

УДК 621.311

Регулирование мощности шунтирующих реакторов для улучшения устойчивости энергосистемы с управляемым устройством продольной компенсации¹

Н.Е. Введенский, В.П. Голов, А.С. Казарин, Д.Н. Кормилицын, И.А. Москвин, С.Д. Никитина
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: golov@ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Сосредоточенные управляемые устройства продольной компенсации позволяют повысить предел передаваемой мощности и устойчивость сети в целом, однако результаты исследований таких ученых, как В.А. Веников, В.А. Строев, Ю.Г. Шакарян, В.К. Фокин, свидетельствуют о том, что применение данных устройств может приводить к недопустимым перенапряжениям на их выводах и колебательным нарушениям статической устойчивости. Для стабилизации уровней напряжения обычно устанавливаются шунтирующие реакторы без возможности регулирования, что отрицательно сказывается на пределе передаваемой мощности. Таким образом, необходимо оценить эффективность применения шунтирующих реакторов как в дискретном, так и в управляемом исполнении для стабилизации уровней напряжения, и их влияние на устойчивость системы.

Материалы и методы: Используются метод первого приближения А.М. Ляпунова, метод Ньютона, метод D-разбиения по одному параметру, а также критерий устойчивости П.С. Жданова.

Результаты: Дан анализ влияния дискретного и плавного регулирования мощности шунтирующих реакторов на предел передаваемой мощности. Их применение увеличивает предел до 10 %, приводит к выравниванию уровней напряжения в сети и улучшает устойчивость электроэнергетической системы.

Выводы: Выбор количества шунтирующих реакторов при дискретном регулировании, а также закона регулирования при плавном регулировании необходимо производить исходя из условия обеспечения приемлемых уровней напряжения на выводах устройства продольной компенсации, а также максимального увеличения предела передаваемой мощности при сохранении колебательной устойчивости. Результаты работы могут быть использованы при расчетах статической и динамической устойчивости систем, содержащих гибкие линии электропередачи с комплексом управляемых устройств, а также при создании систем регулирования данных устройств.

Ключевые слова: аperiodическая статическая устойчивость, колебательная статическая устойчивость, управляемые устройства продольной компенсации, области устойчивости, управляемые шунтирующие реакторы.

Regulation of shunt reactor power for improving stability of electrical power systems with a controlled series compensation device

N.E. Vvedensky, V.P. Golov, A.S. Kazarin, D.N. Kormilitsyn, I.A. Moskvina, S.D. Nikitina
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: golov@ispu.ru

Abstract

Background: Lumped controlled series compensation devices can increase the transmission limit and the stability of the network. However, the studies conducted by V.A. Venikov, V.A. Stroyev, Ju.G. Shakaryan and V.K. Fokin suggest that usage of these devices may lead to unacceptable overvoltages on series compensation output terminals and oscillatory instability. To stabilize voltage levels it is common to use unregulated shunt reactors that have a negative impact on the transmission limit. With that in mind it is necessary to evaluate voltage stabilization efficiency of the shunt reactors with discrete and smooth control and their effect on system stability.

Materials and methods: A.M. Lyapunov's first approximation method, Newton's method, one parameter D-decomposition method, and P.S. Zhdanov's stability criterion are used.

Results: The paper represents analysis of the effect of discrete and smooth power control of shunt reactors on the transmission limit. Their usage can improve this limit to 10 %, stabilize the voltage levels in the network and enhance the stability of the electrical power system.

Conclusions: The number of shunt reactors at discrete regulation and the control law at smooth regulation should ensure acceptable levels of voltage at the output terminals of the series compensation device and maximize the transmission limit, while maintaining oscillatory stability. The study results can be used in steady state and transient stability calculations of the systems containing flexible power transmission lines with controlled devices, as well as for development of control systems of such devices.

Key words: aperiodic steady-state stability, oscillatory steady-state stability, controlled series compensation devices, stability regions, controlled shunt reactors.

¹ Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГЗ №2014/41; код проекта: 2915).

Введение. Применение устройств продольной компенсации (УПК) при всех своих преимуществах по увеличению предела передаваемой мощности и устойчивости системы [1, 2] имеет недостаток в виде большого перепада напряжений на выводах УПК, что в ряде режимов приводит к недопустимым перенапряжениям. Для решения данной проблемы на выводах УПК устанавливают шунтирующие реакторы. Однако их включение в основном отрицательно сказывается на устойчивости, по сравнению с режимами работы при их отсутствии. Следовательно, необходимо исследовать, как влияет совместное применение управляемых УПК и шунтирующих реакторов (ШР) на режимы и устойчивость, по сравнению с нерегулируемой передачей, поскольку включение подобных устройств в работу перераспределяет потоки реактивной мощности по сети, что сказывается на режимах и устойчивости системы в целом.

