

СОВМЕСТНЫЙ ВЫБОР ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ АРВ СД И РЕГУЛИРУЕМОГО УПК В ЦЕЛЯХ УЛУЧШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

МАРТИРОСЯН А.А., инж.

Проведено исследование колебательной статической устойчивости (в данном случае – построение границы D-разбиения в плоскости двух параметров) в целях выбора настройки АРВ СД и закона регулирования УПК для обеспечения максимальной эффективности применения регулируемого УПК с точки зрения улучшения устойчивости электрической системы.

Ключевые слова: электрическая система, колебательная статическая устойчивость, автоматическое регулирование возбуждения, управляемая продольная компенсация.

SELECTION OF LAWS OF ARV SD CONTROL AND CONTROLLED UPK FOR IMPROVING THE ELECTRIC SYSTEM STABILITY

A.A. MARTIROSYAN, Engineer

The author carries out the investigation of vibrating static stability (in this case – designing the D frontier in two parameters plane) for selecting the ARV SD set up and laws of controlled UPK to supply the maximum efficiency in using of controlled UPK in terms of improving the electric system stability.

Key words: electric system, vibrating static stability, automated field control, controlled series compensation.

Применение устройств продольной емкостной компенсации (УПК), регулируемых в функции модуля тока линии [1], обеспечивает существенное увеличение пределов передаваемой мощности по линии электропередач сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН), а также улучшает аperiodическую статическую и динамическую устойчивость.

Однако существуют режимы, при которых такой тип УПК, в принципе, не улучшает колебательную статическую устойчивость электрической системы [2].

Для анализа колебательной статической устойчивости с регулируемым УПК разработана методика, [3] с помощью которой выявлены диапазоны изменения параметров режима электрической системы (рис. 1) и регулируемого УПК, где обеспечивается максимальная эффективность применения рассматриваемых УПК с точки зрения улучшения устойчивости электрической системы.

Применение АРВ СД существенно улучшает устойчивость электрической системы с точки зрения колебательной статической устойчивости [5].

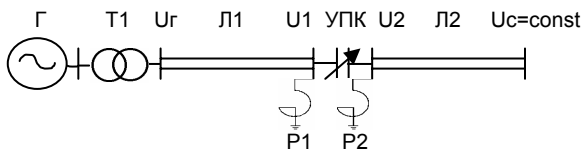


Рис. 1. Исследуемая электрическая система

Для определения области D-разбиения по двум настроечным параметрам АРВ СД K_{ol} и K_{1l} для разных законов регулирования УПК используем методику, разработанную ранее для анализа колебательной статической устойчивости исследуемой электрической системы [4].

Для решения этой задачи применительно к исследуемой электрической системе (рис. 1), состоящей из электростанции, связанной линией электропередачи сверхвысокого напряжения,

имеющей регулируемое УПК, с мощной системой, в соответствии с общепринятой методикой [4], требуется линеаризация уравнений электромеханических и электромагнитных переходных процессов в рассматриваемой системе. При выборе в качестве независимых переменных угла поворота ротора δ , ЭДС генератора E_q и сопротивления управляемой УПК $X_{УПК}$ с учетом АРВ СД характеристический определитель линеаризованной системы уравнений будет иметь следующий вид [5]:

$$D(p) = \begin{vmatrix} T_J p^2 + P_d p + \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial E_q} & \frac{\partial P}{\partial X_{УПК}} \\ -\frac{\partial I}{\partial \delta} & -\frac{\partial I}{\partial E_q} & -\left(\frac{\partial I}{\partial X_{УПК}} - \frac{1}{\frac{\partial X_{УПК}}{\partial I}} \right) \\ T_{do} p \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} - \sum W'_{Tj}(p) \frac{\partial \Pi_j}{\partial \delta} & T_{do} p \frac{\partial E'_q}{\partial E_q} + 1 - \sum W'_{Tj}(p) \frac{\partial \Pi_j}{\partial E_q} & T_{do} p \frac{\partial E'_q}{\partial X_{УПК}} - \sum W'_{Tj}(p) \frac{\partial \Pi_j}{\partial X_{УПК}} \end{vmatrix} \quad (1)$$

