

УДК 621.311

Устойчивость электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: Одним из направлений развития управляемых межсистемных связей является применение регулируемых устройств продольной емкостной компенсации. Для практического применения этих устройств актуальными являются задачи по исследованию их влияния на режимы электроэнергетической системы, а также по выбору оптимальных параметров управления.

Материалы и методы: С учетом электромагнитных переходных процессов в статорных цепях и элементах электропередачи электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемым устройством продольной емкостной компенсации сформирована полная математическая модель.

Результаты: Представлена математическая модель электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации, реализована программа для проведения расчетов. Рассматриваются вопросы влияния регулируемых устройств продольной емкостной компенсации на режимы и устойчивость системы из двух генераторных станций.

Выводы: Результаты работы могут быть использованы при решении задач проектирования дальних линий электропередачи с управляемыми элементами, расчетах статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем с гибкими линиями электропередачи, создании систем регулирования управляемых устройств продольной емкостной компенсации. Регулируемые устройства продольной емкостной компенсации позволяют повысить пропускную способность ЛЭП, динамическую и статическую устойчивость и, как следствие, надежность и эффективность электроэнергетической системы.

Ключевые слова: регулируемые устройства продольной емкостной компенсации, устойчивость электроэнергетических систем, пропускная способность ЛЭП, математическая модель.

Stability of Electrical Power Engineering System Consisting of Two Electrical Power Stations with Controlled Series Compensation

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

Abstract

Background: One of the directions of developing managed interconnections is the application of the regulated devices of series capacity. The research of their impact on electrical power system modes and the choice of optimal control parameters are the urgent tasks for their practical usage.

Materials and methods: To find solution to this problem the completed mathematical model of such a system has been designed subject to electromagnetic transients existence in stator circuits and transmission line elements.

Results: The article considers the controlled series capacitors impact on modes and stability of the electrical power system consisting of two electric power stations.

Conclusions: The findings can be used in construction of power transmission lines with controlled elements, dynamic and steady-state stability calculations, creation of controlled series capacitors operating systems. Controlled series capacitors allow to increase power transmission line capacity, improve dynamic and steady-state stability that leads to reliability and efficiency growth of power systems operation.

Key words: Controlled series capacitors, electrical power system stability, power transmission line capacity, mathematical model.

Изменение величины передаваемой мощности по дальним линиям электропередач сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) в широком диапазоне стало характерной особенностью режимов электрических систем в настоящее время.

В совокупности мероприятий, направленных на повышение устойчивости электрических систем, можно выделить мероприятия, связанные с изменением результирующих па-

раметров и характеристик электропередачи: изменение конструкции ЛЭП, применение устройств продольной емкостной компенсации, управляемых шунтирующих реакторов и статических источников реактивной мощности.

Основным назначением этих мероприятий является повышение пропускной способности линий электропередачи при оказании положительного влияния на устойчивость электрической системы.

Важность и актуальность проблемы увеличения пропускной способности линий сверхвысокого напряжения, повышения пределов устойчивости системы, обеспечения необходимых режимов электрических систем по реактивной мощности обусловили развитие теории управляемых электропередач. Подход к системе передачи как к активному элементу электрической системы позволил провести исследования по использованию управляемых реакторов для улучшения статической устойчивости, а также изучить вопросы применения устройств регулируемой продольной емкостной компенсации (УПК) для улучшения показателей как статической, так и динамической устойчивости электроэнергетической системы.

Однако, наряду с указанными выше задачами, законы управления регулируемых устройств компенсации должны удовлетворять также и требованиям обеспечения необходимых уровней параметров режима системы и обеспечения устойчивости при минимальных перетоках мощности.

Изучение устройств продольной емкостной компенсации, степень компенсации которых увеличивается с ростом передаваемой мощности, становится более актуальным в настоящее время, в силу того, что устройства такого типа существенно снижают степень компенсации при снижении перетоков мощности, чем положительно влияют на режим системы по напряжению и реактивной мощности, в то время как неуправляемые устройства нуждаются в частых коммутациях [1].

Одним из возможных способов управления работой электрической связи, оснащенной управляемыми устройствами для регулирования ее режимных параметров (мощность, напряжение и ток), является изменение величины емкостного сопротивления в УПК, включаемой последовательно (продольно) в электрическую связь (линию электропередачи).

Потребность в управлении УПК возникла за рубежом в связи с необходимостью устранения субсинхронного резонанса, при котором нарастающие колебания вала турбоагрегата могут вызвать его повреждение. Это опасное явление появилось в электрических сетях с большой степенью продольной компенсации (более 50 %).

