

Синтез алгоритма управления СТАТКОМ на основе линейных матричных неравенств

Абдурахманов А.М, Зимин К.А.

ОАО “Научно-технический центр ФСК ЕЭС”
г. Москва, Российская Федерация
abdurahmanov@ntc-power.ru

Рябченко В.Н.

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
г. Москва, Российская Федерация
ryabchenko.vn@gmail.com

Аннотация. Рассматривается синтез управления энергосистемой с устройствами FACTS с целью демпфирования колебаний перетоков мощности. Синтез передаточной функции регулятора энергосистемы на основе СТАТКОМ, обеспечивающего требуемую степень демпфирования колебаний перетоков мощности, осуществляется на основе линейных матричных неравенств (ЛМИ). В случае регуляторов полного порядка синтез сводится к решению только ЛМИ, а в случае регулятора пониженного порядка – к поиску двух взаимнообратных матриц.

Ключевые слова: энергосистема, колебания перетоков мощности, устройства FACTS, СТАТКОМ, демпфирование, регулятор, линейные матричные неравенства (ЛМИ), матричный делитель нуля.

Современные электроэнергетические системы (энергосистемы) являются сложными динамическими системами с глубокими взаимными связями. Для решения задач управления и защиты в современных энергосистемах широко используются микроэлектроника, компьютеры и высокоскоростные каналы связи. Однако быстродействие силовых управляющих схем в современных энергосистемах ограничено инерционностью механических переключателей. Бурное развитие силовой электроники привело к созданию быстродействующих тиристорно-управляемых устройств, а на их основе – технологии управляемых гибких электропередач переменного тока или Flexible AC Transmission Systems (FACTS) [1-3].

Основная задача технологии FACTS заключается в обеспечении научно-технического прорыва в электроэнергетике с целью улучшения управления потоками мощности в сети как в установившихся, так и в переходных режимах энергосистемы. Технология FACTS открывает новые возможности для управления потоками мощности. Эти возможности возникают благодаря способности исполнительных устройств технологии FACTS управлять взаимосвязанными параметрами, определяющими функционирование электропередач, включая реактивное сопротивление, ток, напряжение, углы фазовых сдвигов в узлах сети, затухание колебаний на различных частотах и т.д. Устройства FACTS способны обеспечивать пропускную способность электропередач вплоть до допустимого теплового предела.

Наиболее перспективными считаются следующие типы устройств FACTS: тиристорно-управляемое устройство продольной компенсации (ТУУПК), устройство поперечной компенсации на преобразователях напряжения СТАТКОМ, объединенный регулятор потока мощности (ОРПМ), фазовращающий трансформатор (ФВТ), тиристорно-управляемый шунтирующий реактор (УШРТ) и др.

В данной статье рассматривается метод синтеза динамических регуляторов энергосистемы с устройствами FACTS в виде СТАТКОМ с целью демпфирования колебаний перетоков мощности. Регуляторы синтезируются по выходу для линейного дискретного объекта управления и имеют заданный порядок. В основе метода синтеза лежит известный факт, что стабилизируемость дискретного объекта равносильна существованию квадратичной функции, удовлетворяющей неравенству Ляпунова относительно неизвестной матрицы \mathcal{P} и матрицы параметров регулятора Θ . Разрешимость неравенства Ляпунова эквивалентна разрешимости двух линейных матричных неравенств (ЛМН) относительно двух взаимнообратных матриц. Таким образом, синтез регуляторов по выходу сводится к тому, чтобы найти две взаимнообратные матрицы, удовлетворяющие линейным матричным неравенствам. Для решения этой задачи разработаны различные алгоритмы [4]. Если такие взаимнообратные матрицы найдены, то матрица параметров регулятора находится как решение неравенства Ляпунова относительно неизвестной матрицы Θ . Указанный способ построения регуляторов представляет собой некоторые трудности из-за высокого порядка матриц, входящих в ЛМН. Однако, существует возможность упрощения решения задачи за счет понижения порядка этих блочных матриц [5]. В результате синтез стабилизирующих регуляторов по выходу сводится к тому, чтобы найти две матрицы, являющиеся соответствующими блоками взаимнообратных матриц и удовлетворяющие линейным матричным неравенствам. В частном случае (при построении регулятора полного порядка) задача сводится к решению только ЛМН.