где $W'_{Tj}(p)$ – передаточная функция системы возбуждения и АРВ синхронной машины:

$$W'_{Tj}(p) = \frac{1}{(1 + pT_e)(1 + pT_p)} W_{Tj}(p), \quad (2)$$

где T_e – постоянная времени возбудителя; T_p – постоянная времени регулятора; $W_{Tj}(p)$ – передаточная функция собственно регулятора.

Поскольку параметрами регулирования возбуждения являются отклонение напряжения и тока генератора, то приращение вынужденной ЭДС ΔE_{qe} с учетом принятого закона регулирования имеет вид

$$\Delta E_{qe} = \frac{1}{(1 + pT_e)(1 + pT_p)} [(K_{ou} + pK_{1u})\Delta U_e + (K_{ol} + pK_{1l})p\Delta I_e].$$

Тогда характеристический определитель примет вид

$$D(p) = \begin{vmatrix} T_j p^2 + P_{Dp} + \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial E_q} & \frac{\partial P}{\partial X_{УПК}} \\ -\frac{\partial I}{\partial \delta} & -\frac{\partial I}{\partial E_q} & -\left[\frac{\partial I}{\partial X_{УПК}} \frac{1}{\partial X_{УПК}} \frac{\partial I}{\partial I} \right] \\ T_{доp} \frac{\partial E_q}{\partial \delta} - \frac{1}{(1+pT_e)(1+pT_p)} \times (K_{ou} + pK_{1u}) \frac{\partial U_2}{\partial \delta} + (K_{oi} + pK_{1i}) p \frac{\partial I_2}{\partial \delta} & T_{доp} \frac{\partial E_q}{\partial E_q} + 1 - \frac{1}{(1+pT_e)(1+pT_p)} \times (K_{ou} + pK_{1u}) \frac{\partial U_2}{\partial E_q} + (K_{oi} + pK_{1i}) p \frac{\partial I_2}{\partial E_q} & T_{доp} \frac{\partial E_q}{\partial X_{УПК}} - \frac{1}{(1+pT_e)(1+pT_p)} \times (K_{ou} + pK_{1u}) \frac{\partial U_2}{\partial X_{УПК}} + (K_{oi} + pK_{1i}) p \frac{\partial I_2}{\partial X_{УПК}} \end{vmatrix}$$

Функциональная зависимость $X_{УПК} = f(I)$, где I – ток линии, может быть представлена следующим соответствием:

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{[\omega_0(K1 - K2 \cdot I)]},$$

где $K1, K2$ – коэффициенты, характеризующие зависимость $X_{УПК}(I)$.

Для построения области D-разбиения рассмотрим режим, близкий к зоне самовозбуждения, с параметрами УПК: $X_{УПК} = 2$ при $K2 = 2$. Коэффициент запаса статической устойчивости для этого режима равен 0,6. При таких параметрах УПК происходит нарушение колебательной статической устойчивости [2]. Однако действие АРВ СД позволяет обеспечивать устойчивость электрической системы.

Определим область устойчивости по двум настроечным параметрам АРВ СД, K_{oi} и K_{1i} , при которых обеспечивается статическая устойчивость электрической системы в данном режиме, и проверим правильность выводов сделанных ранее [6].

