

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Валерий Павлович Голов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, Россия, Иваново, e-mail: golov@ispu.ru

Дмитрий Николаевич Кормилицын

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: dnk@es.ispu.ru

Ольга Сергеевна Суханова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

Анализ влияния управляемой линии высокого напряжения и автоматического регулирования возбуждения генераторов на колебательную устойчивость электроэнергетической системы¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Согласно Правилам устройства электроустановок, синхронные машины (генераторы, компенсаторы, электродвигатели) должны быть оборудованы устройствами автоматического регулирования возбуждения. Их применение положительно сказывается на показателях устойчивости и режимах электроэнергетической системы. В настоящее время развитие промышленности и увеличение числа потребителей требует повышения пропускной способности существующих линий электропередачи напряжением 220 кВ. При выдаче мощности с электростанции применение управляемых устройств продольной емкостной компенсации способно существенно увеличить пропускную способность линии электропередачи, однако при этом встает вопрос устойчивой работы электроэнергетической системы. Для формирования методов выбора параметров автоматического регулирования возбуждения и управляемого устройства продольной компенсации целесообразно проанализировать статическую колебательную устойчивость электроэнергетической системы, содержащей управляемую линию электропередачи 220 кВ, при регулировании возбуждения ее генераторов.

Материалы и методы. Используются методы математического моделирования электроэнергетической системы, теория дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процес-

¹ Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (соглашение 075-15-2020-038 от 17.03.2020).

The project is carried out with financial assistance of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Grant of President of the Russian Federation to Support Young Researchers – Candidate of Science of Russia (agreement 075-15-2020-038 dated 17.03.2020).

сов, методы анализа устойчивости электроэнергетических систем. В качестве инструмента моделирования применено оригинальное программное обеспечение на языке программирования C++.

Результаты. Произведен анализ влияния управляемого устройства продольной компенсации линии высокого напряжения и автоматического регулирования возбуждения генераторов на колебательную статическую устойчивость. Определены значения параметров регулирования управляемого устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения с учетом возможных ограничений при сохранении положительного влияния данных устройств. Построены области устойчивости исследуемой электроэнергетической системы в зависимости от настроечных параметров рассматриваемых устройств.

Выводы. Полученные результаты могут использоваться для улучшения статической колебательной устойчивости электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации и автоматическим регулированием возбуждения генераторов.

Ключевые слова: статическая колебательная устойчивость, линии электропередачи высокого напряжения, управляемое устройство продольной компенсации, автоматическое регулирование возбуждения

Valery Pavlovich Golov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Russia, Ivanovo, e-mail: golov@ispu.ru

Dmitriy Nikolayevich Kormilitsyn

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dnk@es.ispu.ru

Olga Sergeevna Sukhanova

Ivanovo State Power Engineering University, Master Degree Student of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

Analysis of influence of controlled high voltage line and automatic excitation control generators on oscillatory steady-state stability of electric-power system

Abstract

Background. According to the rules of installation of electricity-generating equipment, synchronous machines (generators, compensators, electric motors) must be equipped with automatic excitation control devices. Their application has a positive effect on the stability indicators and electrical power-engineering system modes. Currently, the development of industry and an increase in the number of consumers require transmission capacity growth of existing 220 kV power transmission lines. The use of controlled series compensation devices can significantly increase the transmission capacity of a power transmission line, however, there is a problem of stable operation of the electric power-engineering system. To choose the methods for control parameters of automatic excitation control and controlled series compensation device, it is advisable to analyze the oscillatory steady-state stability of the electric power-engineering system that contain a controlled 220 kV power transmission line when regulating the excitation of its generators.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of the electric power system, the theory of long-distance power lines and electromechanical transients, methods of analyzing the stability of electric power systems are used. The original software in the C++ programming language has been used as a modeling tool.

Results. The authors have analyzed the influence of controlled series compensation of high voltage transmission line and generators of automatic excitation control on oscillatory steady-state stability of electric power system. The parameters value of regulation of the controlled series compensation device and the automatic excitation control are determined, considering restrictions while maintaining the positive influence of these devices. Zones of stability of the examined electric power-engineering system are formed depending on setup variable of the devices under consideration.

Conclusions. The obtained results can be used to enhance oscillatory steady-state stability of electric power system with controlled series compensation device and automatic excitation control systems.

