

УДК 621.311

Выбор характеристик регулируемого устройства продольной компенсации по условию обеспечения колебательной статической устойчивости

В.П. Голов, И.А. Москвин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: golov@ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Применение продольной емкостной компенсации на линиях дальних электропередач повышает опасность возникновения колебательного нарушения устойчивости в системах, содержащих такие элементы. Например, увеличение степени продольной емкостной компенсации может вызвать самораскачивание или самовозбуждение, а также привести к совместному их появлению. Кроме того, возрастающая характеристика емкостного сопротивления в устройстве продольной регулируемой компенсации может также приводить к подобным нежелательным явлениям. В связи с этим целесообразно проанализировать колебательную статическую устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации, а также получить методику определения областей устойчивости исследуемой системы в целях выявления возможного диапазона варьирования параметров регулирования характеристики устройства продольной компенсации и обеспечения устойчивости.

Материалы и методы: Использованы метод первого приближения А.М. Ляпунова и метод D-разбиения по одному параметру.

Результаты: На основании результатов исследования предложена методика получения параметров регулирования устройства продольной компенсации, при которых наблюдается положительный эффект от данного устройства на исследуемую электроэнергетическую систему. Определены диапазоны изменения параметров регулирования устройства продольной компенсации для различных режимов.

Выводы: Предложенная методика получения возможных параметров регулирования УПК позволяет сохранить положительный эффект от данного устройства на исследуемую ЭЭС и нивелировать отрицательное влияние на режим, т.е. отстроится от колебательного нарушения устойчивости ЭЭС, вызванного законом регулирования УПК.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, дальние линии электропередачи сверхвысокого напряжения, регулируемые устройства продольной компенсации, колебательная статическая устойчивость, области устойчивости.

Selection of controlled series capacitor characteristics ensuring oscillatory steady state stability

V.P. Golov, I.A. Moskvina
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: golov@ispu.ru

Abstract

Background: Using the series capacitance technology in long-distance power transmission lines can lead to electrical power system oscillatory instability. For example, increasing the series capacitance value may result in self-excitation or cumulative hunting, or a combination of the two. The same effect can be produced by the rising capacitive resistance characteristic of controlled series capacitors. Hence, it is reasonable to study the oscillatory steady state stability of an electrical power system with an interconnection, consisting of controlled series capacitors, and to develop a method of stability region determination in the system under study in order to find the possible variation range of regulation parameters of series capacitor characteristics and to ensure stability.

Materials and methods: A.M. Lyapunov's first approximation method and one parameter D-decomposition method were used.

Results: Based on the research results, the authors have developed a method of determining the series capacitor control parameters ensuring a positive effect of such devices on the electrical power system under study. They have also determined the regulation parameter variation ranges for series capacitors in various operating modes.

Conclusions: The suggested method of obtaining possible regulation parameters of the series capacitor maintains the positive effect produced by the device on the electrical power system under study and levels the negative influence on the mode, i.e. prevents the oscillatory instability caused by the regulation characteristic itself.

Key words: electrical power system, long-distance ultrahigh voltage power transmission lines, controlled series capacitors, oscillatory steady state stability, stability regions.

Применение регулируемой продольной компенсации на дальних линиях электропередачи сверхвысокого напряжения позволяет увеличивать пропускную способность таких

линий, положительно влияет на статическую апериодическую и динамическую устойчивость электроэнергетической системы. Однако с увеличением степени компенсации подобный

закон регулирования устройства продольной компенсации (УПК) может приводить к колебательному нарушению устойчивости [1].

Многие зарубежные исследования в области управляемой продольной компенсации посвящены борьбе с так называемым субсинхронным резонансом, при котором нарастающие колебания вала турбоагрегата могут привести к его повреждению [2–4]. Это явление происходит в сетях со степенью компенсации более 50 %. В отечественной практике подобного рода нарушения статической устойчивости принято называть самораскачиванием. Следует отметить, что применение продольной емкостной компенсации на линиях дальних электропередач повышает опасность возникновения самораскачивания машин в системах, содержащих такие элементы. Кроме того, увеличение степени продольной емкостной компенсации может вызвать совместное появление самораскачивания и самовозбуждения [5].

