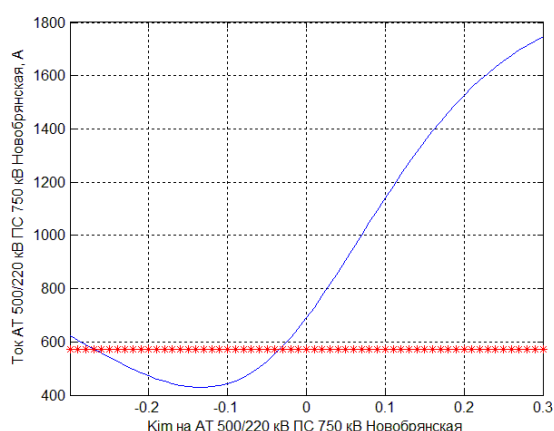
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 6 – Зависимость потерь активной мощности (МВт) в ОЭС Центра ((а) – в работе 2 АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская, (б) – в работе 1 АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская) и тока АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская ((в) – в работе 2 АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская, (г) – в работе 1 АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская) от угла регулирования ФПТ

Таким образом, учитывая токовые ограничения АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская, можно заключить, что оптимальным с точки зрения потерь активной мощности является настройка ФПТ с мнимым коэффициентом трансформации равным - 0,02 при нахождении в работе двух АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская и -0,07 при нахождении в работе 1 АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская.

В разделе 3.2 выполнена приблизительная экономическая оценка срока окупаемости ФПТ с точки зрения снижения потерь активной мощности. С помощью разработанного алгоритма в схеме ЕЭС России было найдено несколько возможных мест для установки ФПТ, определены их настройки (табл. 1).

Таблица 1 – Найденные места установки и настройки ФПТ в ЕЭС России

Ветвь для установки ФПТ	Значение мнимой части коэффициента трансформации	Снижение потерь активной мощности, МВт
АТ 750/330 кВ Калининская АЭС	-0,08	7,48
ВЛ 500 кВ Смоленская АЭС – Калужская	0,16	6,43
ВЛ 500 кВ Южная – Емелино	0,11	6,17
Т 500/220 кВ Няганская ГРЭС	-0,08	5,91
ВЛ 500 кВ Белый Раст – Западная	0,09	5,76
ВЛ 500 кВ Одинцово – Очаково	-0,08	5,49
ВЛ 750 кВ Курская АЭС – Металлургическая	0,13	5,12
АТ 500/220 кВ Владивосток	0,07	5,08

В разделе 3.3 рассмотрен выбор настроек ФПТ с помощью метода многокритериальной оптимизации. На выбор оптимальных настроек ФПТ влияет в общем случае множество факторов - как технических, так и политико-экономических: стремление государств-участников сократить транзитный поток по территориям соседей, желание сетевой компании, эксплуатирующей ФПТ и отходящие от него линии, минимизировать потери при передаче электроэнергии и прочие. Зачастую эти цели противоречивы.

Одним из возможных способов решения является метод главного критерия, который предполагает выделение одного главного критерия и оптимизацию режима ЭЭС по нему. При этом малое улучшение главного критерия может значительно ухудшать остальные. Другим возможным методом является метод линейной свертки:

$$C(a) = \sum_{i=1}^m w_i c_i(a), \quad (8)$$

где a – варьируемый параметр, $c_i(a)$ – значение критерия i в точке, w_i – весовой коэффициент критерия $c_i(a)$ ($\sum_{i=1}^m w_i = 1$).

Решение a^* является наилучшим, если для всех a выполняется условие $C(a^*) \geq C(a)$ или

$$a^* = \arg \max \sum_{i=1}^m w_i C_i(a). \quad (9)$$

Основным недостатком этих методов является то, что априори не ясны соотношение весовых коэффициентов в методе линейной свертки и выбор главного критерия и ограничения на второстепенные критерии в методе главного критерия. Уменьшения степени субъективизма можно достигнуть использованием векторных критериев оценки эффективности режимов ЭЭС.

Многокритериальная (или векторная) оптимизация состоит в одновременной оптимизации двух и более не сводимых друг к другу целевых функций (критериев) в заданной области определения. Принципиальными понятиями многокритериальной оптимизации являются понятия эффективного решения и множества Парето. Решение называется эффективным, если для него в области определения отсутствуют решения, которые превосходят его хотя бы по одному критерию и не хуже по всем остальным. Множество Парето – это множество эффективных решений. Образ множества Парето в пространстве критериев называется множеством эффективных оценок.

Выбор решения из множества Парето осуществляется диспетчером и основывается на его субъективной оценке критериев качества и их взаимосвязи между собой. Важно, что этот субъективизм существенно отличается от субъективизма при использовании, например, метода линейной свертки. Множество Парето представляет диспетчеру для выбора все возможные оптимальные решения и только их, в то время как метод линейной свертки предлагает лишь одно решение при неочевидной связи между качеством решения и значениями субъективно выбранных весовых коэффициентов.