Рассмотрим полностью управляемую энергосистему, линейная модель которой может быть аппроксимирована дискретными уравнениями,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{v}(t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ – вектор состояния энергосистемы; $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^r$ – вектор сигналов управления; $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m$ – вектор выходных сигналов (параметров режима); \mathbf{R} – множество действительных чисел.

Пусть характеристический полином матрицы состояния \mathbf{A} равен

$$\det(\lambda \mathbf{E}_n - \mathbf{A}) = \lambda^n + \alpha_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_1 \lambda + \alpha_0, \quad (2)$$

где \mathbf{E}_n – единичная матрица порядка n ; $\lambda \in \mathbf{C}$ и \mathbf{C} – множество комплексных чисел.

Напомним, что согласно критерию Зубова [6] все корни характеристического полинома некоторой матрицы F расположены в левой полуплоскости комплексной плоскости (линейная система с такой матрицей состояния статически устойчива), у функционально преобразованной матрицы

$$\tilde{F} = E_n - 2(F - E_n)^{-1}$$

корни ее характеристического полинома $\det(\lambda E_n - \tilde{F})$ лежат строго внутри единичного круга на комплексной плоскости.

Будем далее считать, что с помощью регулятора на основе устройства FACTS требуется обеспечить управляемой энергосистемы характеристический полином

$$\lambda^n + \beta_{n-1}\lambda^{n-1} + \dots + \beta_1\lambda + \beta_0, \quad (3)$$

где коэффициенты β_i имеют такие значения, что все корни полинома (3) лежат строго внутри единичного круга на комплексной плоскости. В этом случае управляемая энергосистема с дискретной моделью (1) будет являться статически устойчивой.

В регуляторе демпфирования колебаний мощности энергосистемы (РДКМ) входными сигналами являются локальные сигналы в виде активной мощности и/или напряжения на линии в месте подключения устройства FACTS. Выходом РДКМ является сигнал компенсации.

В общем случае в энергосистеме могут использоваться два типа регуляторов, непосредственно управляющих демпфированием колебаний перетоков мощности: приставки к АРВ и РДКМ. Приставки к АРВ воздействует на колебания мощности через систему возбуждения генератора (посредством дополнительных сигналов управления, подаваемых на автоматические регуляторы возбуждения – АРВ). Основная цель приставки к АРВ заключается в улучшении демпфирования электромеханических колебаний посредством формирования дополнительной к АРВ составляющей электрического момента пропорционально изменению скорости вращения турбины. Как правило, приставки к АРВ предназначены для демпфирования локальных электромеханических колебаний. Однако в больших энергосистемах в силу упомянутой локальности действия такие стабилизаторы могут не справиться с демпфированием межсистемных колебаний. В этом случае использование технологии FACTS позволяет эффективно управлять демпфированием как локальных, так и межсистемных колебаний.

Известно, что уравнение $\det(\lambda E_n - A) = 0$ является характеристическим уравнением для матрицы состояния энергосистемы A . Значения λ , удовлетворяющие этому уравнению, совпадают с собственными значениями матрицы A и определяют собственные моды колебаний энергосистемы. В современных энергосистемах поддержание устойчивости колебаний является в большей степени проблемой, относящейся к эффективному демпфированию. Это относится к устойчивости мод колебаний следующих типов:

1. Локальные моды, которые определяются электромеханическими колебаниями на генерирующей станции относительно остальной части энергосистемы. Термин «локальные» здесь используется, т.к. эти колебания локали-

зованы в пределах одной станции или в небольшой части энергосистемы;

2) Межсистемные моды определяются колебаниями множества синхронных машин в одной области энергосистемы. Они вызваны двумя или более группами тесно связанных синхронных машин, которые взаимодействуют с другим группами через относительно слабые соединения;

3) Моды регуляторов, которые определяются динамическими устройствами управления. Недостаточно настроенные возбудители, регуляторы скоростей вращения, преобразователи постоянного тока высокого напряжения и статические компенсаторы реактивной мощности являются основными причинами неустойчивости этих мод;

4) Моды крутильных колебаний, которые вызываются вращающимися элементами системы валопроводов турбогенераторов. Неустойчивость крутильных колебаний может быть вызвана взаимодействием органов управления возбуждением, регуляторов скоростей вращения, преобразователей постоянного тока высокого напряжения и батарей конденсаторов, линий электропередачи с последовательной компенсацией.