Ранее [6] было предложено следующее выражение функциональной зависимости сопротивления управляемой емкости от тока:

$$X_{\text{УПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0(K_1 - K_2 \cdot I \cdot I_0)Z_0}, \quad (1)$$

где: I – ток через УПК, о.е.; $X_{\text{УПК}}(I)$ – сопротивление УПК, о.е.; K_1, K_2 – коэффициенты, характеризующие зависимость $X_{\text{УПК}}(I)$.

Данная функциональная зависимость может быть реализована с помощью так называемой «резонансной» схемы на основе элементов силовой электроники (управляемая тиристорно-реакторная группа), в которой осуществляется плавное регулирование емкостного сопротивления в устройстве продольной компенсации [7].

Известно положительное влияние подобного закона регулирования на статическую аperiodическую и динамическую устойчивость исследуемой электроэнергетической системы (рис. 1), а также то, что использование данной характеристики не приводит к нарушению колебательной статической устойчивости в диапазоне возможных рабочих режимов при степенях компенсации, применяемых в практике эксплуатации ЭЭС [1, 8, 9].

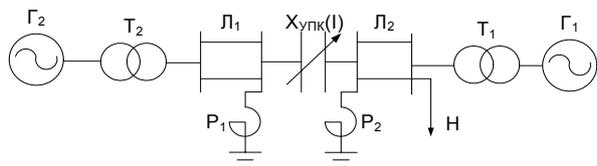


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

Исследуемая электрическая система состоит из двух электростанций, представленных эквивалентными генераторами, работающих на общую нагрузку и связанных линией электропередачи, имеющей регулируемое УПК. Поскольку в данном исследовании рассматри-

вается возрастающая характеристика емкостного сопротивления УПК от тока линии, что само по себе способно усложнить вопросы, связанные с колебательной неустойчивостью, следовательно, этот вопрос становится еще более важным и требующим детального рассмотрения. Исходя из этого, целесообразно проанализировать колебательную статическую устойчивость ЭЭС, состоящей из двух электрических станций с регулируемым в функции тока УПК, а также получить методику определения областей устойчивости исследуемой электроэнергетической системы по параметру коэффициента регулирования УПК.

Вычислительный эксперимент позволяет точно определять диапазон изменения параметров регулирования УПК, которые не приводят к нарушению устойчивости исследуемой ЭЭС. Однако этот способ является достаточно трудоемким и требует значительных временных затрат. В связи с этим необходима методика, позволяющая достаточно просто определять возможные диапазоны варьирования параметров регулирования УПК, не приводящие к колебательным нарушениям устойчивости. Другими словами, необходим метод получения возможных значений K_2 в выражении (1), при которых наблюдается положительный эффект от регулируемого УПК для исследуемой ЭЭС, а именно: увеличение предела передаваемой мощности; улучшение аperiodической статической и динамической устойчивости; отсутствие отрицательного влияния на режим, т.е. не наблюдается колебательного нарушения устойчивости ЭЭС при рассматриваемом регулируемом УПК.

Для получения вышеуказанной методики сформирована упрощенная математическая модель исследуемой ЭЭС на основе полного математического описания исследуемой системы [1]. Для этого записаны уравнения электромеханического переходного процесса для исследуемой системы из двух электрических станций с регулируемым УПК с учетом электромагнитных переходных процессов в обмотках возбуждения синхронных генераторов:

$$\begin{cases} T_{J1}p^2\delta_1 - D_1p\delta_{21} = P_{T1} - P_{Э1}, \\ T_{J2}p^2\delta_2 + D_2p\delta_{21} = P_{T2} - P_{Э2}, \\ T_{d01}pE_{q1} + E_{q1} = E_{qe1}, \\ T_{d02}pE_{q2} + E_{q2} = E_{qe2}, \\ I = f(\delta_{21}, X_{\text{УПК}}, E_{q1}, E_{q2}), \\ X_{\text{УПК}} = f(I). \end{cases} \quad (2)$$