Материалы и методы исследования.
Модель рассматриваемой электроэнергетической системы. Исследование проводилось для изолированной системы из двух электрических станций, работающих на общую нагрузку (рис. 1). Генерирующие станции номинальной мощностью 2400 МВт каждая соединены между собой двухцепной линией электропередачи 500 кВ длиной 1000 км с установленным посередине управляемым устройством продольной компенсации (УУПК). На выводах УУПК подключены ШР, причем рассмотрены 2 типа реакторов: с дискретным управлением мощностью ШР (т.е. включением и отключением групп ШР) и плавным управлением (т.е. к выводам подключаются управляемые шунтирующие реакторы (УШР)) На рис. 2 представлена схема замещения исследуемой системы [3].

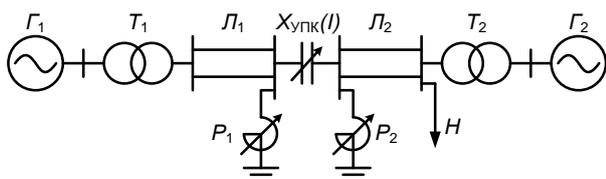


Рис. 1. Исследуемая двухмашинная электроэнергетическая система

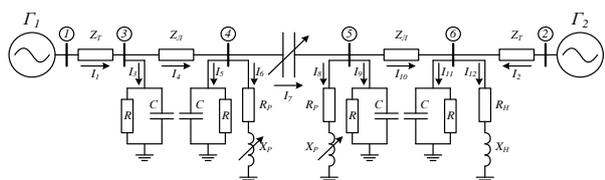


Рис. 2. Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

Регулирование в УПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) [1]:

$$X_{\text{УПК}} I = \frac{10^6}{\omega_0 K_1 - K_2 I}, \quad (1)$$

где $X_{\text{УПК}} (I)$ – сопротивление регулируемого УПК, Ом; I – ток линии, кА; K_1, K_2 – коэффициенты регулирования УПК, мкФ и мкФ/кА соответственно.

Плавное регулирование ШР осуществляется путем изменения индуктивного сопротивления в зависимости от напряжения в точке подключения ШР [4]:

$$\Delta X_{\text{УШР}} U = -K_{\text{УШР}} U - U_0, \quad (2)$$

где $\Delta X_{\text{УШР}} (U)$ – изменение сопротивления УШР, Ом; U – напряжение в точке подключения УШР, кВ; U_0 – уставка УШР по напряжению, кВ; $K_{\text{УШР}}$ – коэффициент регулирования УШР, кА^{-1} .

Для расчета установившихся, а также переходных режимов производится решение системы нелинейных алгебраических уравнений методом Ньютона в специально разработанной программе.

Результаты исследования. Дискретное регулирование. Влияние комплексного регулирования УПК и ШР на предел передаваемой мощности. На рис. 3 приведены угловые характеристики мощности генераторов при включении одной, трех и пяти групп ШР при отсутствии регулирования УПК ($K_2 = 0$). Согласно этим зависимостям, с увеличением числа включенных реакторов предел передаваемой мощности уменьшается.

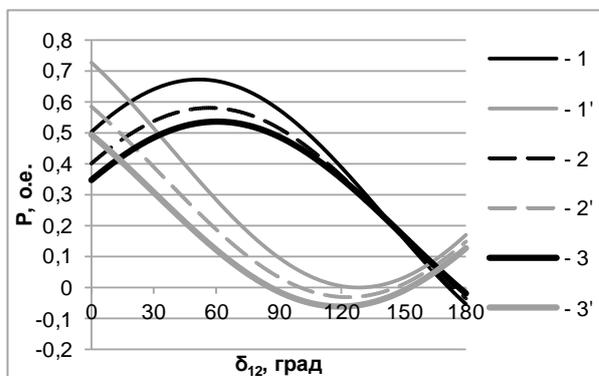


Рис. 3. Угловые характеристики активной мощности генераторов при отсутствии регулирования УПК: 1, 1' – включение по одной группе ШР на выводах УПК; 2, 2' – включение по три группы ШР; 3, 3' – включение по пять групп ШР

Однако необходимо учитывать уровни напряжения на выводах УПК при оценке эффективности применения данных устройств. На рис. 4 приведены угловые характеристики напряжения на выводах нерегулируемого УПК при тех же условиях, что и на рис. 3. Анализ показывает, что по мере увеличения числа включенных групп ШР уровни напряжения на шинах УПК выравниваются.

Данные результаты справедливы и при других значениях коэффициента регулирования K_2 . Таким образом, выбор количества реак-

торов при фиксированном значении коэффициента K_2 должен производиться с учетом двух ограничений:

- 1) максимальное значение предела передаваемой мощности;
- 2) приемлемые уровни напряжения на выводах УУПК.

