

Application of Controlled FACTS an Effective Way to Increase Stability and Optimize Voltage Levels in the Power System

A.B. Balametov

"Azerenerji" OJSC "Azerbaijan Scientific-Research and Project-Research Energy Institute" LLC
(A. Alizade.10, Baku, AZ 1005, Azerbaijan)

For correspondence:

Balametov Ashraf / e-mail: elmira_qadashova@hotmail.com

Abstract

The article discusses the use of managed FACTS to solve the problem of voltage stability of the power system and the application of optimization methods for the optimal location, installed power of devices and minimization of losses. To increase the static stability of the Azerbaijan EES, it is proposed to improve the damping of low-frequency oscillations by placing a unified regulator of power flows in the power system.

Keywords: electric power system, voltage stability, controlled by FACTS, optimization algorithms, location determination, unified power flow controller, damping of low-frequency oscillations.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_02_97_109

Received 26.10.2022

Revised 16.06.2023

Accepted 21.06.2023

For citation:

Balametov A.B.

[Application of controlled facts an effective way to increase stability and optimize voltage levels in the power system]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 97-109 (in Russian)

Enerji sistemində dayanıqlığın yüksəldilməsi və gərginlik səviyyələrinin optimallaşdırılmasının tənzimlənməsi üçün idarə olunan FACTS-qurğularının tətbiqi **Ə.B. Balametov**

“Azərenerji” ASC “Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutu” MMC (Ə. Əlizadə küç. 10, Bakı, AZ 1005, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Balametov Əşraf / e-mail: balametov.azniie@gmail.com

Xülasə

Məqalədə enerji sisteminin gərginlik dayanıqlığı probleminin həlli üçün idarə olunan FACTS istifadəsi və optimal yerləşdirmə, cihazların quraşdırılmış gücü və itkilərin minimuma endirilməsi üçün optimallaşdırma üsullarının tətbiqi müzakirə olunur. Azərbaycan Respublikasının statik sabitliyini artırmaq üçün enerji sistemində güc axınlarının birləşdirilmiş tənzimləyicisinin yerləşdirilməsi ilə aşağı tezlikli dalğalanmaların dempfinin yaxşılaşdırılması təklif olunur.

Açar sözlər: elektrik enerjisi sistemi, FACTS, idarə olunan gərginliyin dayanıqlığı, optimallaşdırma alqoritmləri, vahid enerji axını tənzimləyicisi, aşağı tezlikli rəqslərin sönmənməsi.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_02_97_109

УДК 621.311

Применение управляемых FACTS для повышения устойчивости и оптимизации уровней напряжений в энергосистеме **А.Б. Баламетов**

ОАО "Азербайджанская Энергетическая Компания" ООО "Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-исследовательский энергетический институт" (ул. А. Ализаде 10, Баку, AZ1005, Азербайджан)

Для переписки:

Баламетов Ашраф / e-mail: balametov.azniie@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается применение управляемых FACTS для решения проблемы устойчивости напряжения энергосистемы и применения методов оптимизации для оптимального места размещения, установленной мощности устройств и минимизации потерь. Для повышения статической устойчивости Азербайджанской ЭЭС предлагается улучшение демпфирования низкочастотных колебаний размещением унифицированного регулятора потоков мощностей в энергосистеме.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, устойчивость напряжения, управляемый FACTS, алгоритмы оптимизации, унифицированный регулятор потоков мощностей, демпфирование низкочастотных колебаний.

Введение

Устойчивость работы энергосистемы является одним из основных направлений в последние время из-за несоответствия между спросом и генерацией активной мощности. Поддержание уровней напряжений в узлах является сложной задачей планирования и обеспечения надежности и оценки энергосистем. Устойчивость по напряжению - это способность энергосистемы поддерживать устойчивость и приемлемое напряжения на всех шинах энергосистемы в нормальных условиях эксплуатации и после воздействия нарушения. Проблемы с долговременной нестабильностью напряжения могут возникать в сильно нагруженных системах, где большое расстояние между генератором и нагрузкой. Своевременное применение компенсации реактивной мощности или сброс нагрузки может предотвратить этот тип нестабильности напряжения. Возможности обработки реактивной мощности системы могут быть улучшены с устройствами гибкой системы передачи переменного тока (FACTS). Применение соответствующего контроллера FACTS повышает устойчивость энергосистемы. В статье рассматривается применение управляемых FACTS для решения проблемы устойчивости напряжения энергосистемы и применения методов оптимизации для оптимального места размещения, установленной мощности устройств и минимизации потерь.