После линеаризации и преобразований система примет следующий вид:

$$\begin{cases}
 p^2 \Delta \delta_{21} + p \left(\frac{D_2}{T_{J2}} + \frac{D_1}{T_{J1}} \right) \Delta \delta_{21} + \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{21}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial \delta_{21}} \right) \Delta \delta_{21} + \\
 + \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q1}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial E_{q1}} \right) \Delta E_{q1} + \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial E_{q2}} \right) \Delta E_{q2} + \\
 + \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{УПК}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial X_{УПК}} \right) \Delta X_{УПК} = 0, \\
 \Delta E_{q1} + T_{d1} p \Delta E_{q1}' = 0, \\
 \Delta E_{q2} + T_{d2} p \Delta E_{q2}' = 0, \\
 \Delta E_{q1}' = \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + \frac{\partial E_{q1}'}{\partial \delta_{21}} \Delta \delta_{21} + \frac{\partial E_{q1}'}{\partial X_{УПК}} \Delta X_{УПК}, \\
 \Delta E_{q2}' = \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + \frac{\partial E_{q2}'}{\partial \delta_{21}} \Delta \delta_{21} + \frac{\partial E_{q2}'}{\partial X_{УПК}} \Delta X_{УПК}, \\
 \Delta I = \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \Delta E_{q1} + \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \Delta E_{q2} + \frac{\partial I}{\partial \delta_{21}} \Delta \delta_{21} + \frac{\partial I}{\partial X_{УПК}} \Delta X_{УПК}, \\
 \Delta X_{УПК} = \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} \Delta I,
 \end{cases} \quad (3)$$

Характеристический определитель после понижения порядка имеет вид

$$D(p) = \begin{vmatrix}
 b & c & d & e \\
 \frac{\partial E_{q1}'}{\partial \delta_{21}} T_{d1} p & \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q1}} T_{d1} p + 1 & \frac{\partial E_{q1}'}{\partial E_{q2}} T_{d1} p & \frac{\partial E_{q1}'}{\partial X_{УПК}} T_{d1} p \\
 \frac{\partial E_{q2}'}{\partial \delta_{21}} T_{d2} p & \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q1}} T_{d2} p & \frac{\partial E_{q2}'}{\partial E_{q2}} T_{d2} p + 1 & \frac{\partial E_{q2}'}{\partial X_{УПК}} T_{d2} p \\
 \frac{\partial I}{\partial \delta_{21}} \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} & \frac{\partial I}{\partial E_{q1}} \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} & \frac{\partial I}{\partial E_{q2}} \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} & \left(\frac{\partial I}{\partial X_{УПК}} \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} - 1 \right)
 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где: $b = p^2 + p \left(\frac{D_2}{T_{J2}} + \frac{D_1}{T_{J1}} \right) + \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{21}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial \delta_{21}} \right);$

$$c = \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q1}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial E_{q1}} \right);$$

$$d = \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial E_{q2}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial E_{q2}} \right);$$

$$e = \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{УПК}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial X_{УПК}} \right).$$

Раскрыв его, получим характеристическое уравнение четвертого порядка:

$$D(p) = a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4, \quad (5)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты характеристического уравнения, свободный член которого определяется следующим образом:

$$a_4 = \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{21}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial \delta_{21}} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial X_{УПК}} \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} - 1 \right) - \frac{\partial I}{\partial \delta_{21}} \frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} \left(\frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial X_{УПК}} - \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1'}{\partial X_{УПК}} \right). \quad (6)$$

Необходимо определить значения всех частных производных, входящих в выражения коэффициентов характеристического уравнения (5), кроме значения $\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}$, которое непосредственно включает в себя параметр регулирования УПК K_2 , определяющий крутизну

зависимости сопротивления $X_{УПК}(I)$, диапазон изменения которого подлежит определению.