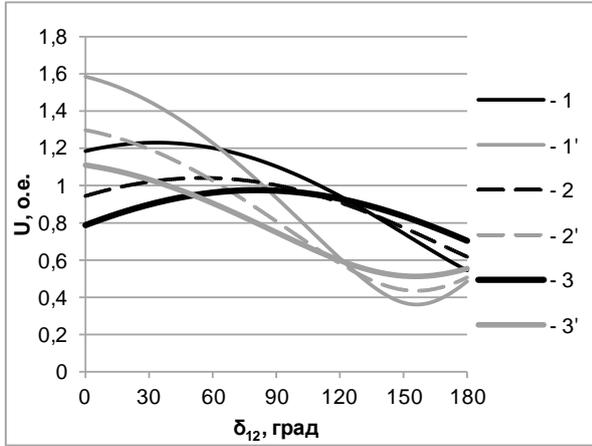


Рис. 4. Угловые характеристики напряжения на выводах УПК без его регулирования: 1, 1' – включение по одной группе ШР на выводах УПК; 2, 2' – включение по три группы ШР; 3, 3' – включение по пять групп ШР

С увеличением коэффициента K_2 (рис. 5) при одинаковом числе групп ШР происходит увеличение предела передаваемой мощности. Однако при небольшом увеличении предела передаваемой мощности уровни напряжения на выводах УПК увеличиваются значительно (рис. 6).

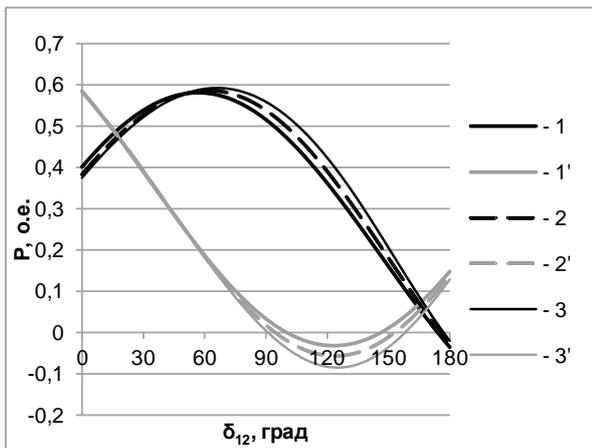


Рис. 5. Угловые характеристики мощности генераторов при включении по три группы ШР: 1, 1' – $K_2 = 0$; 2, 2' – $K_2 = 4$; 3, 3' – $K_2 = 6$

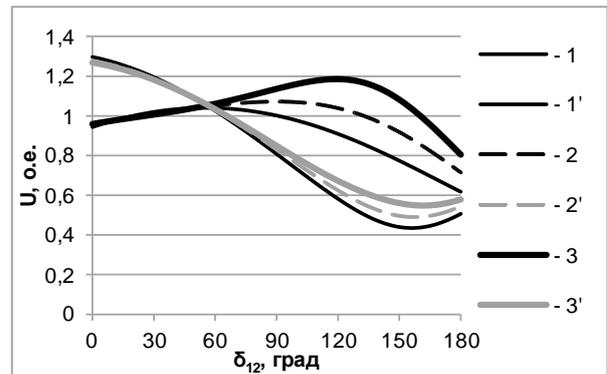


Рис. 6. Угловые характеристики напряжения на выводах УПК при включении по три группы: 1, 1' – $K_2 = 0$; 2, 2' – $K_2 = 4$; 3, 3' – $K_2 = 6$

Таким образом, при выборе числа включенных групп ШР необходимо учитывать:

- исходную степень компенсации;
- коэффициент регулирования K_2 УУПК;
- допустимость уровней напряжения на выводах УПК,
- наличие максимального эффекта на предел передаваемой мощности.

Статическая аperiodическая устойчивость. Оценка предела аperiodической статической устойчивости производится по упрощенной математической модели:

$$\begin{cases} T_{J1} p^2 \delta_1 - D_1 p \delta_{12} = P_{T1} - P'_{\Sigma 1}, \\ T_{J2} p^2 \delta_2 + D_2 p \delta_{12} = P_{T2} - P'_{\Sigma 2}, \\ T_{d01} p E'_{q1} + E_{q1} = E_{qe1}, \\ T_{d02} p E'_{q2} + E_{q2} = E_{qe2}, \\ I = f(\delta_{12}, X_{УПК}, E_{q1}, E_{q2}), \\ X_{УПК} = f(I, K_2). \end{cases} \quad (3)$$

Аperiodическая статическая устойчивость любой сложной электроэнергетической системы определяется лишь знаком свободного члена характеристического уравнения, который для исследуемой системы с регулируемым УПК имеет следующий вид [1]:

$$\begin{aligned} a_2 = & \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \right) - \\ & - \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \right) \frac{\partial I}{\partial X_{УПК}} \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} + \\ & + \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial X_{УПК}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{УПК}} \right) \frac{\partial I}{\partial \delta_{12}} \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}. \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 7 представлены зависимости значения свободного члена характеристического уравнения при включении 1, 3 и 5 групп ШР на выводах УПК и отсутствии регулирования УПК. Анализ зависимостей показал, что число включенных групп ШР не влияет на предел устойчивости, так как смена знака свободного члена

происходит при одном и том же значении взаимного угла δ_{12} .