Подставим значения частных производных режимных параметров и числовые значения $T_j, T_{до}, T_e, T_p, K_{ou}, K_{1u}$ в характеристический определитель и, раскрыв характеристический определитель по степеням p , получим характеристическое уравнение в следующей форме:

$$D(p) = D_o(p) + K_{oi}D_1(p) + K_{1i}D_2(p) = 0, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} D_o(p) &= -7,287 \cdot 10^{-6} p^5 - 6,2633 \cdot 10^{-4} p^4 - \\ &- 1,9759 \cdot 10^{-2} p^3 - 0,53665 p^2 - 2,1283 p - 1,5041; \\ D_1(p) &= 7,0795 \cdot 10^{-3} p^3 + 3,8234 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,1344 p; \\ D_2(p) &= 7,079 \cdot 10^{-3} p^4 + 3,823 \cdot 10^{-3} p^3 - 0,1344 p^2. \end{aligned}$$

В соответствии с методом D-разбиения, наложив в (3) $p = j\omega$ и выделяя действительную (Re) и мнимую (Im) части, получаем систему из двух уравнений с действительными коэффициентами [5]:

$$\begin{aligned} K_{1i} \text{Re}_2(\omega) + K_{oi} \text{Re}_1(\omega) &= -\text{Re}_o(\omega), \\ K_{1i} \text{Im}_2(\omega) + K_{oi} \text{Im}_1(\omega) &= -\text{Im}_o(\omega), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \text{Re}_o(\omega) &= -6,2633 \cdot 10^{-4} \omega^4 + 0,53665 \omega^2 - 1,5041; \\ \text{Im}_o(\omega) &= 1,9759 \cdot 10^{-2} \omega^3 - 7,287 \cdot 10^{-6} \omega^5 - 2,1283 \omega; \\ \text{Re}_1(\omega) &= -3,8234 \cdot 10^{-3} \omega^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Im}_1(\omega) &= -7,0795 \cdot 10^{-3} \omega^3 - 0,1344 \omega; \\ \text{Re}_2(\omega) &= 7,0795 \cdot 10^{-3} \omega^4 + 0,1344 \omega^2; \\ \text{Im}_2(\omega) &= -3,8234 \cdot 10^{-3} \omega^3. \end{aligned}$$

Решая систему уравнений (4) относительно K_{oi} и K_{1i} , получаем параметрические уравнения

$$K_{oi} = \Delta_1(\omega) / \Delta(\omega); \quad K_{1i} = \Delta_2(\omega) / \Delta(\omega),$$

где главный определитель системы (4) имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta &= \text{Re}_2(\omega) \text{Im}_1(\omega) - \text{Im}_2(\omega) \text{Re}_1(\omega) = \\ &= -5,019 \cdot 10^{-5} \omega^7 - 1,9177 \cdot 10^{-3} \omega^5 - 1,8066 \cdot 10^{-2} \omega^3. \end{aligned} \quad (5)$$

Итак, параметрические уравнения, с помощью которых строим границу D-разбиения, при изменении значений ω от $-\infty$ до $+\infty$ имеют вид

$$\begin{aligned} K_{oi} &= \frac{-1,3651 \cdot 10^{-4} \omega^4 + 5,1589 \cdot 10^{-8} \omega^6 + 1,0359 \cdot 10^{-2} \omega^2 + 0,2918}{-5,0119 \cdot 10^{-5} \omega^4 - 1,9177 \cdot 10^{-3} \omega^2 - 1,8066 \cdot 10^{-2}}, \\ K_{1i} &= \frac{-4,406 \cdot 10^{-6} \omega^6 + 3,639 \cdot 10^{-3} \omega^4 + 6,962 \cdot 10^{-2} \omega^2 - 0,202}{-5,0119 \cdot 10^{-5} \omega^6 - 1,9177 \cdot 10^{-3} \omega^4 - 1,8066 \cdot 10^{-2} \omega^2}. \end{aligned}$$

На границе области D-разбиения (рис. 2) в режиме с высокой степенью компенсации $X_{УПК} = 2$ и коэффициентом $K2 = 2$, характеризующим зависимость $X_{УПК}(I)$, существует область положительных значений настроечных параметров АРВ СД, при установке которых устойчивость системы не будет нарушена (рис. 3).