Выражение $\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}$ связано с коэффициентом K_2 следующим образом:

$$\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} = \frac{10^6 \cdot I_6 K_2}{\omega_0 (K_1 - K_2 \cdot I \cdot I_6)^2 Z_6}. \quad (7)$$

При подстановке в выражение (7) значений режимных параметров, соответствующих точке исходного установившегося режима, и изменении параметра K_2 получим следующую зависимость:

$$\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I} = a K_2 + b. \quad (8)$$

Таким образом, ввиду линейной зависимости (8) параметр K_2 можно записать непосредственно в характеристическое уравнение и, используя метод D -разбиения по одному параметру [10] (в нашем случае параметр – коэффициент K_2 регулирования УПК), определить диапазон его изменения, соответствующий сохранению устойчивости исследуемой ЭЭС.

Характеристическое уравнение (5) можно представить в следующем виде:

$$D(p) = D_0(p) + K_2 D_1(p) = 0. \quad (9)$$

Для получения значений K_2 , при которых характеристическое уравнение имеет пару чисто мнимых корней, в (9) принято:

$$p = j\omega; \quad (10)$$

$$D(j\omega) = D_0(j\omega) + K_2 D_1(j\omega) = 0. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует

$$\begin{cases}
 K_2 P_1(\omega) + R_1(\omega) = 0, \\
 K_2 P_2(\omega) + R_2(\omega) = 0,
 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{где } \begin{cases}
 P_1(\omega) = \text{Re } D_1(j\omega), \\
 P_2(\omega) = \text{Im } D_1(j\omega), \\
 R_1(\omega) = \text{Re } D_0(j\omega), \\
 R_2(\omega) = \text{Im } D_0(j\omega).
 \end{cases}$$

Следовательно, уравнение (11) имеет решение только для случая, когда

$$\frac{P_1(\omega)}{P_2(\omega)} = \frac{R_1(\omega)}{R_2(\omega)}, \quad (13)$$

т.е. когда одно уравнение является следствием другого. Условие (13) может выполняться при нескольких значениях ω . При этом необходимо реализовать метод D -разбиения по параметру K_2 . Для этого условно (так как K_2 всегда действительно) принимаем, что $K_2' = K_2 + jb$, т.е. K_2 может принимать комплексные значения. Тогда характеристическое уравнение (11) превращается в уравнение с комплексными коэффициентами и может иметь несопряженные комплексные корни [10]. Таким образом, на плоскости (K_2, b) кривые D -разбиения при изменении ω от 0 до ∞ и от $-\infty$ до 0 не накладываются друг на друга. Действительные значения остаются такими же, а мни-

мые меняют знак на противоположный. Кривая D -разбиения разбивает плоскость $K_2 + jb$ на области $D(m)$, показанные на рис. 2, где m – число корней в правой полуплоскости комплексной плоскости корней характеристического уравнения. На рис. 2 приведены области устойчивости исследуемой ЭЭС для исходного установившегося режима с исходной степенью продольной компенсации. Чтобы выявить, какая из областей $D(m)$ является претендентом на область устойчивости, необходимо провести штриховку границы D -разбиения. Граница D -разбиения штрихуется однократно слева при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$. Переход границы внутрь одинарной штриховки соответствует изменению области $D(m)$ на $D(m-1)$. Так как реальный смысл имеют только действительные положительные значения K_2 , то устойчивость исследуемой системы в точке исходного установившегося режима обеспечивается при следующих условиях:
 $0 < K_2 < 28$.

В целях проверки полученного претендента на область устойчивости подставим K_2

из данной области в характеристическое уравнение и посчитаем корни. Для $K_2 = 10$ получили следующие корни характеристического уравнения:

$$p_1 = -232,657; p_2 = -110,16; p_{3,4} = -0,549 \pm 5,008i.$$

При $K_2 = 40$, находящемся в неустойчивой области, получили один неустойчивый корень, так как перешли в область одинарной штриховки:

$$p_1 = 112,692; p_2 = -133,722; p_{3,4} = -1,16 \pm 7,865i.$$

Таким образом, получен диапазон изменения параметра регулируемого УПК, при котором сохраняется устойчивость исследуемой системы. Другими словами, получена методика определения диапазона изменения параметра регулируемого УПК в целях выбора его оптимального значения, позволяющего, с одной стороны, оказывать максимально положительный эффект на пропускную способность, статическую апериодическую и динамическую устойчивость, а с другой стороны, не приводить к колебательному нарушению устойчивости.