Key words: oscillatory steady-state stability, high voltage power lines, series compensation device, automatic excitation control

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.1.038-045

Состояние вопроса. Наиболее тяжелым режимом, нарушающим нормальное функционирование электроэнергетической системы, является аварийный режим, называемый системной аварией [1]. При такой аварии прекращает работу все оборудование, использующее электроэнергию, что приводит не только к ее недопроизводке, но и к огромным убыткам от брака и порчи продукции, а также к аварии самого производящего оборудования. Следует заметить, что системные аварии могут начинаться без видимых причин, при нормальном режиме электроэнергетической системы. Такие аварии связаны с выбором настроечных параметров регулирующих устройств, наличием управляемых устройств продольной компенсации и т.д. Для решения этих задач необходимо оценивать статическую устойчивость электроэнергетической системы (ЭЭС) или ее устойчивость к «малым» возмущениям, так как именно нарушения этого вида устойчивости приводят к системным авариям с их отрицательными последствиями [2].

Материалы и методы. Модель рассматриваемой электроэнергетической системы. Исследование проводилось для простейшей электроэнергетической системы, содержащей управляемую ЛЭП ВН (рис. 1). Системы с управляемыми передачами рассматриваются в работах достаточно часто [3–5]. Генераторы электрической станции с суммарной мощностью 600 МВт с автоматическим регулированием возбуждения (АРВ) соединены с системой двухцепной линией электропередачи 220 кВ длиной 126 км с установленным управляемым устройством продольной компенсации (УУПК). На выводах УУПК установлены шунтирующие реакторы (ШР).

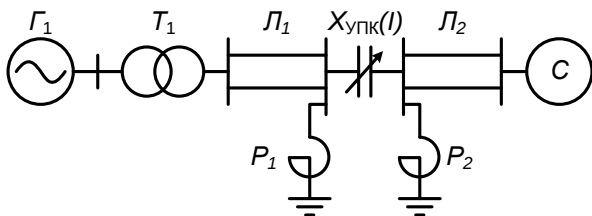


Рис. 1. Схема исследуемой электроэнергетической системы, содержащей управляемую ЛЭП СВН

Математическая модель исследования устойчивости состоит из дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих электромагнитные и электроме-

ханические переходные процессы в элементах системы [6].

Закон регулирования АРВ при анализе статической устойчивости [5] имеет вид

$$\Delta u_f = K_{0U}(U_0 - U_f), \quad (1)$$

где Δu_f – значение добавочного напряжения обмотки возбуждения под воздействием АРВ; K_{0U} – коэффициент регулирования по отклонению напряжения генератора; U_0 – уставка АРВ пропорционального действия генератора по напряжению; U_f – напряжение на выводах генератора.

Регулирование управляемого УПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) [7]:

$$X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_{1\text{УПК}} - K_{2\text{УПК}} I)}, \quad (2)$$

где $X_{\text{УПК}}(I)$ – сопротивление УУПК, Ом; I – ток линии (в месте установки УУПК), кА; $K_{1\text{УПК}}$, $K_{2\text{УПК}}$ – коэффициенты УУПК, мкФ и мкФ/кА соответственно.

Однако в данной электроэнергетической системе из-за наличия изменяющегося емкостного сопротивления не исключается возможность появления резонанса напряжений. Он обусловлен равенством суммарного индуктивного сопротивления сети и емкостного сопротивления УУПК, которое зависит от тока, проходящего через него.

Значение тока, при котором наблюдается резонанс напряжений, называется резонансным и зависит от коэффициентов регулирования УУПК. При больших коэффициентах $K_{2\text{УПК}}$ резонанс напряжений возникает при меньшем значении тока, так как при этом быстрее увеличивается сопротивление $X_{\text{УПК}}$.

Как правило, до появления резонанса напряжений возникает явление резонансного перехода. Введем понятие падения напряжения N в электропередаче между узлами 1 и 2. Для упрощения рассмотрена та же система, но без учета активных сопротивлений (рис. 2).