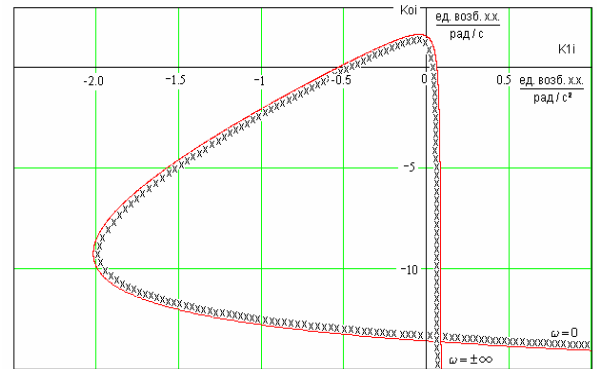


Рис. 2. Граница области D-разбиения для режима с параметрами УПК $X_{УПК} = 2$ и $K2 = 2$

Это можно проверить с помощью сформированной математической модели электрической системы с применением программного комплекса имитационного моделирования МИК [2, 7].

Точка А на рис. 3 соответствует значениям настроечных коэффициентов АРВ СД $K_{oi} = 1 \frac{\text{ед.возб.х.х.}}{\text{рад/с}}$ и $K_{1i} = 0,01 \frac{\text{ед.возб.х.х.}}{\text{рад/с}^2}$, при

которых имеем устойчивый режим системы. При таких значениях настроечных коэффициентов АРВ СД корни характеристического уравнения пятого порядка имеют вид $p1 = -64,1, p2,3 = -4,7382 \pm 29,336i, p4,5 = -2,339 \pm 2,314i$.

Как видно, действительная часть всех пяти корней меньше нуля, что позволяет сделать вывод об устойчивости системы с выбранными настроечными коэффициентами АРВ.

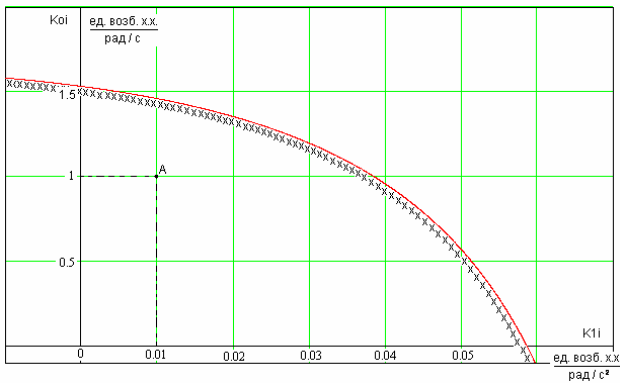


Рис. 3. Часть области D-разбиения

При рассмотрении режима, соответствующего точке вне области устойчивости, например

$$K_{01} = 3 \frac{\text{ед. возб. х.х.}}{\text{рад/с}} \text{ или } K_{11} = 0,5 \frac{\text{ед. возб. х.х.}}{\text{рад/с}^2},$$

имеем следующие корни характеристического уравнения:

$$p_1 = -12,905, \quad p_{2,3} = -2,218 \pm 2,03j, \\ p_4 = 19,02, \quad p_5 = 276,1.$$

Это соответствует нарушению статической устойчивости при выбранных настроечных параметрах АРВ СД.

На рис. 4–6 приведены результаты расчетов с использованием полной математической модели исследуемой электрической системы [2], записанной в осях d–q, жестко связанных с ротором генератора. Результаты данных расчетов подтверждают правильность сделанных выше выводов.