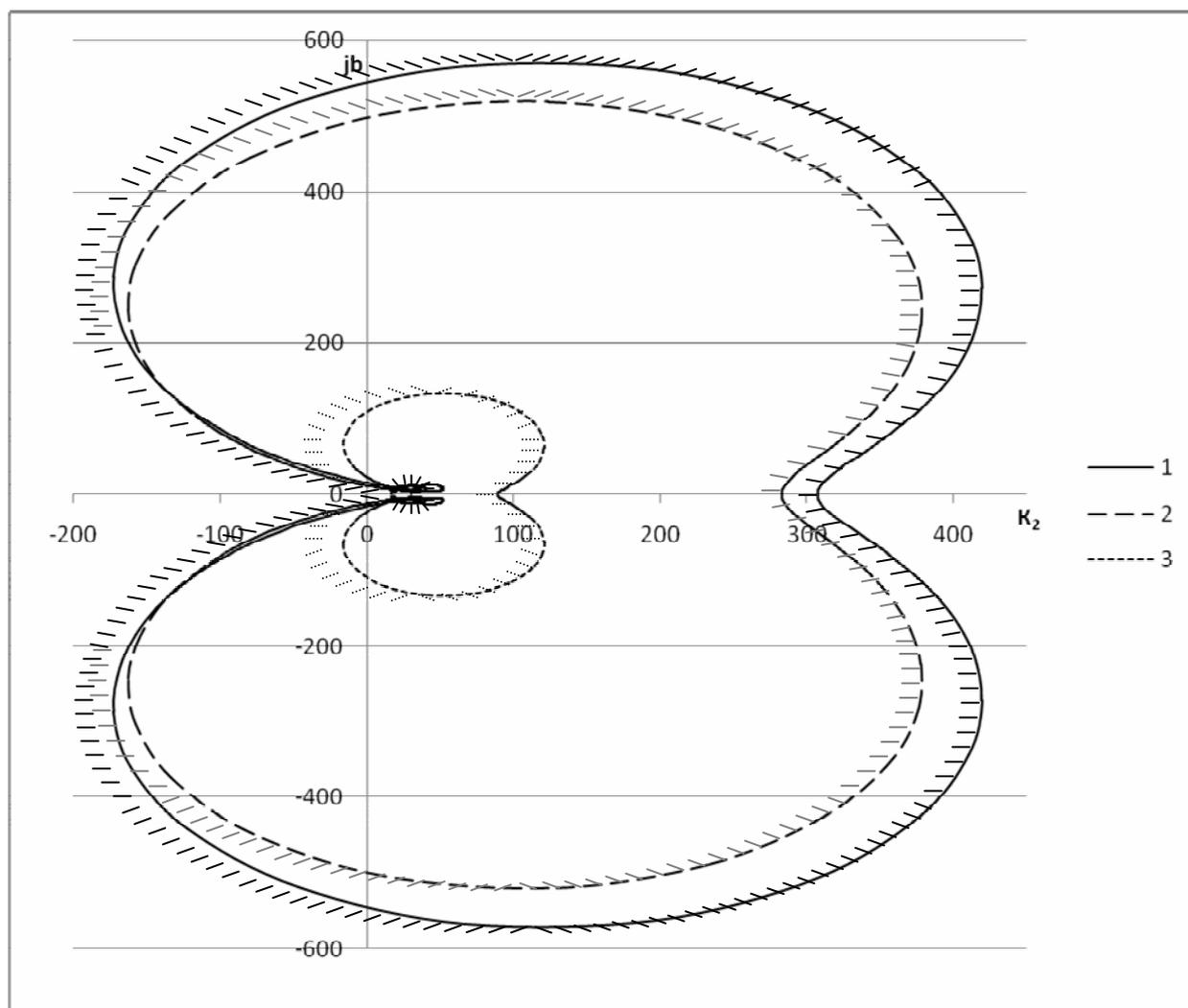


Рис. 2. Границы D -разбиения: 1 – $X_{упк} = 1,6$ о.е.; 2 – $X_{упк} = 2,2$ о.е.; 3 – граница D -разбиения при увеличении нагрузки