Для реализации управления выбранной модой колебаний с помощью обратной связи рассматриваемая модель энергосистемы должна быть, как управляемая по выбранному входу, так и наблюдаема по выбранному выходу.

Условие полной управляемости энергосистемы с моделью (1) означает линейную независимость строк прямоугольной матрицы управляемости

$$(B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B). \quad (4)$$

Условие полной наблюдаемости энергосистемы с моделью (1) означает линейную независимость строк прямоугольной матрицы наблюдаемости

$$(C^T \mid A^T C^T \mid \dots \mid (A^T)^{n-1} C^T). \quad (5)$$

Будем в дальнейшем считать, что эти условия выполняются.

Задача стабилизации энергосистемы с моделью (1) по измеренным выходным сигналам состоит в построении динамического регулятора k -го порядка вида

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_p(t+1) &= A_p \mathbf{x}_p(t) + B_p \mathbf{y}(t), \\ \mathbf{y}_p(t) &= C_p \mathbf{x}(t) + D_p \mathbf{y}(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\mathbf{x}_p \in \mathbf{R}^{n_p}$ – вектор состояния динамического регулятора (устройства FACTS); $\mathbf{y}_p \in \mathbf{R}^r$ – вектор выходных сигналов регулятора, обеспечивающего статическую устойчивость управляемой энергосистемы.

При включении устройства FACTS в сеть функционирование энергосистемы можно описать следующей дискретной моделью

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}(t+1) \\ \mathbf{x}_p(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A + B D_p C & B C_p \\ B_p C & A_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}_p(t) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Введем в рассмотрение для некоторой матрицы M матрицу M^\perp , которая удовлетворяет уравнению

$$M \cdot M^\perp = 0 \quad (8)$$

и называемую (правым) делителем нуля. Если матрица M имеет размер $m \times n$ и ранг r , то будем считать, что матрица M^\perp имеет ранг $n - r$ [7].

Известно следующее утверждение [8].

Пусть дано ЛМН

$$H + G^T \Theta^T F + F^T \Theta G < 0, \quad (9)$$

где Θ – неизвестная матрица; $H = H^T$, F и G – заданные матрицы. Если F и G имеют неполные ранги, то неравенство (9) разрешимо относительно матрицы Θ тогда и только тогда, когда разрешимы неравенства

$$(G^\perp)^T H G^\perp < 0, \quad (F^\perp)^T H F^\perp < 0. \quad (10)$$

Таким образом, разрешимость ЛМН (9) непосредственно связано с разрешимостью ЛМН (10), где G^\perp – делитель нуля матрицы G , а H^\perp – делитель нуля матрицы H .

Приведем также необходимую нам в дальнейшем лемму Шура [9].

Блочная матрица

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix}, \quad P = P^T \quad (11)$$

положительно определена ($P > 0$) тогда и только тогда, когда

$$\begin{cases} P_{11} > 0, \\ P_{22} - P_{12}^T P_{11}^{-1} P_{12} > 0, \end{cases} \quad (12)$$

или

$$\begin{cases} P_{22} > 0, \\ P_{11} - P_{21}^T P_{22}^{-1} P_{21} > 0. \end{cases} \quad (13)$$

Рассмотрим далее два характерных способа построения РДКМ на основе ЛМИ. За основу выберем подход, описанный в [5].

Способ 1. В этом случае используется следующий факт.

Полностью управляемая и наблюдаемая энергосистема с линейной дискретной моделью (1) стабилизируется с помощью РДКМ (6) заданного порядка $k < n$ тогда и только тогда, когда существуют взаимнообратные матрицы

$$P = P^T > 0, \quad P \in \mathbf{R}^{(n+k) \times (n+k)}, \quad (14)$$

$$D = D^T > 0, \quad D \in \mathbf{R}^{(n+k) \times (n+k)}, \quad (15)$$

удовлетворяющие условию $PD = E_n$ и следующим ЛМН

$$\begin{pmatrix} 0 & E_n \\ C^\perp & 0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} -D & A \\ A^T & -P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & E_n \\ C^\perp & 0 \end{pmatrix} < 0, \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} (B^T)^\perp & 0 \\ 0 & E_n \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} -D & A \\ A^T & -P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (B^T)^\perp & 0 \\ 0 & E_n \end{pmatrix} < 0. \quad (17)$$