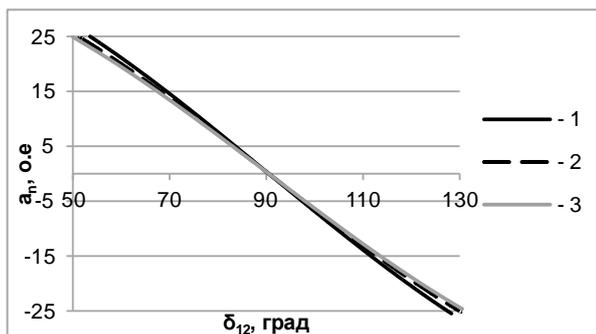


Рис. 7. Зависимость свободного члена ХУ для нерегулируемого УПК: 1 – включение по одной группе ШР на выводах УПК; 2 – включение по три группы ШР; 3 – включение по пять групп ШР

Если же УПК является управляемым, то увеличение числа включенных реакторов ведет к увеличению предела по статической устойчивости (рис. 8).

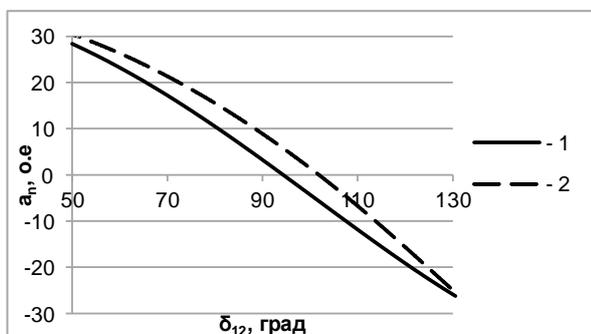


Рис. 8. Зависимость свободного члена характеристического уравнения для регулируемого УПК ($K_2 = 4$): 1 – включение по три группы ШР на выводах УПК; 2 – включение по пять групп ШР

Однако необходимо учитывать, что нарушение данного вида устойчивости наблюдается при углах, которые в эксплуатации не применяются. Таким образом, с точки зрения аperiodической устойчивости возможно использование любого коэффициента регулирования K_2 и числа реакторов, поскольку в установившихся режимах углы в 90° и более на практике недостижимы и возможны только при математическом моделировании.

Статическая колебательная устойчивость. Регулирование сопротивления УПК по закону (1) может приводить к колебательному нарушению устойчивости [5]. Поэтому необходимо отметить, что выводы, сделанные относительно аperiodической устойчивости, справедливы только при отсутствии колебательной неустойчивости в системе [6]. Поэтому необходимо произвести оценку допустимости применения коэффициентов, использованных выше.

Для анализа колебательной статической устойчивости также используется упрощенная математическая модель исследуемой ЭЭС. В полученном характеристическом уравнении присутствует коэффициент регулирования УПК K_2 .

Используя метод D-разбиения по одному параметру, строятся области устойчивости для исследуемой системы. Для построения границы D-разбиения коэффициент K_2 записывается в следующем виде [7]:

$$\dot{K}_2 = K_2(\omega) + jb(\omega). \quad (5)$$

Полином $jb(\omega)$, входящий в уравнение, непосредственно влияет на форму границы D-разбиения и зависит как от конфигурации исследуемой системы, так и от исходного установившегося режима.

На рис. 9 представлены области устойчивости исследуемой ЭЭС для регулируемого УПК и при различном количестве групп шунтирующих реакторов.

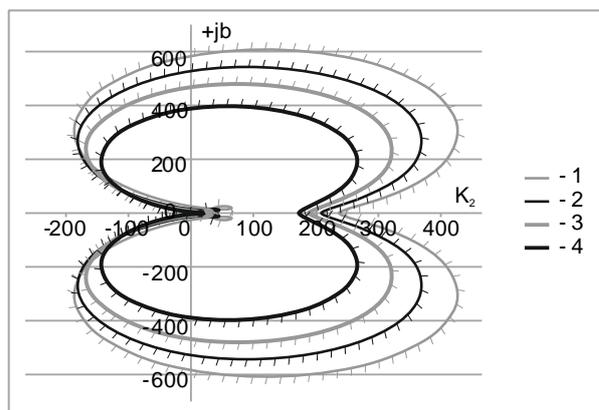


Рис. 9. Области устойчивости регулируемого УПК: 1 – включение по одной группе ШР на выводах УПК; 2 – включение по две группы ШР; 3 – включение по три группы ШР; 4 – включение по пять групп ШР

Следует отметить, что интерес представляет только зона положительных действительных значений, так как критерием сохранения колебательной статической устойчивости является принадлежность коэффициента K_2 оси действительных чисел [8]. Соответственно, на рис. 10 для большей наглядности представлены те же зависимости, но с увеличенным масштабом интересующего диапазона.