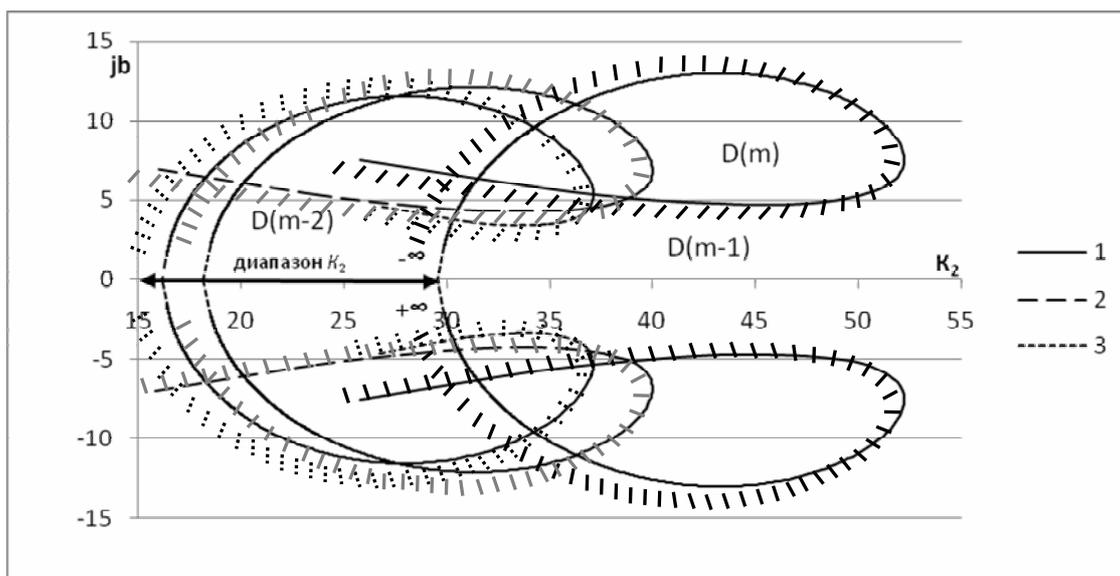


Рис. 3. Части границ D -разбиения: 1 – $X_{\text{УПК}} = 1,6$ о.е.; 2 – $X_{\text{УПК}} = 2,2$ о.е.; 3 – часть границы D -разбиения при увеличении нагрузки

Следует заметить, что при приближении режима исследуемой системы к границе колебательного нарушения устойчивости, т.е. с ростом степени продольной компенсации, диапазон изменения параметра K_2 сужается (рис. 2, кривая 2). Кроме того, указанный диапазон уменьшается при утяжелении режима (увеличении мощности нагрузки) (рис. 2, кривая 3).

На рис. 3 более детально отображены представляющие интерес части границ D -разбиения. Как отмечалось выше, диапазоны изменения параметра K_2 регулируемого УПК для различных режимов расположены на действительной оси (смысл D -разбиения по одному параметру предопределяет принадлежность параметра оси действительных чисел), что и показано на рис. 3 (диапазон от 0 до 28).

Заключение

Предложенная методика получения возможных параметров регулирования УПК позволяет сохранить положительный эффект от данного устройства на исследуемую ЭЭС, а именно увеличение предела передаваемой мощности, улучшение апериодической статической и динамической устойчивости, и нивелировать отрицательное влияние на режим, т.е. отстроится от колебательного нарушения устойчивости ЭЭС, вызванного самим законом регулирования УПК.