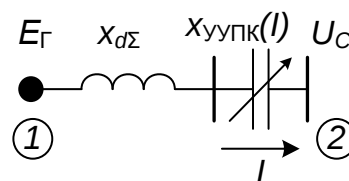


Рис. 2. Схема замещения рассматриваемой сети без учета активных сопротивлений

Значение модуля падения напряжения можно рассчитать по теореме косинусов, построив векторную диаграмму для данной сети (рис. 3):

$$|N| = \sqrt{E_{\Gamma}^2 - 2E_{\Gamma}U_C \cdot \cos \delta + U_C^2}. \quad (3)$$

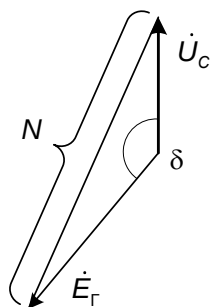


Рис. 3. Векторная диаграмма падения напряжения

Кроме того, можно определить минимальное и максимальное значения падения напряжения исходя из возможных значений взаимных углов в диапазоне от 0 до 180 (рис. 4).

Однако модуль падения напряжения также можно получить по второму закону Кирхгофа (рис. 2):

$$N(I) = I(X_{d\Sigma} - X_{уу\text{ПК}}(I)). \quad (4)$$

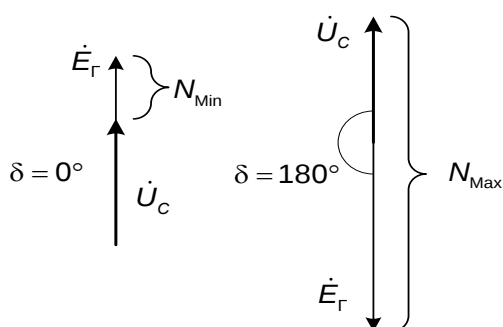


Рис. 4. Векторная диаграмма минимального и максимального падений напряжения

С помощью математических преобразований получено уравнение

$$N(I) = (I X_{d\Sigma}) - \left(I \frac{10^6}{\omega(K_{1у\text{ПК}} - K_{2у\text{ПК}} I I_6) Z_6} \right). \quad (5)$$

На рис. 5 представлены зависимости модуля напряжения от тока через УУПК для различных законов регулирования. Анализ результатов построения позволяет сделать вывод о том, что увеличение коэффициента регулирования $K_{2у\text{ПК}}$ приводит к снижению значения $|N(I)|$ не достигая значения N_{max} .

Данное явление приводит к тому, что при утяжелении режима по току в диапа-

зоне от N_{min} до N_{max} существует экстремум, при котором $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$ (рис. 5, точка а).

Данный режим соответствует началу резонансного перехода. Рассматриваемый экстремум наблюдается из-за быстрого роста вычитаемого в (5) при дальнейшем увеличении тока. Таким образом, при достижении рассматриваемой точки экстремума возникает резонансный переход, который приводит к резкому изменению электромагнитной мощности генераторов и потере устойчивости системы [7].

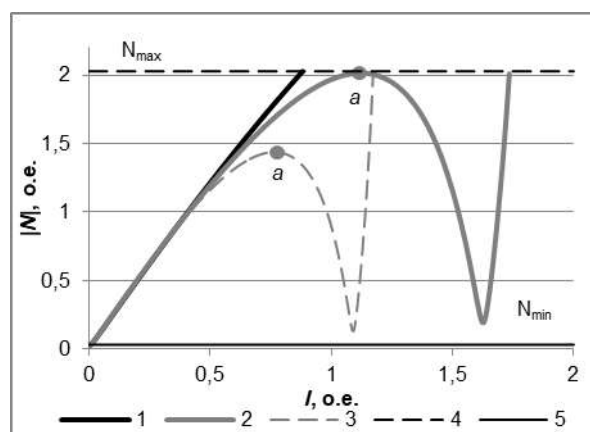


Рис. 5. Зависимость модуля падения напряжения на электропередаче от тока через УУПК для различных законов регулирования УУПК: 1 – $K_{2у\text{ПК}} = 10$; 2 – $K_{2у\text{ПК}} = 18$; 3 – $K_{2у\text{ПК}} = 31$; 4 – максимальное падение напряжения на электропередаче N_{max} ; 5 – минимальное падение напряжения на электропередаче N_{min}

Следовательно, чтобы избежать резонансного перехода и его последствий, при этом получив максимальный эффект от управляемой продольной компенсации, выбран такой закон регулирования, при котором в момент начала резонансного перехода (рис. 5, точка а) $K_{2у\text{ПК}} = 0$. Таким образом, угловая характеристика после ограничения становится традиционной, как для системы с неуправляемым УПК, и показывает увеличение предельной по статической устойчивости активной мощности. На рис. 6 представлены угловые характеристики при ограниченно-зависимой характеристике $X_{у\text{ПК}}$ для различных законов регулирования УУПК.