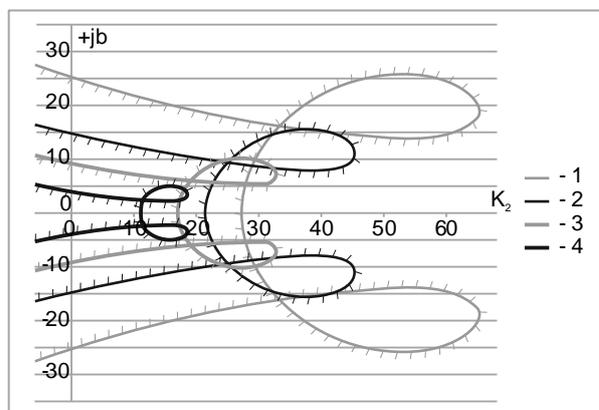


Рис. 10. Области устойчивости регулируемого УПК: 1 – включение по одной группе ШР на выводах УПК; 2 – включение по две группы ШР; 3 – включение по три группы ШР; 4 – включение по пять групп ШР (увеличенный масштаб)

Анализ областей устойчивости, представленных на рис. 9, 10, показывает, что увеличение числа включенных в работу групп ШР отрицательно сказывается на диапазоне допустимого изменения коэффициента регулирования УПК K_2 . Однако при передаче мощности, близкой к натуральной или превосходящей ее, необходимость в большом количестве реакторов отпадает из-за увеличения потерь реактивной мощности в линии, что позволяет дополнительно увеличить диапазон допустимого значения коэффициента.

Применительно к исследуемой системе, все используемые коэффициенты K_2 с запасом обеспечивают системе колебательную статическую устойчивость.

Плавное регулирование. Влияние комплексного регулирования УУПК и УШР на предел передаваемой мощности. Для выяснения влияния комплексного управления на предел передаваемой мощности исследуемой системы все результаты расчетов сравнивались с режимом с постоянной степенью компенсации, что осуществлялось введением коэффициента $K_2 = 0$ в уравнение для регулируемого УПК (1), и с постоянным индуктивным сопротивлением реакторов, что обеспечивалось введением $K_{УШР} = 0$ в уравнение для закона регулирования УШР (2).

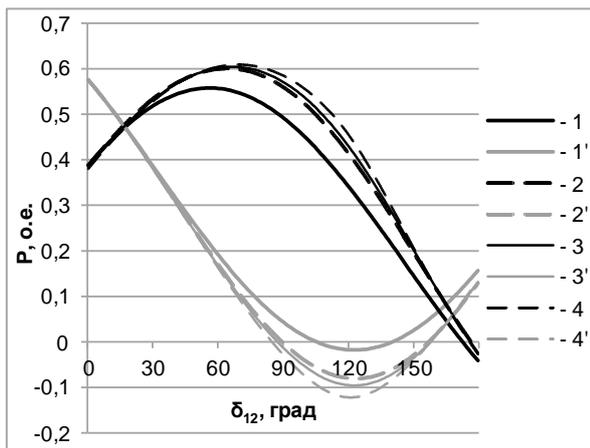


Рис. 11. Угловые характеристики активной мощности исследуемой системы: 1, 1' – $K_2 = 0$; $K_{УШР} = 0$; 2, 2' – $K_2 = 0$; $K_{УШР} = 4$; 3, 3' – $K_2 = 4$; $K_{УШР} = 0$; 4, 4' – $K_2 = 4$; $K_{УШР} = 4$

На рис. 11 приведены угловые характеристики мощности для различных видов управления. Угловые характеристики $P_1(\delta_{12})$ и $P_2(\delta_{12})$ показывают увеличение предела передаваемой мощности по сравнению с нерегулируемой передачей.