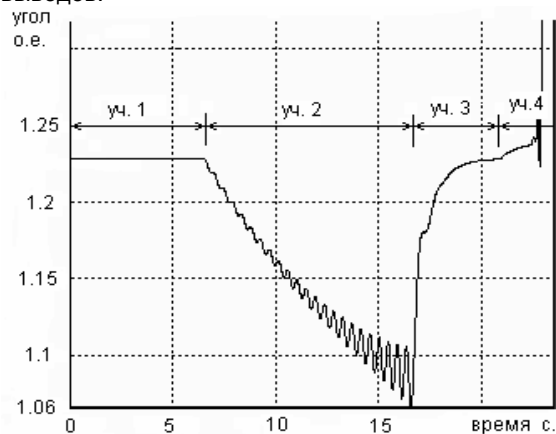


Рис. 4. Зависимость изменения угла от времени

Графики изменения угла, тока и параметров УПК во времени разделены на четыре интервала времени с разными режимными параметрами. Первый участок соответствует установившемуся режиму, с параметрами УПК $X_{УПК} = 2$ и $K_2 = 2$. Второй участок соответствует режиму с отключенным АРВ. Как было показано в [2], в таком режиме происходит нарушение колебательной статической устойчивости, что мы и наблюдаем во всех трех графиках (рис. 4–6). Третий интервал – это включение АРВ СД с настроечными параметрами из области D-разбиения, т. е. соответствующими точке А (рис. 3).

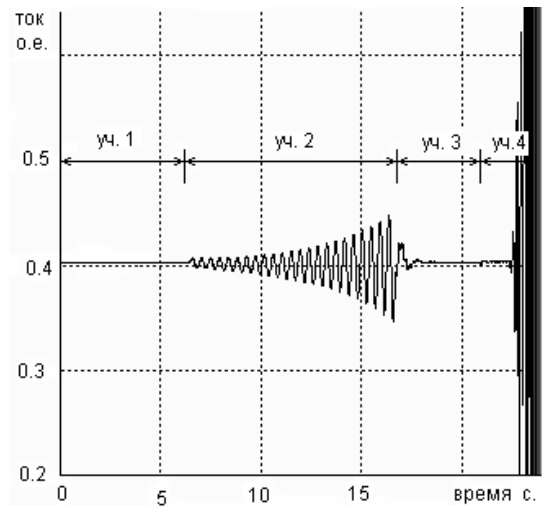


Рис. 5. Зависимость изменения тока в регулируемой емкости от времени

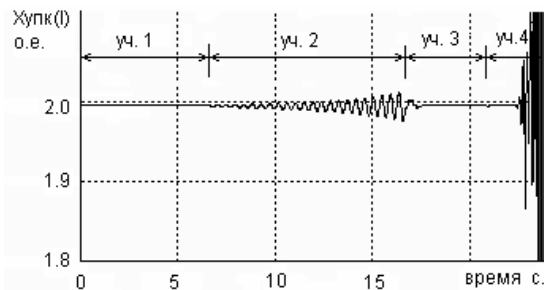


Рис. 6. Зависимость изменения емкости от времени

Анализ графиков показывает, что АРВ СД положительно влияет на устойчивость электрической системы, устраняя развивающийся колебательный процесс. Четвертый интервал соответствует режиму с АРВ СД, но с настроечными параметрами, взятыми вне области D-разбиения, что приводит к нарушению статической устойчивости (что и видно на всех трех графиках). Таким образом, используя разработанный метод, можно определить области устойчивости для настроечных параметров АРВ СД для любого режима электрической системы, т. е. для любой степени компенсации, с любым коэффициентом, характеризующим зависимость $X_{УПК} = f(I)$ при разных нагрузках ЛЭП СВН, в целях обеспечения устойчивости электрической системы в целом в диапазоне возможных рабочих режимов. Например, на рис. 7 приведена область D-разбиения с коэффициентом $K_2 = 0,5$, который приводит к увеличению диапазона изменения настроечных коэффициентов АРВ СД. На рис. 8 приведена область D-разбиения при более низком уровне компенсаций ($X_{УПК} = 1,2$), что еще больше увеличивает диапазон изменения устойчивых настроечных коэффициентов АРВ СД, соответствующий области устойчивости.