Применение управляемых УПК с автоматическим регулированием степени компенсации индуктивного сопротивления линии позволяет решать следующие задачи:

- повышение пропускной способности линии электропередачи;
- исключение условий возникновения субсинхронного резонанса;
- демпфирование колебаний роторов генераторов после аварийных возмущений в энергосистеме.

В управляемых УПК используются различные виды регулирования:

- ступенчатое (путем шунтирования части конденсаторных блоков через механические или тиристорные выключатели);
- непрерывное (путем использования управляемых тиристорно-реакторных групп).

В настоящее время в России нет действующих управляемых УПК, но целесообразность их применения очевидна на новых ЛЭП, а также при реконструкции и техническом перевооружении действующих электрообъектов [2]. Ниже рассмотрим только принципиальные вопросы влияния такой установки на режимы электроэнергетических систем (ЭЭС), которая может иметь различную конструктивную реализацию.

Проведенное исследование влияния законов управления регулируемых устройств продольной емкостной компенсации на характеристики установившихся и переходных режимов электрической системы, состоящей из электростанции, линии электропередачи и мощной приемной системы, показало их эффективность как в плане повышения пределов передаваемой мощности (около 40 %, по сравнению с УПК обычного типа), так и в плане улучшения устойчивости [3]. Нами было проведено исследование влияния регулируемых УПК на режимы и устойчивость электрической системы, состоящей из двух генераторных станций.

Для изучения вопросов устойчивости электроэнергетической системы, состоящей из двух электрических станций с регулируемой УПК (рис. 1), сформирована схема замещения (рис. 2) и математическая модель. Линия электропередачи имеет УПК, регулируемое в функции тока линии [1].

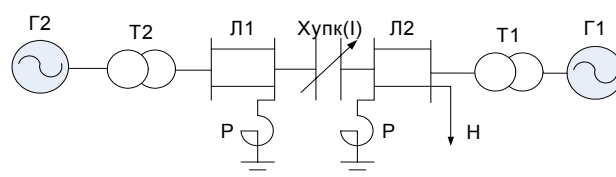


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

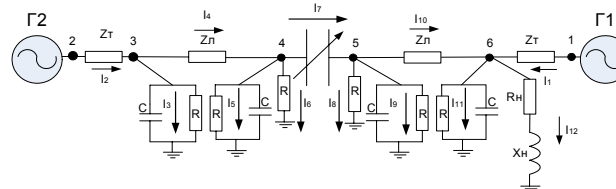


Рис. 2. Схема замещения исследуемой электроэнергетической системы

Система уравнений, описывающая полную модель ЭЭС, записана в осях $d - q$ и имеет следующий вид (опорная машина – Г2, все уравнения записаны в относительных едини-

цах при базисных условиях

$$\omega_{\text{баз}} = \omega_{\text{ном}} = 50 \text{ Гц}, \omega_{\text{ном}}^* (\text{баз}) = 314 \text{) [6]:}$$

• для генератора 1

$$\frac{d\Psi_{d1}}{dt} = \omega_0 \left(-u_{d1} - i_{d1}r - \frac{\omega_1}{\omega_0} \Psi_{q1} \right); \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_{q1}}{dt} = \omega_0 \left(-u_{q1} - i_{q1}r + \frac{\omega_1}{\omega_0} \Psi_{d1} \right); \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_{f1}}{dt} = \omega_0 (U_{f1} - i_{f1}r_f); \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{D1}}{dt} = -i_{D1} r_D \omega_0; \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi_{Q1}}{dt} = -i_{Q1} r_Q \omega_0; \quad (5)$$

$$\Psi_{d1} = X_d i_{d1} + X_{ad} i_{f1} + X_{ad} i_{D1}; \quad (6)$$

$$\Psi_{q1} = X_d i_{q1} + X_{ad} i_{Q1}; \quad (7)$$

$$\Psi_{f1} = X_f i_{f1} + X_{ad} i_{d1} + X_{ad} i_{D1}; \quad (8)$$

$$\Psi_{D1} = X_D i_{D1} + X_{ad} i_{d1} + X_{ad} i_{f1}; \quad (9)$$

$$\Psi_{Q1} = X_{ad} i_{q1} + X_Q i_{Q1}; \quad (10)$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{\omega_0}{T_J} (M_{T1} - M_{EM1}); \quad (11)$$