Статическая аперiodическая устойчивость. При оценке устойчивости при плавном регулировании мощности ШР необходимо учесть их влияние на переходные процессы при малых отклонениях. Исходя из этого уравнения электромеханического переходного процесса исследуемой системы из двух генераторных станций с управляемыми ШР и УПК в простейшем представлении имеют следующий вид:

$$\begin{cases} T_{J1} p^2 \delta_1 - D_1 p \delta_{12} = P_{T1} - P_{Э1}, \\ T_{J2} p^2 \delta_2 + D_2 p \delta_{12} = P_{T2} - P_{Э2}, \\ I_4 = f(\delta_{12}, X_{УПК}, x_{p1}, x_{p2}), \\ X_{УПК} = f(I_4, K_2), \\ U_4 = f(\delta_{12}, x_{p1}), \\ x_{p1} = f(U_4, K_{p1}), \\ U_5 = f(\delta_{12}, x_{p2}), \\ x_{p2} = f(U_5, K_{p2}). \end{cases} \quad (6)$$

Поскольку в данной системе имеются три коэффициента регулирования, выражение для свободного члена имеет значительный объем и его вид не приводится. Однако рассматривая выражения для свободного члена как при плавном, так и дискретном регулировании, можно сделать вывод об их адекватности. В случае отсутствия регулирования частные производные $\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}$, $\frac{\partial x_{p1}}{\partial U_4}$ и $\frac{\partial x_{p2}}{\partial U_5}$ обращаются в ноль. Что в свою очередь приводит к тому, что данные выражения приобретают следующий вид:

$$a_2 = \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}}. \quad (7)$$

Исходя из данного уравнения получаем известный критерий устойчивости для двухмашинной системы [9]:

$$\frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} > 0. \quad (8)$$

На рис. 12 приведены кривые изменения свободного члена характеристического уравнения рассматриваемой системы, причем они построены только для характеристик, дающих максимальный запас по пределу передаваемой мощности. Построены кривые соответственно для системы без регулирования УПК и ШР ($K_2 = 0$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$), для системы с регулированием УПК и с нерегулируемыми шунтирующими реакторами ($K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$), для системы с нерегулируемым УПК и УШР ($K_2 = 0$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 4$) и для системы с комплексным управлением УУПК и УШР ($K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 4$).

Комплексное управление устройством продольной компенсации и управляемыми шунтирующими реакторами дает наибольшее увеличение запаса по критерию аперiodической статической устойчивости ввиду того, что предельные режимы (переход значения свободного члена характеристического уравнения через 0) наблюдаются при значениях угла δ_{12} , больших более чем на 10° по сравнению с предельным углом для нерегулируемой передачи.

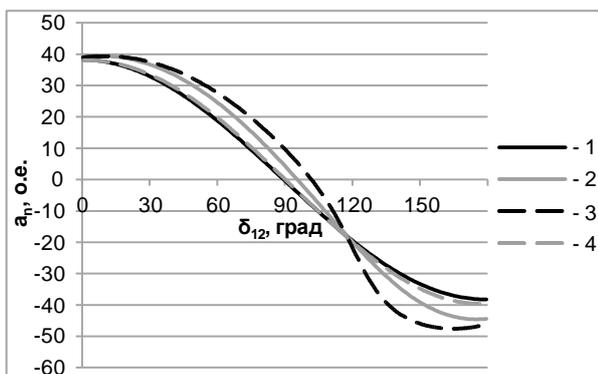


Рис. 12. Кривые изменения значений свободного члена a_n характеристического уравнения рассматриваемой системы: 1 – $K_2 = 0$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$; 2 – $K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$; 3 – $K_2 = 0$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 4$; 4 – $K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 4$

Статическая колебательная устойчивость. Анализ колебательной устойчивости при наличии плавного регулирования затруднен, поскольку для метода D-разбиения необходимо, чтобы параметры были линейно независимы. В нашем случае параметры зависят нелинейно и характеристическое уравнение невозможно привести к виду, подходящему для построения однозначной области D-разбиения.

Динамическая устойчивость. Для анализа динамической устойчивости рассмотрено «большое» возмущение в виде наброса мощности на генераторы станции 1. На рис. 13–15 показаны зависимости изменения взаимного угла δ_{12} , напряжений на «левом» U_4 и «правом» U_5 выводе УУПК соответственно. Для наглядности сопоставления результатов данные зависимости построены как для нерегулируемой передачи (кривые 1), так и для наличия только управляемого УПК (кривые 2), а также при совместном регулировании УУПК и УШР (кривые 3).