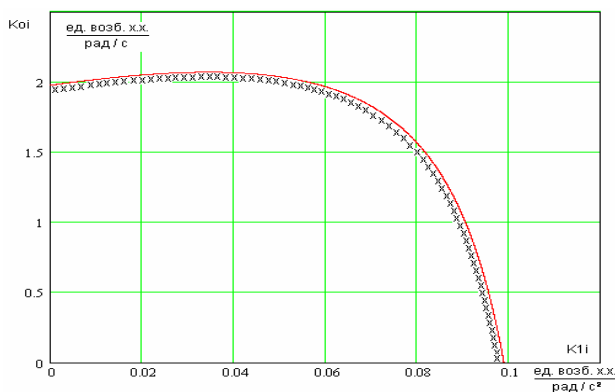


Рис. 7. Граница области D-разбиения при $X_{УПК} = 2$ и $K_2 = 0,5$

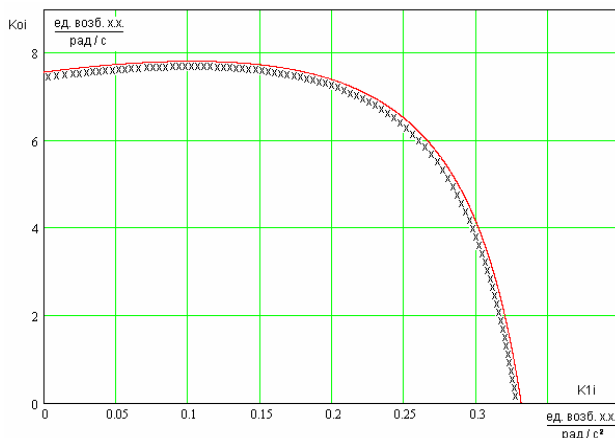


Рис. 8. Граница области D-разбиения при $X_{УПК} = 1,2$ и $K_2 = 0,5$

Кроме того, данный метод позволяет выявлять режимы, при которых вообще не возможно сохранение устойчивости электрической системы.

В результате появляется возможность исключить выбор таких настроечных параметров, как АРВ СД, так и регулируемой емкости, которые могут привести к нарушению устойчивости электрической системы.

Например, при степени компенсации $X_{УПК} = 2$ и $K_2 = 4$ [2] даже АРВ СД не позволяет сохранять устойчивость электрической системы. Это подтверждается тем, что при определении области

D-разбиения отсутствует область устойчивых настроечных коэффициентов АРВ СД.

Таким образом, определяя области устойчивых настроечных коэффициентов АРВ СД можно обеспечивать максимальную эффективность применения регулируемого УПК, не нарушая устойчивость электрической системы.

Заключение

Рассмотренная математическая модель позволяет анализировать колебательную статическую устойчивость с регулируемым УПК и АРВ СД. Представленный способ анализа статической устойчивости дает возможность определить диапазон значений настроечных параметров АРВ СД при различной степени компенсации и различных законах регулирования $X_{УПК}(I)$, которые обеспечивают максимальную эффективность применения регулируемых УПК с точки зрения улучшения устойчивости электрической системы.

Список литературы

1. Голов В.П., Мартиросян А.А. Устойчивость электрической системы с управляемой линией электропередачи / Повышение эффективности работы ТЭС и энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 2; Под ред. А.В. Мошкарин, В.А. Шуина, Е.С. Целищева. – Иваново, 1997. – С. 211–214.
2. Голов В.П., Мартиросян А.А. Влияние законов регулирования устройств продольной компенсации на устойчивость электроэнергетической системы // Вестник ИГЭУ. – 2003. – Вып. 5. – С. 41–44.
3. Голов В.П., Мартиросян А.А. Особенности анализ статической колебательной устойчивости электрической системы с регулируемым УПК // Вестник ИГЭУ. – 2004. – Вып. 6. – С. 58–61.
4. Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1964.
5. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1985.
6. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1981.
7. Колганов А.Р., Пантелеев Е.Р. Имитационное моделирование динамических систем в САПР: Учеб. пособие / Иван. энерг. ин-т. – Иваново, 1990.

Мартиросян Акоп Арамаисович,
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
 инженер кафедры электрических систем,
 zav_es@es.ispu.ru