$$M_{EM1} = i_{q1} \Psi_{d1} - i_{d1} \Psi_{q1}; \quad (12)$$

• для генератора 2

$$\frac{d\Psi_{d2}}{dt} = \omega_0 \left(-u_{d2} - i_{d2}r - \frac{\omega_2}{\omega_0} \Psi_{q2} \right); \quad (13)$$

$$\frac{d\Psi_{q2}}{dt} = \omega_0 \left(-u_{q2} - i_{q2}r + \frac{\omega_2}{\omega_0} \Psi_{d2} \right); \quad (14)$$

$$\frac{d\Psi_{f2}}{dt} = \omega_0 (U_{f2} - i_{f2}r_f); \quad (15)$$

$$\frac{d\Psi_{D2}}{dt} = -i_{D2} r_D \omega_0; \quad (16)$$

$$\frac{d\Psi_{Q2}}{dt} = -i_{Q2} r_Q \omega_0; \quad (17)$$

$$\Psi_{d2} = X_d i_{d2} + X_{ad} i_{f2} + X_{ad} i_{D2}; \quad (18)$$

$$\Psi_{q2} = X_d i_{q2} + X_{ad} i_{Q2}; \quad (19)$$

$$\Psi_{f2} = X_f i_{f2} + X_{ad} i_{d2} + X_{ad} i_{D2}; \quad (20)$$

$$\Psi_{D2} = X_D i_{D2} + X_{ad} i_{d2} + X_{ad} i_{f2}; \quad (21)$$

$$\Psi_{Q2} = X_{ad} i_{q2} + X_Q i_{Q2}; \quad (22)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{\omega_0}{T_J} (M_{T2} - M_{EM2}); \quad (23)$$

$$M_{EM2} = i_{q2} \Psi_{d2} - i_{d2} \Psi_{q2}; \quad (24)$$

• для трансформатора 1

$$\frac{di_{d1(2)}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{d1(2)}}{X_T} - \frac{U_{d6}}{X_T} - \frac{r_T}{X_T} i_{d1(2)} - \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{q1(2)} \right); \quad (25)$$

$$\frac{di_{q1(2)}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{q1(2)}}{X_T} - \frac{U_{q6}}{X_T} - \frac{r_T}{X_T} i_{q1(2)} + \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{d1(2)} \right); \quad (26)$$

• для трансформатора 2

$$\frac{di_{d2}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{d2}}{X_T} - \frac{U_{d3}}{X_T} - \frac{r_T}{X_T} i_{d2} - \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{q2} \right); \quad (27)$$

$$\frac{di_{q2}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{q2}}{X_T} - \frac{U_{q3}}{X_T} - \frac{r_T}{X_T} i_{q2} + \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{d2} \right); \quad (28)$$

• для линии электропередачи 1

$$\frac{di_{d4}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{d3}}{X_L} - \frac{U_{d4}}{X_L} - \frac{r_L}{X_L} i_{d4} - \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{q4} \right); \quad (29)$$

$$\frac{di_{q4}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{q3}}{X_L} - \frac{U_{q4}}{X_L} - \frac{r_L}{X_L} i_{q4} + \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{d4} \right); \quad (30)$$

$$\frac{dU_{d3}}{dt} = \omega_0 \left(X_C i_{d3} - \frac{\omega_2}{\omega_0} U_{q3} - \frac{X_C}{r_g} U_{d3} \right); \quad (31)$$

$$\frac{dU_{q3}}{dt} = \omega_0 \left(X_C i_{q3} + \frac{\omega_2}{\omega_0} U_{d3} - \frac{X_C}{r_g} U_{q3} \right); \quad (32)$$

$$\frac{dU_{d4}}{dt} = \omega_0 \left(X_C i_{d5} - \frac{\omega_2}{\omega_0} U_{q4} - \frac{X_C}{r_g} U_{d4} \right); \quad (33)$$

$$\frac{dU_{q4}}{dt} = \omega_0 \left(X_C i_{q5} + \frac{\omega_2}{\omega_0} U_{d4} - \frac{X_C}{r_g} U_{q4} \right); \quad (34)$$

• для реактора 1

$$\frac{di_{d6}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{d4}}{X_r} - \frac{r_r}{X_r} i_{d6} - \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{q6} \right); \quad (35)$$

$$\frac{di_{q6}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{q4}}{X_r} - \frac{r_r}{X_r} i_{q6} + \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{d6} \right); \quad (36)$$