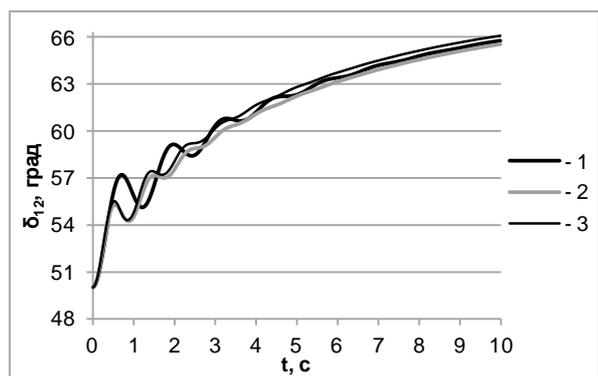


Рис. 13. Кривые изменения взаимного угла δ_{12} при изменении мощностей турбин: 1 – $K_2 = 0$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$; 2 – $K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$; 3 – $K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 4$

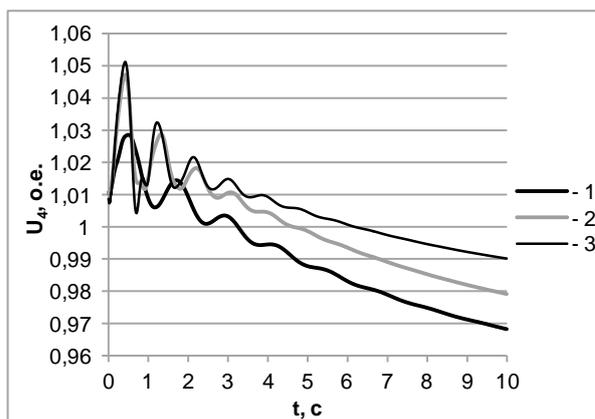


Рис. 14. Кривые изменения напряжения на «левом» выводе УУПК U_4 при изменении мощностей турбин: 1 – $K_2 = 0$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$; 2 – $K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$; 3 – $K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 4$

Анализ изменения взаимного угла между векторами ЭДС генераторов в переходном режиме показал существенное влияние на переходный процесс наличия УУПК и УШР. Особенно очевидным положительное влияние регулируемого УПК и УШР становится в первом цикле качаний, о чем можно судить по величине вылета взаимного угла, которая уменьшается по сравнению с использованием только УУПК или нерегулируемого УПК.

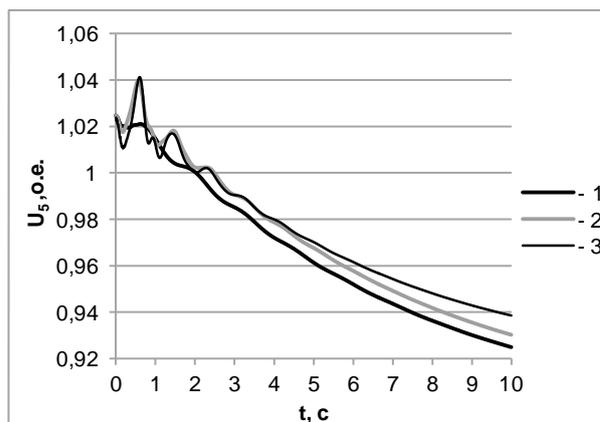


Рис. 15. Кривые изменения напряжения на «правом» выводе УУПК U_5 при изменении мощностей турбин: 1 – $K_2 = 0$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$; 2 – $K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 0$; 3 – $K_2 = 4$ и $K_{УШР1} = K_{УШР2} = 4$

Анализ графиков (рис. 13) позволяет сделать вывод, что влияние УУПК совместно с УШР дает незначительный, но все же отрицательный эффект, о чем можно судить по величине значения взаимного угла в новом установившемся режиме, которая несколько увеличивается с ростом коэффициента $K_{УШР}$, в то время как колебания взаимного угла затухают с той же скоростью независимо от $K_{УШР}$.

На рис. 14, 15 приведены графики изменения напряжений на выводах УПК в переходном процессе при тех же коэффициентах закона регулирования УПК и УШР. Очевидно, что при совместном использовании УУПК и УШР колебания напряжений на выводах УПК, как и взаимный

угол между векторами ЭДС генераторов да и другие режимные параметры системы, затухают быстрее, однако в первом цикле качаний всплеск напряжения более ярко выражен по сравнению с использованием только УУПК или нерегулируемого УПК. Стоит отметить, что совместное использование УУПК и УШР меньше «просаживает» напряжение после возмущения по сравнению с другими случаями.

Выводы. Из проведенного анализа следует, что совместное применение УУПК и ШР позволяет улучшить следующие показатели устойчивости электроэнергетической системы, по сравнению с нерегулируемой передачей (если коэффициент K_2 выбран из условия отсутствия нарушения колебательной устойчивости):

- увеличение предела передаваемой мощности;
- выравнивание уровней напряжения на выводах УУПК;
- снижение перепада напряжения на выводах УУПК при передаче по линии малого значения мощности.

Совместное применение УУПК и УШР позволяет достичь еще большего эффекта по всем вышеприведенным пунктам, а также положительно сказывается на качестве переходного процесса при «большом» возмущении, по сравнению с нерегулируемой передачей.