Структура электроэнергетической системы (ЭЭС) Азербайджана характеризуется существенной неоднородностью, в большом количестве электроэнергетических режимов наблюдается неравномерная загрузка линии электропередачи (ЛЭП), режим работы шунтирующей электри-

ческой сети может ограничивать возможность транзитной передачи электроэнергии по системообразующим связям. Применение устройств Flexible AC Transmission System (гибкие линии передачи переменного тока) (FACTS) позволяет придать пассивной электрической сети активные свойства и за счет этого осуществлять гибкое управление режимами работы энергосистемы. Устройства FACTS позволяют повысить пропускную способность электрической сети. Демпфирование может быть достигнуто за счет использования других устройств, установленных специально для повышения устойчивости. Наущение устойчивости электроэнергетической системы, является результатом потери синхронности ротора генератора в результате недостаточного демпфирующего момента низкочастотных колебаний частоты (обычно 0,1–1,0 Гц), локальные колебания частоты 1–3 Гц. Предлагается улучшение демпфирования низкочастотных колебаний размещением унифицированного регулятора потоков мощностей в энергосистеме. Эффективность применения продемонстрирована на тестовом примере неоднородной сети напряжением 220-330-500 кВ.

Устройства FACTS в основном использовались для решения различных задач управления энергосистемой в установившемся режиме, таких как регулирование напряжения, управление потоком мощности и повышение пропускной способности.

Как правило, установка устройств FACTS с единственной целью повышения статической устойчивости энергосистемы нерентабельна.

Целью статьи является распределение реактивной мощности размещением

FACTS второго поколения с электронными устройствами, улучшение демпфирования низкочастотных колебаний с помощью унифицированного регулятора потоков мощностей в энергосистеме.

Анализируется проблема устойчивости энергосистемы за счет использования статического синхронного компенсатора (STATCOM) для увеличения демпфирования электромеханических колебаний энергосистемы и регулирования напряжения системы. Предлагаемое комбинированное управление STATCOM и Unified Power Flow Controllers (UPFC) путем оперативного согласованного регулирования для демпфирования колебаний позволяет улучшить статическую устойчивость энергосистемы. Эти устройства должны быть дополнены вспомогательным контроллером для демпфирования низкочастотных колебаний.

Структура электрической сети Азербайджана характеризуется существенной неоднородностью, в связи с чем в большом количестве электроэнергетических режимов наблюдается неравномерная загрузка ЛЭП, в связи с чем режим работы шунтирующей электрической сети может ограничивать возможность транзитной передачи электроэнергии по системообразующим связям.

Применение устройств FACTS позволяет придать пассивной электрической сети активные свойства и за счет этого осуществлять гибкое управление режимами работы энергосистемы [1-4].

Метод обобщенных показателей чувствительности ЭЭС для размещения устройств FACTS. Применение устройств FACTS в электрических сетях требует определения мест размещения, настройки

параметров управления и оптимизации путем управления параметрами устройств. Анализ неоднородностей можно произвести на основе обобщенных показателей электрической сети выявлением наиболее чувствительных элементов и использованием этой информации для улучшения свойств электроэнергетической системы. Места расположения устройств FACTS в Азербайджанской ЭЭС определены на основе использования индекса стабильности напряжения, чувствительности потерь активной и реактивной мощности по реактивному сопротивлению для каждой линии.

Неоднородность схемы привела к существованию различных свойств чувствительности и слабости в разных местах ЭЭС. Поэтому такие подходы могут рассматриваться как методы анализа неоднородности и ее проявлений.

При функционировании ЭЭС подвергается различным воздействиям: изменения нагрузок, коммутация элементов схемы, изменения генераций мощности, воздействия автоматики, короткие замыкания, большие сбросы (набросы) нагрузок, отключения оборудования, работа защит и противоаварийной автоматики.

Возмущения, прикладываемые в разные места ЭЭС, вызывают заметную реакцию одних и тех же параметров режима: при разной локализации возмущений больше всего изменяются модули напряжения в одних и тех же узлах, перегружаются одни и те же элементы [5, 6].

В [5] приведены результаты исследования влияния ветвей на неоднородность Азербайджанской энергосистемы на основе обобщенного показателя неоднородности электрической сети (ЭС) [5].

Современные мощные энергосистемы характеризуются применением устройств FACTS для повышения пропускной способности линий и уменьшения потерь в них [6-7].