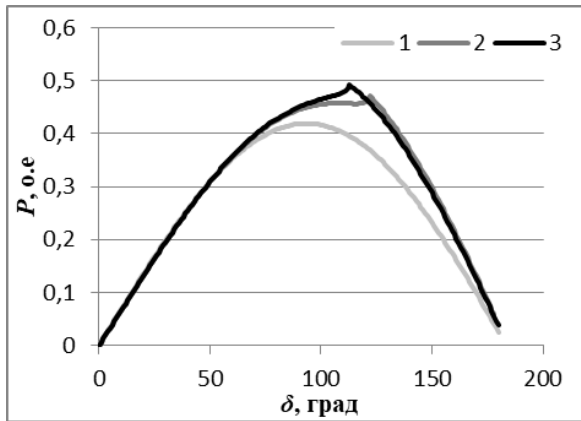


Рис. 6. Угловые характеристики при ограниченно-зависимой характеристике $X_{уупк}$ (I) для различных законов регулирования УПК: 1 – $K_{2уупк} = 10$; 2 – $K_{2уупк} = 28$; 3 – $K_{2уупк} = 30$

Результаты исследования. Для оценки статической устойчивости традиционно анализируют коэффициенты при степенях характеристического уравнения, используя различные критерии, или оценивают устойчивость по корням этого уравнения [8]. Характеристические уравнения высокого порядка достаточно затруднительно решить для получения корней. В этом случае для оценки устойчивости системы используют алгебраические и частотные критерии, связывающие корни с коэффициентами при степенях характеристического уравнения [9]. Современные вычислительные мощности позволяют анализировать статическую устойчивость с помощью вычислительного эксперимента по детальной математической модели системы путем решения системы уравнений при задании «малого» возмущения без линеаризации системы дифференциальных уравнений. По результату протекания переходного процесса формируется вывод об устойчивости энергосистемы [10].

Расчет установившихся режимов системы выполнен по математической модели с помощью оригинального программного обеспечения на языке программирования C++ [11]. Каждый конкретный режим ЭЭС имеет свою область устойчивости [12]. При фиксации степени компенсации и коэффициента усиления АРВ-ПД произведен вычислительный эксперимент по определению границы статической устойчивости. Мощность турбины кратковременно (на 0,05 с) повышается на 5 % от значения в исходном установившемся режиме. Результат протекания переходного процесса

рассматривается на изменении угла ротора δ . На рис. 7 представлены графики зависимостей для различных законов регулирования УУПК.

Анализ результатов построения показывает, что значение $K_{2уупк} = 21,7$ является границей колебательной устойчивости, так как в системе имеют место незатухающие колебания угла. Анализ зависимостей показывает, что начальный угол положения ротора генератора для различных коэффициентов $K_{2уупк}$ имеет неодинаковые значения.

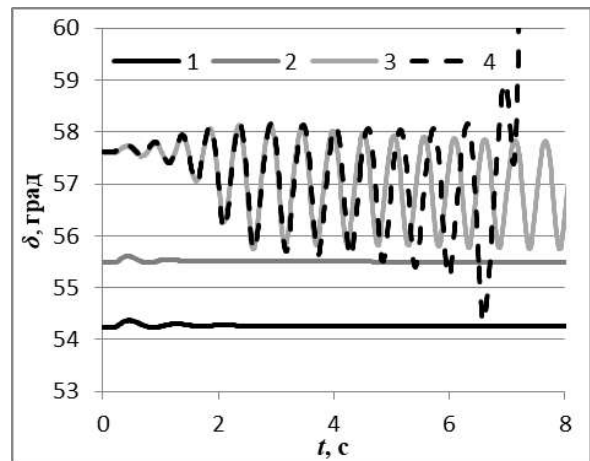


Рис. 7. Зависимости угла положения ротора δ от времени для различных коэффициентов $K_{2уупк}$: 1 – $K_{2уупк} = 0$; 2 – $K_{2уупк} = 10$; 3 – $K_{2уупк} = 21,7$; 4 – $K_{2уупк} = 21,8$

Для объяснения этого явления построены угловые характеристики активной мощности для коэффициентов регулирования $K_{2уупк} = 0$ и $K_{2уупк} = 21,7$ (рис. 8).