• для УПК

$$\frac{d(u_{d4} - u_{d5})}{dt} = \omega_0 \left(x_{УПК}(I_7) i_{d7} - \frac{\omega_2}{\omega_0} (u_{q4} - u_{q5}) \right); \quad (37)$$

$$\frac{d(u_{q4} - u_{q5})}{dt} = \omega_0 \left(x_{УПК}(I_7) i_{q7} + \frac{\omega_2}{\omega_0} (u_{d4} - u_{d5}) \right); \quad (38)$$

• для реактора 2

$$\frac{di_{d8}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{d5}}{X_r} - \frac{r_r}{X_r} i_{d8} - \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{q8} \right); \quad (39)$$

$$\frac{di_{q8}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{q5}}{X_r} - \frac{r_r}{X_r} i_{q8} + \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{d8} \right); \quad (40)$$

• для линии электропередачи 2

$$\frac{di_{d10}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{d5}}{X_L} - \frac{U_{d6}}{X_L} - \frac{r_L}{X_L} i_{d10} - \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{q10} \right); \quad (41)$$

$$\frac{di_{q10}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{q5}}{X_L} - \frac{U_{q6}}{X_L} - \frac{r_L}{X_L} i_{q10} + \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{d10} \right); \quad (42)$$

$$\frac{dU_{d5}}{dt} = \omega_0 \left(X_C i_{d9} - \frac{\omega_2}{\omega_0} U_{q5} - \frac{X_C}{r_g} U_{d5} \right); \quad (43)$$

$$\frac{dU_{q5}}{dt} = \omega_0 \left(X_C i_{q9} + \frac{\omega_2}{\omega_0} U_{d5} - \frac{X_C}{r_g} U_{q5} \right); \quad (44)$$

$$\frac{dU_{d6}}{dt} = \omega_0 \left(X_C i_{d11} - \frac{\omega_2}{\omega_0} U_{q6} - \frac{X_C}{r_g} U_{d6} \right); \quad (45)$$

$$\frac{dU_{q6}}{dt} = \omega_0 \left(X_C i_{q11} + \frac{\omega_2}{\omega_0} U_{d6} - \frac{X_C}{r_g} U_{q6} \right); \quad (46)$$

• для нагрузки

$$\frac{di_{d12}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{d6}}{X_n} - \frac{r_n}{X_n} i_{d12} - \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{q12} \right); \quad (47)$$

$$\frac{di_{q12}}{dt} = \omega_0 \left(\frac{U_{q6}}{X_n} - \frac{r_n}{X_n} i_{q12} + \frac{\omega_2}{\omega_0} i_{d12} \right); \quad (48)$$

• уравнения баланса токов в узлах:

$$0 = i_{d2} - i_{d3} - i_{d4}; \quad (49)$$

$$0 = i_{q2} - i_{q3} - i_{q4}; \quad (50)$$

$$0 = i_{d4} - i_{d5} - i_{d6} - i_{d7}; \quad (51)$$

$$0 = i_{q4} - i_{q5} - i_{q6} - i_{q7}; \quad (52)$$

$$0 = i_{d7} - i_{d8} - i_{d9} - i_{d10}; \quad (53)$$

$$0 = i_{q7} - i_{q8} - i_{q9} - i_{q10}; \quad (54)$$

$$0 = i_{d10} + i_{d1(2)} - i_{d11} - i_{d12}; \quad (55)$$

$$0 = i_{q10} + i_{q1(2)} - i_{q11} - i_{q12}; \quad (56)$$

• уравнения преобразования координат:

$$i_{d1(2)} = i_{d1} \cos \delta_{21} - i_{q1} \sin \delta_{21}; \quad (57)$$

$$i_{q1(2)} = i_{d1} \sin \delta_{21} + i_{q1} \cos \delta_{21}; \quad (58)$$

$$U_{d1(2)} = U_{d1} \cos \delta_{21} - U_{q1} \sin \delta_{21}; \quad (59)$$

$$U_{q1(2)} = U_{d1} \sin \delta_{21} + U_{q1} \cos \delta_{21}; \quad (60)$$

$$\frac{d\delta_{21}}{dt} = \omega_2 - \omega_1. \quad (61)$$

Функциональная зависимость емкостного сопротивления запишется следующим образом, Ом:

$$X_{УПК}(I_7) = \frac{10^6}{\omega_2 (K_1 - K_2 I_7)}, \quad (62)$$

где I_7 – ток через УПК, кА; K_1, K_2 – коэффициенты, характеризующие зависимость $X_{УПК}(I)$.