Целью данной статьи является анализ мест расположения устройств FACTS на основе использования показателей, как индекс статической устойчивости напряжения, чувствительность потерь активной и реактивной мощности для каждой линии.

Использование обратной матрицы Якоби и обратной матрицы Z. Для выявления сенсорных узлов, параметры режима которых наиболее чувствительны к таким внешним возмущениям, как изменения активных и реактивных нагрузок, можно использовать линейризованное выражение [5]:

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix} \quad (1)$$

Известно, что элементы обратной матрицы Якоби характеризуют степень влияния изменения активных и реактивных нагрузок в узле j на изменения фаз и модулей напряжений в узле i . При этом если значения диагональных элементов матрицы Якоби значительно больше наддиагональными, то изменения фаз напряжений в узле i в большей мере определяются изменениями активных нагрузок, а изменения модулей напряжений - изменениями реактивных нагрузок в этом узле.

Идентификация чувствительных узлов с целью наилучшего размещения устройств для компенсации реактивной мощности. Для этой цели в [5] предлагается использовать показатель, который назы-

вается показателем статической устойчивости по напряжению (Static Voltage Stability Index - SVSI). Этот показатель можно использовать для определения местоположения FACTS в ЭС. Показатель статической устойчивости по напряжению для простой модели линии с двумя узлами имеет вид:

$$k_{\text{св}} = \frac{2 \cdot \sqrt{(X_{ji}^2 + R_{ji}^2)} \cdot (P_{ji}^2 + Q_{ji}^2)}{|V_i^2 - 2X_{ji}Q_{ji} - 2R_{ji}P_{ji}|} \quad (2)$$

Используется также, ускоренный показатель статической устойчивости по напряжению (Fast Voltage Stability Index - FVSI). Рассчитанный для всех ветвей этот показатель может быть использован для определения чувствительных узлов. Определение таких узлов основано на максимальной реактивной нагрузке.

Известно, что если узел i является началом линии, то напряжение конца линии определяется из уравнения баланса реактивной мощности:

$$V_j^2 - \left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_i V_j + \left(X + \frac{R^2}{X} \right) Q_j = 0$$

Условием, при котором данное уравнение имеет положительное решение, является:

$$\frac{4Z^2 Q_j X}{V_i^2 (R \sin \delta + X \cos \delta)} \leq 1$$

При учете условия $\delta \approx 0$ имеем:

$$k_{\text{св}} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \leq 1 \quad (3)$$

где Z полное сопротивление линии, X реактивное сопротивление, V_i напряжение в начале, Q_j реактивная мощность в конце линии.

Наиболее чувствительные узлы соответствуют узлам с меньшими максимальными реактивными нагрузками. Для устой-

чивого состояния ЭС $k_{\text{уск}}$ принимает значения от 0 до 1. $k_{\text{уск}}=1$ представляет собой неустойчивое состояние. Для устойчивой системы $k_{\text{уск}}$ должен поддерживаться на уровне значительно ниже чем 1.

Чувствительность потерь реактивной мощности по регулируемому параметру тиристорно-управляемого продольного компенсатора (ТУПК). Для ТУПК, установленного на линии между узлами i и j реактивное сопротивление линии можно рассматривать в качестве регулируемого параметра. Тогда чувствительность потерь реактивной мощности по регулируемому параметру ТУПК можно представить в виде

$$a_{ij} = \frac{\partial Q_L}{\partial x_{ij}} = [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij}] \cdot \frac{r_{ij}^2 - x_{ij}^2}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)^2} \quad (4)$$

Последнее уравнение показывает, что чем больше коэффициент чувствительности, тем больше передающая способность линии возрастает после установки ТУПК.

Для всех линий определяются индексы чувствительности, и для размещения ТУПК выбирается линия с наибольшим положительным индексом чувствительности потерь реактивной мощности.

Чувствительность потерь активной мощности. Чувствительность потерь активной мощности при передаче по продольному реактивному сопротивлению определяется следующим образом

$$b_{ij} = \frac{\partial P_L}{\partial x_{ij}} = -2[V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij}] \cdot G_{ij} B_{ij} \quad (5)$$

В общем случае, чем больше коэффициент чувствительности, тем больше передающая способность линии возрастает после установки ТУПК.

Исследования по выявлению сенсорных элементов Азербайджанской энергосистемы были проведены на примере эквивалентной схемы, состоящей из 24 узлов и 26 ветвей. Для определения показателей чувствительности были проведены РУРЭС. Наиболее чувствительными являются подстанции Аз-ЭЭС22: 1 - ТЭС-Аз, 3 - Мин-ГЭС, 5 - Абшерон, 7 - Хырдалан, 10 - Сумгайыт-ТЭС, 18 - Говсаны, 23 - Агджабеди.