Полученные диапазоны изменения параметров регулирования устройства продольной компенсации позволяют определить предельные значения коэффициентов регулирования для различных режимов, а также выявить факторы, оказывающие влияние на данные предельные значения. Показано уменьшение диапазонов регулирования при увели-

чении степени продольной компенсации и увеличении мощности нагрузки.

Список литературы

1. Москвин И.А. Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 46–50.
2. Luiz A.S. Pilotto, André Bianco, Willis F. Long, Abdel-Aty Edris. Impact of TCSC Control Methodologies on Subsynchronous Oscillations, IEEE Trans. // On Power Delivery. – January 2003. – Vol. 18, no. 1. – P. 243–252.
3. D. Rai, S. O. Faried, G. Ramakrishna, A. Edris. Hybrid series compensation scheme capable of damping subsynchronous resonance // Proc. Inst. Eng. Technol. Gen., Transm. Distrib. – March 2010. – Vol. 4, no. 3. – P. 456–466.
4. Hao Hu. Subsynchronous Resonance in Two Generators Power System // IEEE Trans. On Power Systems. – 2011. – Vol. 11. – P. 8600–8603.
5. Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1964.
6. Мартиросян А.А. Повышение устойчивости электроэнергетических систем с применением регулируемой продольной компенсации: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2009. – 146 с.
7. 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.
8. 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.
9. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А. Расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 18–22.
10. Электрические системы. Т. 1. Математические задачи электроэнергетики: учеб. пособие для вузов / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.

References

1. Moskvina, I.A. Kolebatel'naya staticheskaya ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy s mezhsistemnoy svyaz'yu, sodержashchey reguliruemoe ustroystvo prodol'noy kompensatsii [Oscillatory steady state stability of an electrical power system with an interconnection containing controlled series capacitors]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 46–50.
2. Luiz, A.S. Pilotto, André Bianco, Willis F. Long, Abdel-Aty Edris, Impact of TCSC Control Methodologies on Sub-synchronous Oscillations. *IEEE Trans. On Power Delivery*, January 2003, vol. 18, no. 1, pp. 243-252.
3. D. Rai, S. O. Faried, G. Ramakrishna, A. Edris. Hybrid series compensation scheme capable of damping subsynchronous resonance. *Proc. Inst. Eng. Technol. Gen., Transm. Distrib.*, March 2010, vol. 4, no. 3, pp. 456–466.
4. Hao Hu. Subsynchronous Resonance in Two Generators Power System. *IEEE Trans. On Power Systems*, 2011, vol. 11, pp. 8600–8603.
5. Venikov, V.A., Anisimova, N.D., Dolginov, A.I. *Samovzbuzhdenie i samoraskachivanie v elektricheskikh sistemakh* [Self-excitation and cumulative hunting in electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1964.
6. Martirosyan, A.A. *Povyshenie ustoychivosti elektroenergeticheskikh sistem s primeneniem reguliruemoy prodol'noy kompensatsii*. Diss... kand. tekhn. nauk [Steady state modes of electrical power systems with flexible network devices. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2009. 146 p.
7. Fokin, V.K. Povyshenie 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 – Novokuzneckaja, Kuzbasskaja»]. *Energiya edinoy seti*, 2013, no. 2(7), pp. 66–73.
8. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A., Vinogradova, A.A. Ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy iz dvukh elektricheskikh stantsiy s reguliruemoy prodol'noy kompensatsiy [Stability of an electrical power engineering system consisting of two electrical power stations with controlled series compensation]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 5, pp. 26–31.
9. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A. Raschet kharakteristik ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskoy sistemy s reguliruemym ustroystvom prodol'noy kompensatsii [Characteristics calculation of steady-state modes of an electrical power engineering system with a controlled series capacitor]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 18–22.
10. *Elektricheskie sistemy. T. 1. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki* [Electrical systems. Vol. 1. Mathematical problems of electrical power industry]. Moscow, Vysshaya shkola, 1970. 336 p.

Голов Валерий Павлович,

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

Москвин Илья Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
ассистент кафедры электрических систем,
e-mail: moskvina@es.ispu.ru