Система (1)–(62) является полной моделью, учитывает как электромагнитные переходные процессы в элементах ЭЭС, так и электромеханические переходные процессы в синхронных машинах. С помощью полученной модели ЭЭС возможно анализировать как переходные, так и установившиеся режимы, для чего нужно положить все производные равными нулю.

При выборе коэффициентов K_1, K_2 принимается:

1. Начальное значение сопротивления связи, степень компенсации и установившийся режим электрической системы заданы.

2. Коэффициент K_2 , определяющий крутизну зависимости $X_{УПК}(I)$, может быть выбран произвольно.

3. Зная параметры исходного режима, находят значения коэффициента K_1 [4].

Уравнения связи генераторов с сетью (57)–(60) – уравнения преобразования координат в узлах подключения синхронных машин. Для связи токов синхронных машин и напряжений в узлах их подключения с системой координат опорной машины необходимо ввести уравнения связи, или уравнения преобразова-

ния координат, которые в матричном виде можно записать следующим образом:

$$V_\varepsilon = T_{j\varepsilon} V_j, \quad (63)$$

$$V_\varepsilon = \begin{pmatrix} u_{d\varepsilon} & i_{d\varepsilon} \\ u_{q\varepsilon} & i_{q\varepsilon} \end{pmatrix}; \quad V_j = \begin{pmatrix} u_{dj} & i_{dj} \\ u_{qj} & i_{qj} \end{pmatrix}; \quad (64)$$

где $T_{j\varepsilon}$ – матрица преобразования систем координат для перехода от модели в системе координат машины j к модели с опорной машиной ε :

$$T_{j\varepsilon} = \begin{pmatrix} \cos \delta_{j\varepsilon} & \sin \delta_{j\varepsilon} \\ -\sin \delta_{j\varepsilon} & \cos \delta_{j\varepsilon} \end{pmatrix} = e^{j\delta_{j\varepsilon}}, \quad \delta_{j\varepsilon} = \vartheta_j - \vartheta_\varepsilon, \quad (65)$$

где ϑ_j и ϑ_ε – углы между одноименными осями систем координат $(d_\varepsilon, q_\varepsilon)$, (d_j, q_j) и единой осью отсчета, вращающейся с постоянной синхронной скоростью [5].

Систему уравнений, составляющую математическую модель электроэнергетической системы, можно представить в виде системы

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = F(X, Y, t), \\ \varphi(X, Y, t) = 0, \end{cases} \quad (66)$$

$$\varphi(X, Y, t) = 0, \quad (67)$$

где X – вектор переменных, входящих под знак производной; Y – вектор переменных, не входящих под знак производной; F – вектор-функция правых частей дифференциальных уравнений; φ – вектор-функция правых частей алгебраических уравнений.

Для решения данной системы уравнений могут использоваться различные численные методы. Необходимо алгебраизировать дифференциальные уравнения вида (66) и на каждом шаге интегрирования решать систему нелинейных алгебраических уравнений. После алгебраизации дифференциальные уравнения будут иметь вид

$$\Psi(X^{(k)}, Y^{(k)}) = 0, \quad (68)$$

где k – индекс шага интегрирования.

Таким образом, получена система алгебраических уравнений, которая будет решаться на каждом шаге интегрирования с помощью метода Ньютона:

$$\begin{cases} \Psi(X^{(k)}, Y^{(k)}) = 0, \\ \varphi(X^{(k)}, Y^{(k)}) = 0. \end{cases} \quad (69)$$

На каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений организуется итерационный процесс по методу Ньютона, на каждой итерации решается система матричных уравнений, где определяются приращения переменных:

$$\begin{pmatrix} \frac{d\Psi}{dX} & \frac{d\Psi}{dY} \\ \frac{d\varphi}{dX} & \frac{d\varphi}{dY} \end{pmatrix}_{(i-1)} \begin{pmatrix} \Delta X_{(i)} \\ \Delta Y_{(i)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \Psi(X_{(i-1)}, Y_{(i-1)}) \\ \varphi(X_{(i-1)}, Y_{(i-1)}) \end{pmatrix}, \quad (70)$$

где i – индекс итерации [6].

Для анализа переходных процессов в исследуемой системе была реализована про-

грамма для проведения вычислительных экспериментов.

В целях рассмотрения всех особенностей поведения электрической системы в динамике при использовании регулируемого в функции тока сопротивления $X_{УПК}(I)$ расчеты проводились по полной математической модели, а в качестве возмущения исходного режима использовались изменения активной мощности генераторов фиксированной величины, как наиболее распространенные возмущения.