Анализ элементов матрицы Якоби показывает значительное преобладание диагональных элементов. Диаграмма ускоренного показателя статической устойчивости по напряжению для ветвей 24-х узловой схемы приведена на рис. 1.

Из рис.1 следует, что наиболее чувствительны к изменениям активных нагрузок фазы напряжений в узлах 4, 5, 6.

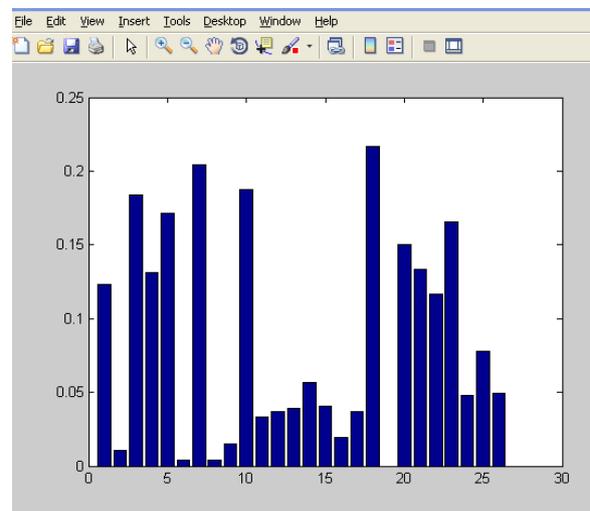


Рисунок 1 – Диаграмма чувствительных ветвей на основе ускоренного индекса устойчивости
Figure 1 – Diagram of sensitive branches based on the accelerated stability index

К изменениям реактивных нагрузок наиболее чувствительны узлы 2, 3, 6. Максимальные элементы матрицы Z (диагональные элементы) характеризующие

наиболее сенсорные узлы соответствуют узлам 5-7.

Для нахождения лучшего места для размещения ТУПК также может быть использован анализ чувствительности. Существуют несколько индексов для использования при нахождении оптимального места установки ТУПК.

Методы оптимизации энергетической системы с устройствами FACTS. Устройство FACTS на линии электропередачи играет важную роль в поддержании устойчивости энергосистемы. За последнее время были предложены и реализованы различные методы оптимизации с устройствами FACTS. Последние достижения в компьютерной инженерии и сложность, связанная с оптимизацией энергосистемы, привели к необходимости разработки методов программирования, которые можно использовать для поиска оптимального места для размещения устройств FACTS. К ним относятся динамическое программирование, методы множителей Лагранжа, эвристические методы и эволюционные методы, такие как генетические алгоритмы. Эти методы часто используются в комбинации многими другими методами интеллектуальных систем, включая искусственные нейронные сети (ИНС), экспертные системы (ЭС), алгоритмы табу-поиска (ТС) и нечеткую логику (НЛ) [7]. Проблема размещения устройств FACTS решается также с использованием эвристических методов оптимизации, которые разнообразны и постоянно совершенствуются.

Современные устройства FACTS требуют современных подходов испытаний и тестирования. Эти компенсаторы также

можно использовать для уменьшения колебаний напряжения.

Кратковременные проблемы с устойчивостью напряжения обычно связаны с быстрой реакцией регуляторов напряжения (АРВ генераторов) и силовых электронных преобразователей, таких как те, которые встречаются в гибкой системе передачи переменного тока. В случае регуляторов напряжения неустойчивость напряжения обычно связана с неправильной настройкой системных контроллеров.

Применение устройств FACTS для гашения низкочастотных колебаний в энергосистемах. Основным преимуществом СТАТКОМ-а и унифицированного регулятора потока мощности (УРПМ) является быстрое действие. Время перехода из режима максимальной выработки реактивной мощности в режим максимального потребления составляет менее 0.01 сек.

Устойчивость энергосистем вызвана сложными взаимосвязями и является главной проблемой энергосистемы.

В ЭЭС может перестать обеспечивать адекватное демпфирование для межзонных колебаний и вариации профиля напряжения. Применение устройств FACTS может обеспечивать эффективное демпфирование низкочастотных колебаний и улучшить уровни напряжений в узлах.