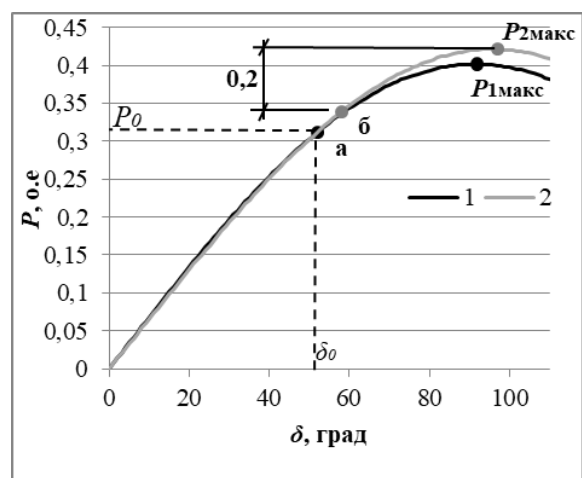


Рис. 8. Угловые характеристики для различных законов регулирования УУПК: 1 – $K_{2уупк} = 0$; 2 – $K_{2уупк} = 21,7$

При любых вариациях коэффициента регулирования $K_{2\text{УУПК}}$ исходный режим остается одинаковым и угловые характеристики имеют общую точку (δ_0, P_0) . Это позволяет сравнивать построенные величины между собой и анализировать влияние коэффициента $K_{2\text{УУПК}}$ на предел передаваемой мощности ($P_{1\text{макс}}$, $P_{2\text{макс}}$).

Однако, согласно требованиям к устойчивости энергосистем, при проведении расчетов режимов и устойчивости необходимо учитывать минимальный коэффициент запаса статической апериодической устойчивости по активной мощности, который для нормальных режимов энергосистемы составляет $K_{p,\min} = 0,2$. Следовательно, значения предельной передаваемой активной мощности с учетом коэффициента запаса сместятся из $P_{1\text{макс}}$ и $P_{2\text{макс}}$ в точки а и б соответственно (рис. 8). Каждая из этих мощностей определяется углом положения ротора δ , который является исходным для вычислительного эксперимента по определению характера протекания переходного процесса при «малом» возмущении (рис. 7).

После проведения расчетов для различных значений начальной степени компенсации и K_{0U} при изменении $K_{2\text{УУПК}}$ выявляется точка границы устойчивости. Таким образом, можно построить семейство областей устойчивости для рассматриваемой системы в плоскости коэффициентов $K_{2\text{УУПК}}$ и K_{0U} (рис. 9–12).

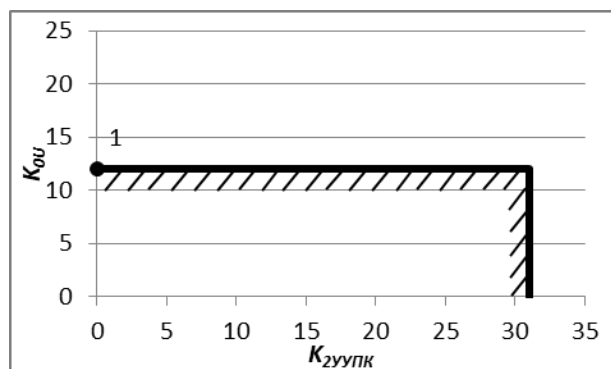


Рис. 9. Область устойчивости системы в плоскости коэффициентов $K_{2\text{УУПК}}$ и K_{0U} при электропередаче, выполненной проводом марки АС-240/32, и $X_{\text{УУПК}} = 0,155$

Результаты исследования свидетельствуют о том, что при малых начальных значениях сопротивления УУПК область устойчивости наименьшая (рис. 9). На рис. 9–12 точка 1 соответствует границе

колебательной устойчивости при отсутствии регулирования УУПК ($K_{2\text{УУПК}} = 0$).