Для выявления влияния характеристики управляемого УПК на переходные процессы все результаты расчетов сравнивались с результатами, полученными для переходного процесса при постоянной степени компенсации, что осуществлялось введением коэффициента $K_2 = 0$ в соотношение (62).

Результаты расчетов переходного процесса по полной математической модели с учетом электромагнитных переходных процессов в статорных цепях и элементах электропередачи представлены на рис. 3. Анализ кривых изменения взаимного угла между векторами ЭДС генераторов в переходном режиме показал существенное влияние на переходный процесс наличия в УПК управляемой емкости, при которой величина сопротивления $X_{УПК}(I)$ зависит от тока линии, а следовательно, от передаваемой мощности. С ростом передаваемой мощности растет ток линии, а следовательно, и степень компенсации, что приводит к увеличению тормозящего момента, вследствие чего колебания взаимного угла затухают раньше, имеют меньшую амплитуду, переход к новому установившемуся режиму, который наблюдается при меньшем значении угла, происходит быстрее. В данном случае очевидно, что применение управляемой емкости в УПК увеличивает предел передаваемой мощности по условию сохранения динамической устойчивости.

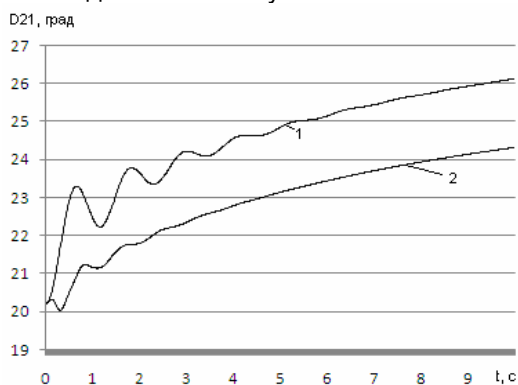


Рис. 3. Кривые изменения угла между роторами генераторов при изменении мощностей турбин СМ: 1 – $X_{УПК}(I) = const$; 2 – для закона регулирования

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(31,8 - 4I)}$$

Обеспечение требуемых статических характеристик системы, а также статической устойчивости возможных режимов системы с за-

данным запасом является одним из основных требований, предъявляемых к автоматическим устройствам в электроэнергетике.

В данном случае этим требованиям должно удовлетворять устройство продольной компенсации с управляемой емкостью, то есть оно должно обеспечивать увеличение пределов передаваемой мощности электропередач и коэффициентов запаса статической устойчивости. Расчеты статических характеристик выполнялись по полной математической модели, представленной выше.

На рис. 4 показана зависимость модуля падения напряжения в связи $|N(I)|$ для различных законов регулирования, на рис. 5 – угловые характеристики мощности. Некоторые угловые характеристики имеют форму петли. Это обусловлено тем, что зависимость $|N(I)|$ определена не для всех значений N в диапазоне взаимных углов δ_{21} от 0° до 180° . Участку а – б зависимости $|N(I)|$ соответствуют участки а – б петлеобразной угловой характеристики $P_2(\delta_{21})$ и а' – б' зависимости $P_1(\delta_{21})$, а участку б – с зависимости $|N(I)|$ – участки б – с и б' – с' зависимостей $P_2(\delta_{21})$ и $P_1(\delta_{21})$ соответственно. Точки в и в' угловых характеристик соответствуют точке б зависимости $|N(I)|$. Значение экстремального тока зависимости $|N(I)|$ определяется из соотношения $\frac{\partial |N|}{\partial I} = 0$. Таким обра-

зом, зависимость модуля падения напряжения в связи $|N(I)|$ позволяет идентифицировать рабочие части угловых характеристик активной мощности генераторов, которые соответствуют условию $\frac{\partial |N|}{\partial I} > 0$. Угловые характеристики

$P_1(\delta_{21})$ и $P_2(\delta_{21})$ показывают увеличение предельного по статической устойчивости взаимного угла δ_{21} в зависимости от закона регулирования сопротивления $X_{УПК}(I)$, а также увеличение предела передаваемой мощности по сравнению с нерегулируемым сопротивлением. Особый интерес представляет петлеобразный вид зависимостей $P_1(\delta_{21})$ и $P_2(\delta_{21})$ в диапазоне углов от 0° до 180° , обусловленный, как отмечалось выше, тем, что ветвь а–б–с зависимости $|N(I)|$ не достигает значения N_{\max} , соответствующего 180° . Это явление имеет место в силу феррорезонансного характера зависимости $|N(I)|$. Однако этого можно избежать, если выбрать закон регулирования соответствующим образом, а именно: коэффициент при токе должен быть таким, чтобы зависимость $|N(I)|$ на участке а–б–с достигала значения N_{\max} [4].