Унифицированный регулятор потока мощности является наиболее перспективным устройством в концепции FACTS. Он имеет возможность регулировать три параметра управления, то есть напряжение на шине, реактивное сопротивление линии передачи и фазовый угол между двумя шинами одновременно или независимо. UPFC выполняет это посредством управления

синфазным напряжением, квадратурным напряжением и компенсацией шунта.

UPFC может управлять тремя параметрами управления либо по отдельности, либо в соответствующих комбинациях на своем последовательно соединенном выходе, сохраняя при этом поддержку реактивной мощности на своем параллельном входе.

Общепризнано, что добавление дополнительного контроллера к UPFC может значительно улучшить демпфирование энергосистемы. Поэтому было предложено несколько схем управления для выполнения задачи демпфирования колебаний.

Имеется попытка размещения UPFC для энергосистемы на линии электропередачи с двумя зонами для демпфирования режима колебаний между участками.

Был предложен ПИ-контроллер с несколькими входами и несколькими выходами. Показано что, если более одного контроллера UPFC, такого как контроллер потока мощности, контроллер напряжения переменного тока и контроллер напряжения постоянного тока, были разработаны отдельно, динамическое взаимодействие между различными каналами управления может нарушать устойчивость системы.

Разработаны различные интеллектуальные контроллеры демпфирования для UPFC для демпфирования как локальных, так и межзональных мод колебаний для многомашинной системы. Эффективность таких контроллеров была продемонстрирована и описана с удовлетворительным успехом.

Устройства FACTS позволяют решать широкий комплекс задач – от регулирования напряжения в узлах электрической се-

ти и перераспределения потоков активной и реактивной мощности между сетями различного класса напряжения до повышения степени использования пропускной способности электрической сети.

Эффективность применения UPFC и STATCOM только для гашения колебаний частоты ЭЭС может быть экономически неоправданной. Использование также для управления оптимальными установившимися режимами дает большую экономическую эффект.

Управляемые и неуправляемые устройства продольной компенсации (УПК). Применение устройств УПК позволяет увеличить пропускную способность ЛЭП и контролируемых сечений, осуществить перераспределение потоков активной мощности по ЛЭП, в том числе разных классов напряжения, а также демпфирование низкочастотных колебаний мощности (при наличии в составе УПК управляемой части).

Применение фазоповоротных устройств (ФПУ) позволяет обеспечить регулирование напряжения на объекте установки не только по величине, но и по фазе, изменяя при этом как активную, так и реактивную мощность по соответствующему электросетевому элементу.

Глобальное управление демпфированием (WADC) - это класс систем автоматического управления, используемых для повышения устойчивости современных электроэнергетических систем, известных как интеллектуальные сети. Приведение в действие контроллера обеспечивается посредством модуляции способных устройств активной или реактивной мощности по

всей сети. Такие исполнительные механизмы чаще всего представляют собой ранее существовавшие устройства энергосистемы, такие как статические компенсаторы реактивной мощности, которые служат основным целям, не связанным напрямую с применением WADC. Неустойчивость крупной электрической сети, не оборудованной WADC, является результатом потери синхронности ротора генератора и обычно рассматривается как генератор (или группа генераторов), колеблющийся по незатухающей экспоненциальной траектории в результате недостаточного демпфирующего момента.

Добавление к энергосистеме с двумя зонами комбинации СТАТКОМ и UPFC приводит к значительному увеличению демпфирования колебаний и повышению устойчивости энергосистемы (рис 2).

Предусматривается координация между контроллером STATCOM и UPFC, принимается во внимание для улучшения стабильности системы при переходных процессах, а также для регулирования напряжения в системе.

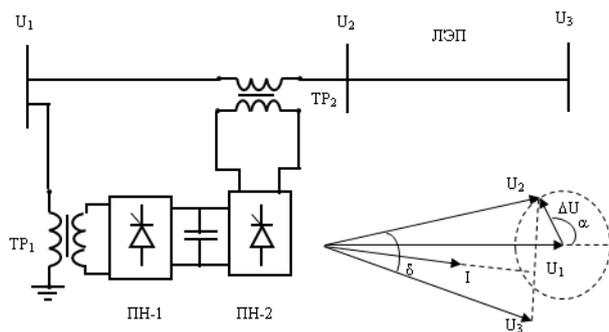


Рисунок 2 – Модель системы УРПМ для гашения колебаний ЭС
Figure 2 – System model UPFC for damping oscillations ES

Статический синхронный последовательный компенсатор (ССПК) (static syn-

chronous series compensators SSSC) является гибкой системой передачи переменного тока, которая состоит из инвертора источника напряжения, соединенного с трансформатором, который последовательно соединен с линией передачи.