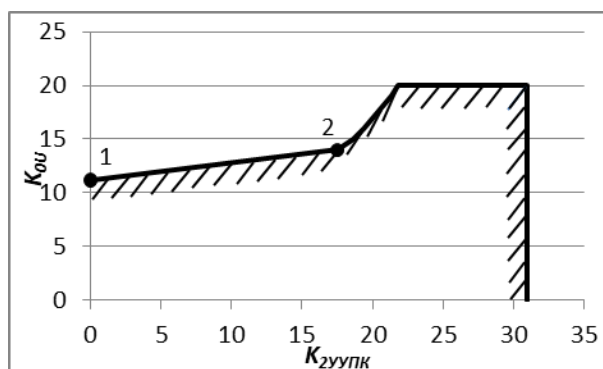


Рис. 10. Область устойчивости системы в плоскости коэффициентов $K_{2\text{УУПК}}$ и K_{0U} при электропередаче, выполненной проводом марки АС-240/32, и $X_{\text{УУПК}} = 0,233$

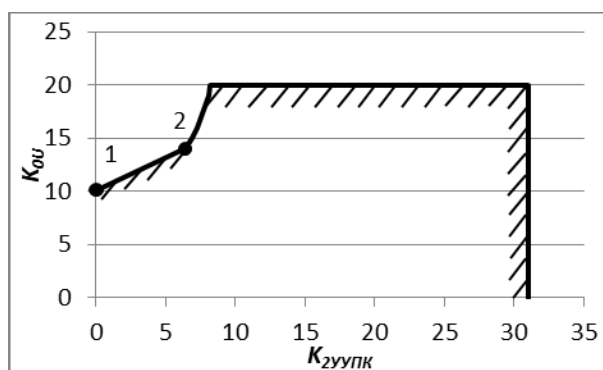


Рис. 11. Область устойчивости системы в плоскости коэффициентов $K_{2\text{УУПК}}$ и K_{0U} при электропередаче, выполненной проводом марки АС-240/32, и $X_{\text{УУПК}} = 0,337$

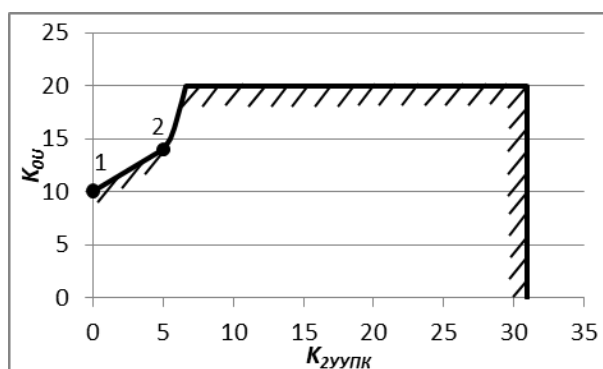


Рис. 12. Область устойчивости системы в плоскости коэффициентов $K_{2\text{УУПК}}$ и K_{0U} при электропередаче, выполненной проводом марки АС-240/32, и $X_{\text{УУПК}} = 0,362$

При увеличении начальной степени компенсации и равенстве нулю $K_{2\text{УУПК}}$ статическая колебательная устойчивость нарушается при меньших значениях ко-

коэффициента усиления K_{0U} (рис. 13). Это следует из того, что УУПК в принципе ухудшает колебательную статическую устойчивость (ведет к самовозбуждению).

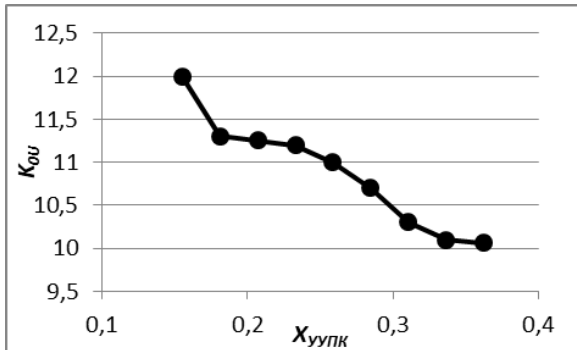


Рис. 13. Движение точки 1 при увеличении $X_{уупк}$

Анализ областей устойчивости системы (рис. 10–12) показывает, что при увеличении начальной степени компенсации при больших значениях K_{0U} область устойчивости начинает расширяться при меньшем значении $K_{2уупк}$ (точка 2 на зависимостях). Это можно объяснить, если ввести понятие $X_{уупкпред}$ – такое предельное сопротивление УУПК, при котором наблюдается граница статической колебательной устойчивости. Тогда при одинаковых $K_{2уупк}$ емкостное сопротивление УУПК достигнет $X_{уупкпред}$ быстрее при большей начальной степени компенсации (рис. 14, зависимости 1 и 2, точки исходного установившегося режима а и б соответственно).