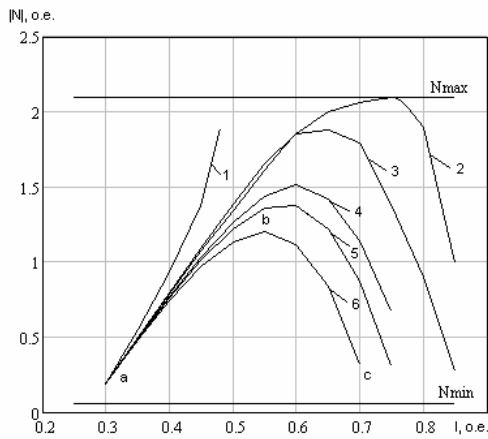


Рис. 4. Зависимости $|N(I)|$ для различных законов регулирования $X_{УПК}(I)$: 1 – $X_{УПК}(I) = \text{const}$; 2 – для закона регулирования

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(36,6 - 8I)}; \quad 3 -$$

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(37,2 - 8,5I)}; \quad 4 - X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(38,4 - 9,5I)};$$

$$5 - X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(39 - 10I)}; \quad 6 - X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(40,2 - 11I)}$$

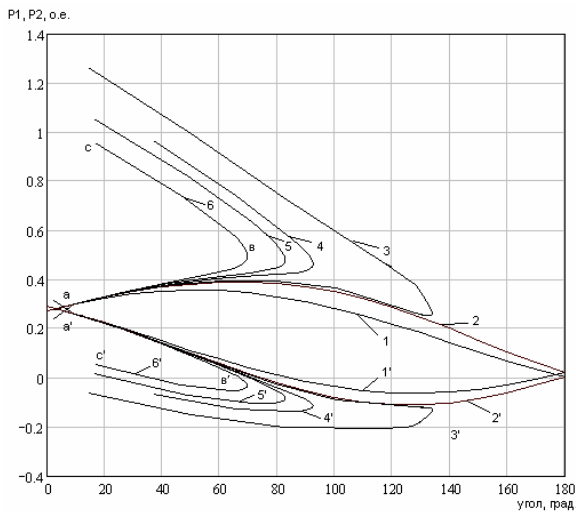


Рис. 5. Угловые характеристики для различных законов регулирования $X_{УПК}(I)$: 1, 1' – P2, P1 соответственно при $X_{УПК}(I) = \text{const}$;

$$2, 2' - \text{для закона регулирования } X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(36,6 - 8I)};$$

$$3, 3' - X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(37,2 - 8,5I)}; \quad 4, 4' -$$

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(38,4 - 9,5I)}; \quad 5, 5' - X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(39 - 10I)};$$

$$6, 6' - X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(40,2 - 11I)}$$

Анализ статических характеристик исследуемой системы при различных законах регулирования УПК необходим для выбора оптимальных параметров регулирования устройства в целях улучшения устойчивости и отстройки от режимов с резонансными переходами. При построении зависимостей $|N(I)|$ и угловых характеристик активной мощности ис-

пользовались различные способы утяжеления режимов: по взаимному углу δ_{21} и по току через УПК. В обоих случаях получились идентичные кривые, что свидетельствует о достоверности результатов и корректности модели.

Апериодическая статическая устойчивость любой сложной электроэнергетической системы определяется лишь знаком свободного члена характеристического уравнения:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0.$$

Критерием аperiодической статической устойчивости рассматриваемой системы является положительность свободного члена $a_n > 0$ и предельный по аperiодической статической устойчивости режим, соответствующий условию $a_n = 0$ [7]. С увеличением коэффициента K_2 характеристики $X_{УПК}(I)$ (рис. 6) смена знака свободного члена характеристического уравнения происходит при больших значениях взаимного угла δ_{21} , что говорит о положительном влиянии регулируемого УПК на аperiодическую статическую устойчивость системы.