Применение данного метода рассмотрено на примере ФПТ, установленного на ПС 500 кВ Ульке. В качестве рассматриваемых критериев были выбраны:

1. максимизация потока по ВЛ 500 кВ Житикара – Ульке;
2. минимизация потерь активной мощности в сетях 110 кВ и выше Актюбинского района (экономический критерий);
3. минимизация отклонения напряжения в узлах нагрузки Актюбинского района (критерий качества).

Для данных критериев были построены графики множеств эффективных оценок (рисунок 7).

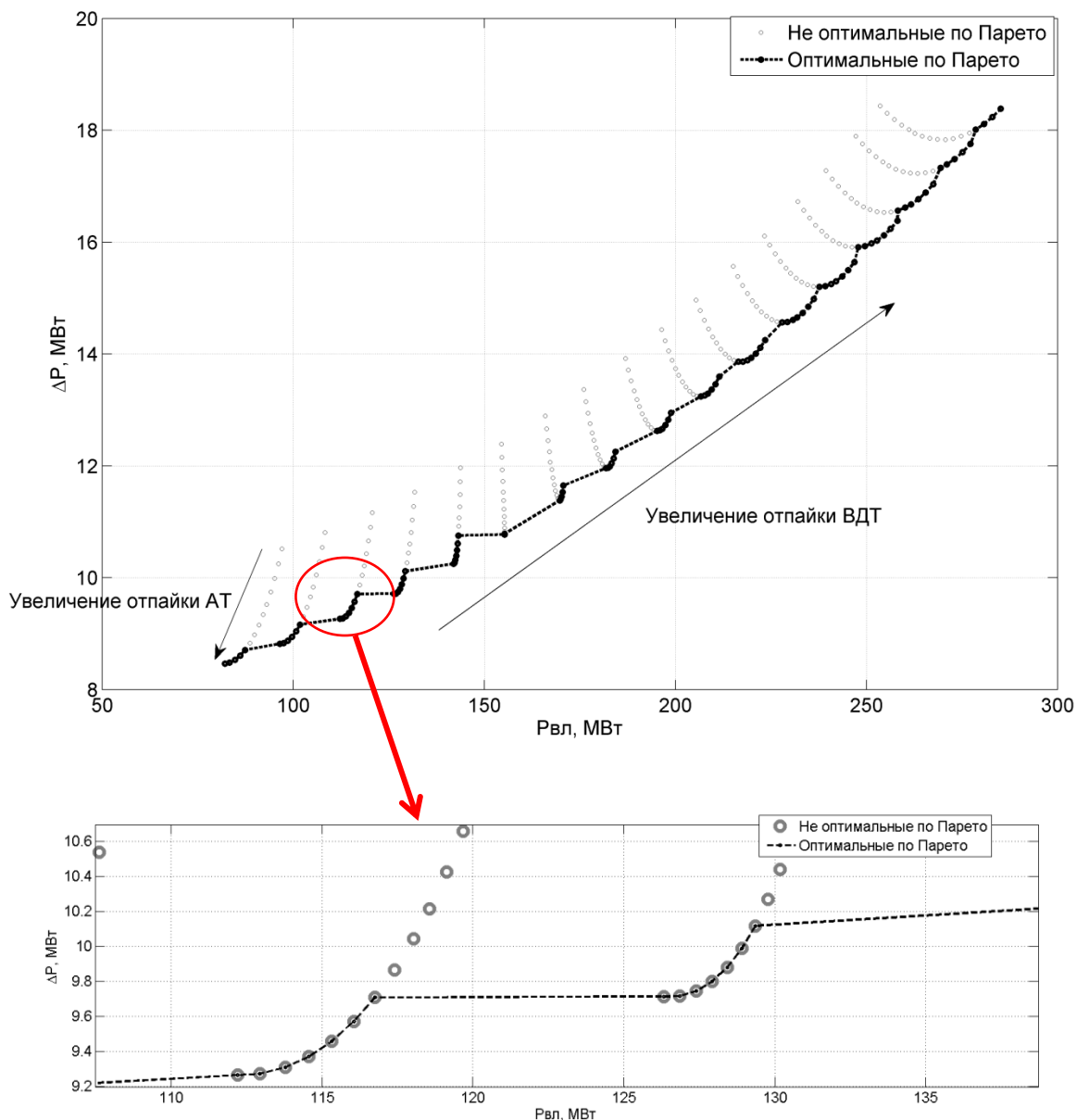


Рисунок 7 – Множество настроек ФПТ в пространстве критериев и множество эффективных оценок

При использовании только критериев 1 и 2 множество Парето содержит 100 элементов (рисунок 7) и относительно велико, так как данные критерии конфликтуют: увеличение потока активной мощности приводит к увеличению потерь. При меньших номерах (левая нижняя часть рисунка) отпаяк ВДТ регулирование можно проводить ступенчато (большая дискретность), при этом за счет изменения отпаяк АТ можно регулировать потери мощности. При больших номерах ВДТ регулирование потока мощности можно производить с меньшей дискретностью, при этом одной величине потока активной мощности (например, 250 МВт) может соответствовать несколько различных комбинаций положений РПН ВДТ и АТ, однако оптимальным будет только одно решение.