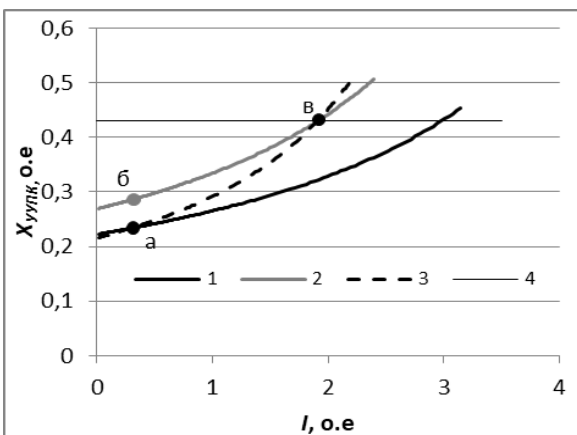


Рис. 14. Зависимости сопротивлений УУПК от тока: 1 – $X_{уупк} = 0,233$, $K_{2уупк} = 17,5$; 2 – $X_{уупк} = 0,285$, $K_{2уупк} = 17,5$; 3 – $X_{уупк} = 0,233$, $K_{2уупк} = 29$; 4 – $X_{уупкпред}$

При этом для зависимости 2 с большей исходной степенью компенсации можно найти иную зависимость с меньшей исходной степенью компенсации и таким

коэффициентом регулирования УУПК, при котором они будут иметь общую точку при $X_{уупкпред}$ (рис. 14, зависимости 2 и 3, общая точка в). При этом большая исходная степень компенсации требует меньшей крутизны характеристики для достижения точки $X_{уупкпред}$, являющейся границей статической устойчивости, и наоборот. Соответственно, данный эффект приводит к поведению точки 2, показанному на рис. 10–12: при меньшем значении исходной степени компенсации необходим больший регулирующий эффект от УУПК для достижения границы устойчивости.

На рис. 15 представлена пространственная модель области статической колебательной устойчивости в координатах K_{0U} , $K_{2уупк}$ и $X_{уупк}$. Различные сечения этой пространственной фигуры по оси $X_{уупк}$ имеют полное соответствие с рис. 9–12. Следует отметить, что выбор любых значений коэффициентов регулирования, входящих в эту трехмерную фигуру, гарантирует статическую колебательную устойчивость системы.

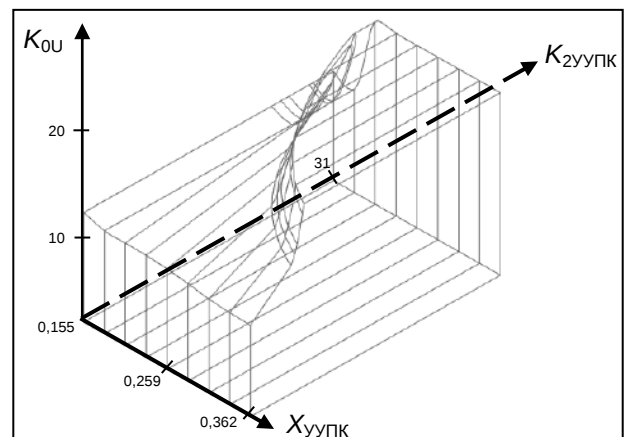


Рис. 15. Пространственная область статической колебательной устойчивости в координатах K_{0U} , $K_{2уупк}$ и $X_{уупк}$

Выводы. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. При малых сопротивлениях УУПК область устойчивости наименьшая.

2. При увеличении степени компенсации и равенстве $K_{2уупк}$ нулю статическая колебательная устойчивость нарушается при меньших значениях коэффициента усиления K_{0U} .

3. При увеличении степени компенсации при больших значениях K_{0U} область устойчивости начинает расширяться при меньшем значении $K_{2уупк}$.