Список литературы

1. **Устойчивость** электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, А.А. Виноградова // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 5. – С. 26–31.
2. **Desai V., Pandya V., Markana A.** Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation. International Journal of Engineering Research and Development // Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering, 2015, pp. 62–68.
3. **Фокин В.К.** Повышение выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС с помощью емкостной компенсации на линии СШ ГЭС – «Новокузнецкая», «Кузбасская» // Энергия единой сети. – 2013. – № 2 (7). – С. 66–73.
4. **Саженов А.В.** Статические характеристики электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами // Электричество. – 2006. – № 3. – С. 17–21.
5. **Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И.** Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1964.

Введенский Никита Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант кафедры электрических систем,
e-mail: nikvveden@gmail.com

Vvedensky Nikita Evgenyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Master Course Student of Electrical Power Systems Department,
e-mail: nikvveden@gmail.com

Голов Валерий Павлович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,
e-mail: golov@ispu.ru

6. **Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А.** Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. **Голов В.П., Москвин И.А.** Выбор характеристик регулируемого устройства продольной компенсации по условию обеспечения колебательной статической устойчивости // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 5. – С. 21–26.
8. **Электрические системы.** Т. 1. Математические задачи электроэнергетики / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.
9. **Костюк О.М.** Элементы теории устойчивости энергосистем. – Киев : Наукова думка, 1983. – 296 с.

References

1. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvin, I.A., Vinogradova, A.A. Ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy iz dvukh elektricheskikh stantsiy s reguliruemoy prodol'noy kompensatsiyey [Stability of electrical power engineering system consisting of two electrical power stations with controlled series compensation]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 5, pp. 26–31.
2. Desai, V., Pandya, V., Markana, A. Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation. International Journal of Engineering Research and Development. Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering, 2015, pp. 62–68.
3. Fokin, V.K. Povyschenie vydachi moshchnosti Sayano-Shushenskoy GES s pomoshch'yu emkostnoy kompensatsii na linii SSh GES – «Novokuznetskaya», «Kuzbasskaya» [Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station power output increase by means of capacitor-compensated transmission line «Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station – Novokuznetskaya, Kuzbasskaya»]. *Energiya edinoj seti*, 2013, no. 2 (7), pp. 66–73.
4. Sazhenkov, A.V. Sticheskie kharakteristiki elektroperedachi s upravlyaemyimi shuntiruyushchimi reaktorami [Steady state characteristics of electrical power transmission system with controlled shunt reactors]. *Elektrichestvo*, 2006, no. 3, pp. 17–21.
5. Venikov, V.A., Anisimova, N.D., Dolginov, A.I. *Samovozbuzhdenie i samoraskachivanie v elektricheskikh sistemakh* [Self-excitation and cumulative hunting in electric systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1964.
6. Gurevich, Yu.E., Libova, L.E., Okin, A.A. *Raschety ustoychivosti i protivoavariynoy avtomatiki v energosistemakh* [Computation of stability and emergency control in power systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1990.
7. Golov, V.P., Moskvin, I.A. Vybor kharakteristik reguliruemogo ustroystva prodol'noy kompensatsii po usloviyu obespecheniya kolebatel'noy staticheskoy ustoychivosti [Selection of controlled series capacitor characteristics ensuring oscillatory steady state stability]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 5, pp. 21–26.
8. Venikova, V.A. *Elektricheskie sistemy. T. 1. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki* [Electrical systems. Vol. 1. Mathematical problems of electrical power industry]. Moscow, Vysshaya shkola, 1970. 336 p.
9. Kostyuk, O.M. *Elementy teorii ustoychivosti energosistem* [Elements of power system stability theory]. Kiev: Naukova dumka, 1983. 296 p.

Golov Valery Pavlovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering, Associate Professor of Electrical Power Systems Department,
e-mail: golov@ispu.ru

Казарин Артем Станиславович,
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант кафедры электрических систем,
e-mail: artkazar1994@gmail.com

Kazarin Artem Stanislavovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Master Course student of Electrical Power Systems Department,
e-mail: artkazar1994@gmail.com

Кормилицын Дмитрий Николаевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электрических систем,
e-mail: dnk@es.ispu.ru

Kormilitsyn Dmitry Nikolayevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
postgraduate student of Electrical Power Systems Department,
e-mail: dnk@es.ispu.ru

Никитина Светлана Дмитриевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант кафедры электрических систем,
e-mail: Sv-Nikitina.ISPU@yandex.ru

Nikitina Svetlana Dmitrievna,
Ivanovo State Power Engineering University,
Master Course student of Electrical Power Systems Department,
e-mail: Sv-Nikitina.ISPU@yandex.ru

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

Moskvin Ilya Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering, Associate Professor of Electrical Power Systems Department,
e-mail: moskvin@es.ispu.ru