Это устройство может подавать почти синусоидальное напряжение последовательно с линией. Введенное напряжение можно рассматривать как индуктивное или емкостное реактивное сопротивление, которое последовательно подключается к линии передачи. Эта функция может обеспечить управляемую компенсацию напряжения. Кроме того, SSSC может реверсировать поток мощности, вводя достаточно большое последовательное реактивное компенсирующее напряжение.

UPFC использует твердотельные устройства, которые обеспечивают функциональную гибкость, обычно недостижимую с помощью обычной тиристорно управляемой системы. UPFC представляет собой комбинацию статического синхронного компенсатора и статического синхронного последовательного компенсатора которые связаны через общую линию постоянного напряжения.

Устройства FACTS, на основе STATCOM и универсального регулятора потока мощности.

Устойчивость ЭС - это способность электроэнергетической системы при заданных начальных рабочих условиях восстанавливать состояние рабочего равновесия после воздействия физического возмущения, при этом большинство системных переменных ограничено таким образом, что практически вся система остается нетронутой.

Статический компенсатор реактивной мощности (SVC) является одним из шунтирующих устройств FACTS, который повышает устойчивость сети, ограничивая низкочастотные колебания и др. Стабилизатор (PSS) также играет эффективную роль в демпфирование колебаний.

СТАТКОМ имеет контроллер обратной связи по выходу, а PSS имеет ПИ-регулятор. Эти устройства СТАТКОМ и PSS используются совместно для улучшения демпфирования колебания энергосистемы [6-8].

Системы возбуждения с высоким коэффициентом усиления и малым временем отклика значительно улучшают устойчивость переходных процессов, но также могут снижать устойчивость малых сигналов (демпфирующий момент). Управление стабилизатором энергосистемы вносит положительный вклад за счет гашения колебаний угла ротора генератора, которые находятся в широком диапазоне частот в энергосистеме.

Слабые связи в работе линий и больших нагрузок на систему могут привести к плохо демпфированному режимам. Управление PSS, как правило, может обеспечить значительные улучшения в демпфировании режима за счет применения стабилизаторов к большинству блоков, которые участвуют в режимах качания мощности.

PSS обеспечивает модуляцию напряжения возбуждения, которая гасит колебания мощности и скорости за счет обычного управления регулированием напряжения. Исследование настройки определяет оптимальные настройки PSS на основе конкретного генератора, настроек автоматических регуляторов напряжения и характеристик системы.

Решение задачи

Эквивалентная электрическая схема участка 220-330-500 кВ Азербайджанской ЭЭС объединяющая две зоны приведена на рис.3.

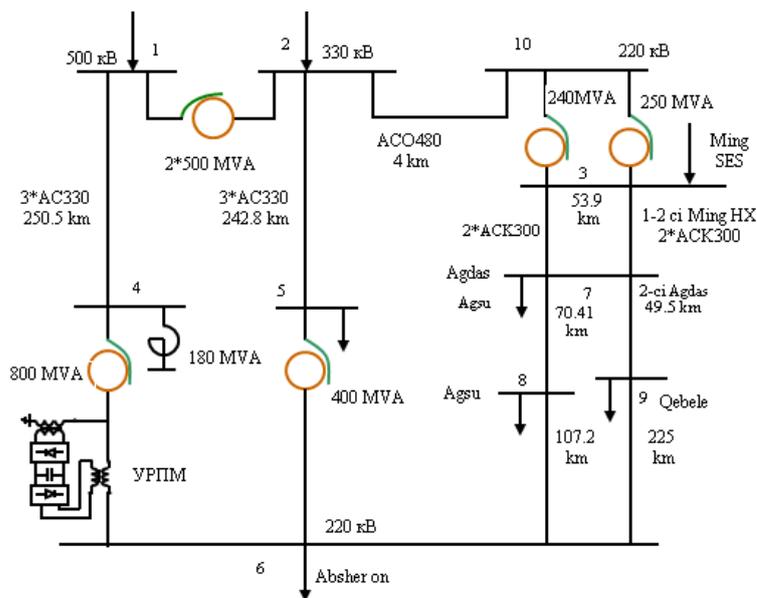


Рисунок 3 – Эквивалентная электрическая схема участка 220-330-500 кВ
 Figure 3 – Equivalent electrical circuit of the section 220-330-500 kV

Рассматривается установка на шинах узла 220 кВ подстанции Абшеронская СТАТКОМ куда подходит ЛЭП 220, 330 и 500 кВ и УРПМ на линии 500 кВ. Генерация электрических станций северо-западной зоны ЭЭС Азербайджана составляет около 3400 МВт. Генерация электрических станций Абшеронской зоны составляет около 3000 МВт. Место установки СТАТКОМ и УРПМ на конце ВЛ 500 кВ со стороны АТР 800 МВА (500/220 кВ) 220 кВ ПСТ Абшерон.