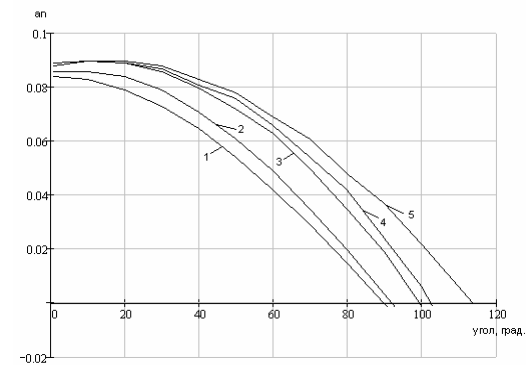


Рис. 6. Кривые изменения значений свободного члена a_n характеристического уравнения рассматриваемой системы для различных законов регулирования $X_{УПК}(I)$: 1 – $X_{УПК}(I) = \text{const}$; 2

$$- \text{для закона регулирования } X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2 \cdot (31,8 - 4I)}; \quad 3 -$$

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(36,6 - 8I)}; \quad 4 - X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(37,2 - 8,5I)}; \quad 5 -$$

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_2(37,8 - 9I)}$$

Заключение

Анализ полученных статических характеристик свидетельствует об увеличении предела передаваемой мощности электропередачи за счет применения регулируемой продольной компенсации.

Анализ переходных процессов в электрической системе при больших возмущениях показал, что использование в УПК управляемой емкости существенно улучшает динамическую устойчивость системы при выбранных соответствующим образом характеристиках элемента.

Анализ установившихся режимов в электрической системе при малых возмущающих

воздействиях показал, что использование в УПК управляемой емкости существенно улучшает апериодическую статическую устойчивость системы при выбранных соответствующим образом характеристиках элемента.

Представляет научный интерес совместное использование критериев $\frac{\partial |N|}{\partial t} > 0$ и $a_n > 0$ соответственно для идентификации рабочих участков угловых характеристик генераторов и оценки апериодической статической устойчивости.

Список литературы

1. Голов В.П., Мартиросян А.А. Устойчивость электрической системы с управляемой линией электропередачи: Тр. ИГЭУ «Повышение эффективности работы ТЭС и энергосистем» / под ред. А.В. Мошкарина, В.А. Шуина, Е.С. Целищева; Иван. гос. энерг. ун-т. Вып. 2. – Иваново, 1997. – С. 211–214.
2. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т. / под общ. ред. А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012.
3. Мартиросян А.А. Повышение устойчивости электроэнергетических систем с применением регулируемой продольной компенсации: дис... канд. техн. наук: 05.14.02 : защищена 28.06.09 : утв. 10.09.09. – Иваново, 2009. – 146 с.
4. Голов В.П. Применение регулируемой компенсации линии электропередачи // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. – № 6. – С. 3–8.
5. Строев В.А., Шульженко С.В. Математическое моделирование элементов электрических систем: курс лекций. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.

Голов Валерий Павлович,

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

Мартиросян Акол Арамаисович,

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

Москвин Илья Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры электрических систем, e-mail: moskvin_ilya@mail.ru

Виноградова Анастасия Андреевна,

ОАО «ФСК ЕЭС», инженер МЭС Центра, e-mail: moskvin_ilya@mail.ru

6. Строев В.А., Голов П.В. Модели для исследования переходных процессов в сложной регулируемой ЭЭС // Изв. АН. Энергетика. – 2010. – № 6. – С. 66–74.

7. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985.

References

1. Golov, V.P., Martirosyan, A.A. Ustoychivost' elektricheskoy sistemy s upravlyаемoy liniey elektroperedachi [Electric system with an operated power line stability], in *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty TES i energosistem»* [Stability of Electrical System with Controlled Electric Power Line]. Ivanovo, 1997, vol. 2, pp. 211–214.
2. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy* [Unified power system electric networks of super and ultrahigh voltage of Russia. Theoretical and practical bases]. Moscow, NTF «Energoprogress» Korporatsii «EEEK», 2012.
3. Martirosyan, A.A. *Povyshenie ustoychivosti elektroenergeticheskikh sistem s primeneniem reguliruemoy prodol'noy kompensatsii* dis... kand. tehn. nauk [Increasing Power Engineering Systems Stability with Controlled Series Compensation Usage]. Ivanovo, 2009. 146 p.
4. Golov, V.P. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1978, no. 6, pp. 3–8.
5. Stroeve, V.A., Shul'zhenko, S.V. *Matematicheskoe modelirovanie elementov elektricheskikh sistem: kurs lektsiy* [Mathematical Simulation of Electric Systems Elements]. Moscow, Izdatel'stvo MEI, 2002.
6. Stroeve, V.A., Golov, P.V. *Izvestiya AN. Energetika*, 2010, no. 6, pp. 66–74.
7. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transitional Electromechanical Processes in Electric Systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985.