4. Наибольший положительный эффект на колебательную статическую устойчивость от применения УУПК и АРВ наблюдается при высоких начальных степенях компенсации.

Список литературы

1. **Anderson P.M., Fouad A.A.** Power system control and stability, Second edition, Wiley-interscience. – USA, 2003. – 672 p.
2. **Albertos A.P., Sala A.** Multivariable control systems. – Springer, 2007. – 340 p.
3. **Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В.** О применении устройств продольной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // Энергия единой сети. – 2016. – № 6(29). – С. 26–43.
4. **Vaibhav Desai, Vivek Pandya, Anilkumar Markana.** Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation // International Journal of Engineering Research and Development (IJERD) ISSN: 2278-067X Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering (RTEECE 17th – 18th April 2015). – 2015. – P. 62–68.
5. **Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П.** Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач // Электричество. – 2013. – № 12. – С. 2–13.
6. **Using controlled electric-power lines with controlled series compensation in smart-grid networks / V.P. Golov, A.A. Martirosyan, I.A. Moskvina, D.N. Kormilitsyn** // Russian Electrical Engineering. – February 2017. – Vol. 88, Issue 2. – New York, USA: Allerton Press, 2017. – P. 81–86.
7. **Критерий аperiodической статической устойчивости электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации на линии 220 кВ / В.П. Голов, Д.Н. Кормилицин, А.В. Калущков, О.С. Суханова** // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 5. – С.13–24.
8. **Kundur P.** Power System Stability and Control. – New York: Tata McGraw-Hills, 1994.
9. **Костюк О.М.** Элементы теории устойчивости энергосистем. – Киев: Наукова думка, 1983. – 296 с.
10. **Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И.** Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1964.
11. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660842. Controlled electric power system stability / Д.Н. Кормилицин; зарег. в реестре программ для ЭВМ 28.08.18.
12. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

References

1. Anderson, P.M., Fouad, A.A. Power system control and stability. Wiley-interscience. USA, 2003. 672 p.
2. Albertos, A.P., Sala, A. Multivariable control systems. Springer, 2007. 340 p.
3. Antonov, A.V., Fokin, V.K., Tuzlukova, E.V. O primeneniі ustroystv prodol'noy kompensatsii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh Rossii [On applying longitudinal compensation devices in Russian high-voltage electric networks]. *Energiya edinoi seti*, 2016, no. 6(29), pp. 26–43.
4. Vaibhav, Desai, Vivek, Pandya, Anilkumar, Markana. Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation. International Journal of Engineering Research and Development (IJERD) ISSN: 2278-067X Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering (RTEECE 17th – 18th April 2015), 2015, pp. 62–68.
5. Shakaryan, Yu.G., Fokin, V.K., Likhachev, A.P. Ustanovivshiesya rezhimy raboty elektroenergeticheskikh sistem s setevymi ustroystvami gibkikh elektroperedach [Steady states modes of electric power systems with flexible power transmissions]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 12, pp. 2–13.
6. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A., Kormilitsyn, D.N. Using controlled electric-power lines with controlled series compensation in smart-grid networks. *Russian Electrical Engineering*, February 2017, vol. 88, issue 2, pp. 81–86.
7. Golov, V.P., Kormilitsyn, D.N., Kalutskov, A.V., Sukhanova, O.A. Kriteriy aperiodicheskoy staticheskoy ustoychivosti elektroenergeticheskoy sistemy s upravlyaemym ustroystvom prodol'noy kompensatsii na linii 220 kV [Criterion of aperiodic steady-state stability of an electric power system with a controlled series compensation device on a 220 kV line]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 5, pp. 13–24.
8. Kundur, P. Power System Stability and Control. New York: Tata McGraw-Hills, 1994.
9. Kostyuk, O.M. *Elementy teorii ustoychivosti energosistem* [Power system stability theory elements]. Kiev: Naukova dumka, 1983. 296 p.
10. Venikov, V.A., Anisimova, N.D., Dolginov, A.I. *Samovozbuzhdenie i samoraskachivanie v elektricheskikh sistemakh* [Self-excitation and self-oscillation in electric systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1964.
11. Kormilitsyn, D.N. Controlled electric power system stability. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018660842* [Certificate of Software Registration no. 2018660842], 2018.
12. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 536 p.