Рассмотрены режимы потребления активной мощности в зоне Абшерон (в узле №6) 1600 МВт при отборах активной мощности на подстанциях 220 кВ Агдаш, Агсу, Габала по 50 МВт. Расчеты произведены на основе программного комплекса Аз НИ и ПИ ИЭ [9, 10]. При моделировании режимов предусмотрено использование адекватных математических моделей FACTS. Пропускная способность в системе передачи ограничена из-за различных факторов, таких как предел устойчивости установившегося состояния, термическое ограниче-

ние, предел переходной устойчивости и демпфирование системы.

Неоднородность в схеме сети (рис. 3) приводит к перегрузке ВЛ 220 кВ и росту потерь активной мощности. Поток активной мощности при установке УРПМ по ВЛ 500 кВ растут с 888.3 МВт до 971.4 МВт, по ВЛ 220 кВ снижаются с 482 МВт до 433 МВт. Потери мощности с учетом УРПМ уменьшаются на 11.46 МВт.

Напряжения в узлах схемы с учетом и без учета УРПМ приведены на рис 4.

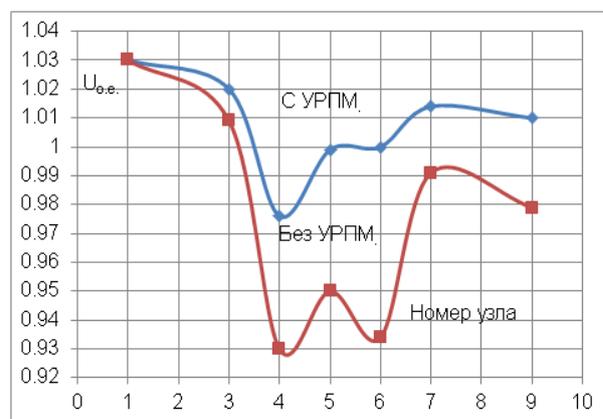


Рисунок 4 – Профили напряжения по узлам схемы
Figure 4 – Voltage profiles by circuit nodes

Таблица – Результаты расчета режимов с учетом и без учета УРПМ
Table – Voltage profiles by circuit nodes

УРПМ в ветви 4-6	Потоки активной мощности ВЛ, МВт			Потери активной мощности ВЛ, МВт				δ_6 , градус
	P_{500}	P_{330}	P_{220}	ΔP_{sum}	ΔP_{500}	ΔP_{330}	ΔP_{220}	
С	971.4	403.1	433.0	57.81	30.7	12.3	14.4	-21.09
Без	888.3	449.0	482.0	69.27	30.5	17.6	21.2	-25.95

Потери мощности с учетом УРПМ уменьшаются на 11.46 МВт. (см. таблицу). Установка на шинах 220 кВ в зоне Абшеронская энергоузла (узел №6) СТАТКОМ в нормальных режимах позволяет снизить потери активной мощности на более чем 10 МВт.

Одновременная установка в узле №6 СТАТКОМ и УРПМ, в установившихся режимах позволяет снизить потери активной мощности на более чем 12 МВт [9-11].

Зависимость потерь активной мощности от поперечного составляющего ком-

плексного коэффициента трансформации показана на рис. 5.

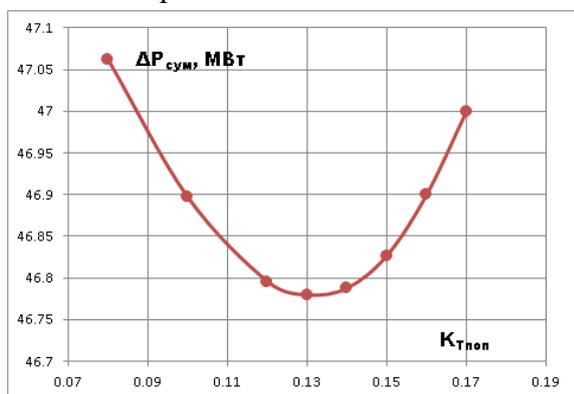


Рисунок 5 – Зависимость потерь активной мощности от поперечного составляющего комплексного коэффициента трансформации

Figure 5 – Dependence of active power losses on the transverse component of the complex transformation ratio

При режиме передачи мощности 1600 МВт необходимая генерация реактивной мощности в узле Абшерон составляет 320 МВАр. Основной эффект достигается за счет установки в узле №6 УРПМ.