Таким образом, для ФПТ, установленного на ПС 500 кВ Ульке, рассмотрен выбор оптимального режима работы ЭЭС по векторному критерию. Показано, что, анализируя форму множества Парето, можно сузить множество эффективных решений. В итоге определен диапазон настроек, в рамках которого необходимо осуществлять регулирование ФПТ. Реализация подобного подхода возможна во всех случаях, в которых в задаче существуют несколько не сводимых друг к другу критериев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ мирового опыта применения ФПТ, который указывает на своевременность и актуальность применения фазопоротных технологий в сетях ЕЭС России. Показано, что выбор оптимального месторасположения ФПТ, как и его угла регулирования, является актуальной и до конца не решенной на настоящий момент задачей, а предложенным к настоящему моменту алгоритмам свойственен ряд недостатков.

2. Предложен альтернативный подход к выбору оптимальных мест установки и настроек ФПТ, основанный на разбиении электрической сети на зоны влияния потенциальных ФПТ (кластеры) и выборе в каждом из них оптимальной ветви для установки ФПТ. Показана возможность построения соответствующих зон влияния с помощью анализа матриц угловой чувствительности ветвей, которые могут быть получены в линеаризованной и полной моделях электрической сети. В тестовой схеме с помощью следствия билинейной теоремы получены уточненные аналитические зависимости потерь активной мощности от изменяемого угла ФПТ и, тем самым, выбраны места установки и углы ФПТ в кластерах, соответствующие минимуму потерь активной мощности. Полученные аналитическим путем результаты совпали с данными, полученными в ПК «RastrWin». Показан учет влияния сопротивления ФПТ, а также его зависимости от угла ФПТ на аналитические выражения напряжения в узлах и потерь активной мощности в схеме. Получены удобные выражения зависимостей параметров электрической схемы (напряжение, ток, потери активной мощности) от вещественной и мнимой частей коэффициентов трансформации, а также от мнимых частей коэффициентов трансформации расположенных в одном кластере фазопоротных трансформаторов.

3. Предложенный алгоритм верифицирован в электрической схеме реальной сети ОЭС Центра. Для ликвидации токовой перегрузки АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ Новобрянская после анализа матрицы угловой чувствительности ветвей схемы было предложено применение фазопоротного трансформатора на ПС 750 кВ Новобрянская. Были определены его настройки, при которых значение потерь активной мощности в ОЭС Центра является минимальным, а ток через автотрансформатор остается в

допустимых пределах. Определена новая настройка ФПТ, на которую требуется перейти при отключении одного из автотрансформаторов. Аналогичный анализ может быть проведен для любого предполагаемого к установке или существующего ФПТ.

4. Произведена приблизительная экономическая оценка срока окупаемости ФПТ с точки зрения снижения потерь активной мощности. С помощью разработанного алгоритма в схеме ЕЭС России было найдено несколько возможных мест для установки ФПТ, определены их настройки.

5. На примере ФПТ на ПС 500 кВ Ульке показана возможность применения метода многокритериальной оптимизации для определения оптимальных настроек ФПТ. Анализ полученных результатов позволил выбрать эффективные решения по критериям максимизации потока по ВЛ 500 кВ Житикара – Ульке (снижение трансграничного потока мощности) и минимизации потерь в электрической сети. Подобный метод выбора настроек ФПТ может быть применен в любой схожей ситуации, в которой на выбор угла ФПТ влияет одновременно несколько критериев.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ:**

1. Одинцов М.В., Акимов Д.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В. Оптимизация режимов работы энергосистемы с помощью фазоповоротного трансформатора на подстанции 500 кВ. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета №3 (202), 2014 г., стр. 139 – 145.
2. Акимов Д.А., Коровкин Н.В., Одинцов М.В., Фролов О.В. Методика выбора мест установки и параметров фазоповоротных трансформаторов в электрических сетях. Известия НТЦ Единой энергетической системы №1 (74), 2016 г., стр. 6 – 19.
3. Акимов Д.А., Гладышев О.Я., Борисов П.С. Усовершенствование методики выбора мест установки и углов регулирования фазоповоротных трансформаторов. Известия НТЦ Единой энергетической системы №2 (75), 2016 г., стр. 67 – 74.

Публикации в других изданиях:

4. Акимов Д.А. Технологии применения фазоповоротных трансформаторов в электрических сетях. Известия НТЦ Единой энергетической системы №2 (71), 2014 г., стр. 86 – 96.
5. D.A. Akimov, N.V. Korovkin, M.V. Odintsov, O.V. Frolov, 2014. Application of multiojective optimization methods for power system state control, in Proceedings of the 2014 International Conference on Energy, Environment and Material Science (EEMAS'14), pp. 70 – 73.
6. Одинцов М.В., Коровкин Н.В., Д.А. Акимов. Оптимизация установившихся режимов энергосистем по нескольким критериям качества. Сборник трудов V Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2014» (Томск), Том 1, стр. 214 – 218.

Подписано в печать 23.04.2018. Формат 60x84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ 16692b.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в Типографии Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14