Заключение

Определены места размещения устройств FACTS в Азербайджанской

энергосистеме на основе использования индекса устойчивости напряжения, чувствительности потерь активной и реактивной мощностей. Для повышения статической устойчивости Азербайджанской ЭЭС предлагается улучшение демпфирования низкочастотных колебаний размещением унифицированного регулятора потоков мощностей в энергосистеме. Установлено, что рациональное размещение УРПМ позволяет улучшить технико-экономических показателей Азербайджанской ЭЭС при всех режимах; перераспределение потоков активной мощности по ВЛ в неоднородной сети 220, 330, 500 кВ; загрузка ВЛ 500 кВ на более чем 100 МВт и разгрузка ВЛ 220 кВ; снижение потерь активной мощности на более чем 12 МВт; улучшение уровней напряжений до 10% в узлах энергосистемы.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

REFERENCES

- 1. Voropaj N.I., Etingov P.V., Udalov A.S., Zhermon A, Sherkavi R.** Koordinirovannoe protivovavriynoe upravlenie nagruzkoj i ustrojstvami FACTS. «Elektrichestvo», 2005, № 10, s. 25-37 (in Russian)
- 2. Koshcheev L. A., Shlajfshtejn V.A.** Ob effektivnosti primeneniya upravlyayushchih ustrojstv v elektricheskoy seti. *Elektricheskie stancii*, 2005, № 12, s. 30-38 (in Russian)
- 3. Kochkin V.I.** Novye tekhnologii povysheniya propuskoj sposobnosti LEP. Upravlyayemaya peredacha moshchnosti. *Novosti Elektrotekhniki*. 2007. T. 46, № 4. S. 2-6 (in Russian)
- 4. Balametov A.B., Halilov E.D.** Primenenie gibkih peredayushchih sistem peremennogo toka kak effektivnyj sposob resheniya problem v EES. - Baku: *Problemy energetiki*, «ELM», - 2010. № 4, - s. 20-28 (in Russian)

5. **Balametov A.B., Halilov E.D.** Ob ispolzovanii obobshchennyh pokazatelej chuvstvitel'nosti dlya razmeshcheniya ustrojstv FACTS v energosistemah. *Problemy energetiki*, 2013, № 4, str. 18-27 (*in Russian*)
6. **Kundur P., Klein M., Rogers G.J., and Zywno M.S.** Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability, *IEEE Trans., PWRS-4*, May 1989, 614–626 (*in English*)
7. **Madhuranthak T.A., Gowri Manohar T.** A Review on Power System Voltage Stability and Optimization Techniques. *Int. Journal of Engineering Research and Application* ISSN 2248, Vol. 6, Issue 11, (Part-4) November 2016, pp 06-14 (*in English*)
8. **Balametov A.B., Halilov E.D., Isaeva T.M.** Simulation of STATCOM for voltage quality improvement in power system. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE)*. Issue 22, Volume 7, Number 1, March 2015 (*in English*)
9. **Balametov A.B., Khalilov E.D., Isayeva T.M.** Research of optimal control of shunt reactors of ultra-high voltage power transmissions lines. The 16th International Conference on Technical and Physical Problems of Engineering 12 - 13 October 2020 ISTANBUL, TURKEY, p.p. 27-31 (*in English*)
9. **Balametov A.B., Halilov E.D., Isaeva T.M.** Simulation of STATCOM for voltage quality improvement in power system. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE)*. Issue 22, Volume 7, Number 1, March 2015 (*in English*)
10. **Balametov A.B., Khalilov E.D., Isayeva T.M.** Research of optimal control of shunt reactors of ultra-high voltage power transmissions lines. The 16th International Conference on Technical and Physical Problems of Engineering, 12-13 October, 2020, ISTANBUL, TURKEY, p.p. 27-31 (*in English*)
11. **Balametov A.B., Halilov E.D.** Primenenie ustrojstv FACTS dlya gasheniya nizkochastotnyh kolebanij v Azerbajdzhanskoj energosisteme. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshih sistem energetiki*: Vyp. 73. Irkutsk: ISEM SO RAN. 2022. 667 c. (*in Russian*)