Если условия (16), (17) выполнены и матрицы P , D найдены, то параметры искомого РДКМ (6) находятся как решения ЛМИ (9), где

$$H = \begin{pmatrix} -D & A \\ A^T & -P \end{pmatrix}, \quad G = (0 \mid C), \quad F = (B^T \mid 0), \quad \Theta = \begin{pmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Отметим, что задача поиска двух взаимнообратных матриц P , D существенно усложняется по мере роста размерности моделей энергосистемы и РДКМ. Поэтому с целью упрощения задачи можно воспользоваться блочной структурой этих матриц (см. (16) и (17)) и леммой Шура (11)-(13).

Способ 2. Этот способ основан на следующем утверждении.

Полностью управляемая и наблюдаемая энергосистема с линейной дискретной моделью (1) стабилизируется с помощью РДКМ (6) заданного порядка $k < n$ тогда и только тогда, когда существуют взаимнообратные матрицы

$$P_{11} = P_{11}^T > 0, \quad P_{11} \in \mathbf{R}^{n \times n}, \quad (19)$$

$$D_{11} = D_{11}^T > 0, \quad D_{11} \in \mathbf{R}^{n \times n}, \quad (20)$$

являющиеся блоками соответствующих взаимнообратных матриц P , D и удовлетворяющие ЛМН

$$(C^\perp)^T (A^T P_{11} A - P_{11}) C^\perp < 0, \quad (21)$$

$$\left((B^T)^\perp \right)^T (A D_{11} A^T - D_{11}) \left((B^T)^\perp \right)^T < 0, \quad (22)$$

$$\text{rank}(E_n - P_{11} D_{11}) \leq k, \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} P_{11} & E_n \\ E_n & D_{11} \end{pmatrix} \geq 0. \quad (24)$$

Если условия (21)-(24) выполнены и матрицы P_{11} , D_{11} найдены, то параметры искомого РДКМ (6) находятся как решения ЛМИ (9), где

$$H = \begin{pmatrix} -D & A \\ A^T & -P \end{pmatrix}, \quad G = (0 \mid C), \quad F = (B^T \mid 0), \quad \Theta = \begin{pmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{pmatrix}, \quad (25)$$

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{11} - D_{11}^{-1} \\ P_{11} - D_{11}^{-1} & P_{11} - D_{11}^{-1} \end{pmatrix}.$$

Отметим, что в случае синтеза РДКМ полного порядка ($k = n$) условие (23) выполняется всегда, поэтому необходимо проверять лишь условия (21), (22) и (24). Проверка этих условий может быть осуществлена с помощью функции *feaspr* тулбокса LMI программы MATLAB. Если эти условия оказываются выполненными, то матрица Θ параметров РДКМ может быть найдена с помощью функции *basiclmi* тулбокса LMI программы MATLAB, которая используется для решения ЛМН (9).

В качестве расчетного примера рассмотрим синтез РДКМ на основе СТАТКОМ. На рис. 1 приведена схема 9-узловой модели трехмашинной энергосистемы [10]. На рис. 2 представлено потокораспределение в исходном режиме.

Параметры генераторов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры генераторов модели энергосистемы

Параметры	Г1*	Г2**	Г3**
Номинальная мощность $P_{ном}$, МВА	247,5	192,0	128,0
Напряжение $U_{ном}$, кВ	16,5	18,0	13,8
Частота вращения n , об/мин	180	3600	3600
x_d	0,146	0,8958	1,3125
x'_d	0,0608	0,1198	0,1813
x_q	0,0969	0,8645	1,2578
x'_q	0,0969	0,1969	0,25
$x_{рас}$	0,0336	0,0521	0,0742
T_{d0}	8,96	6,00	5,89
T_{q0}	0	0,535	0,600
Запасенная энергия при $f_{ном}$, МВт·с	2364	640	301
$\cos \varphi$	1,0	0,85	0,85

* гидрогенератор; ** турбогенератор.

Примечание: Реактивные сопротивления даны в относительных единицах (о.е.). Все постоянные времени даны в секундах.

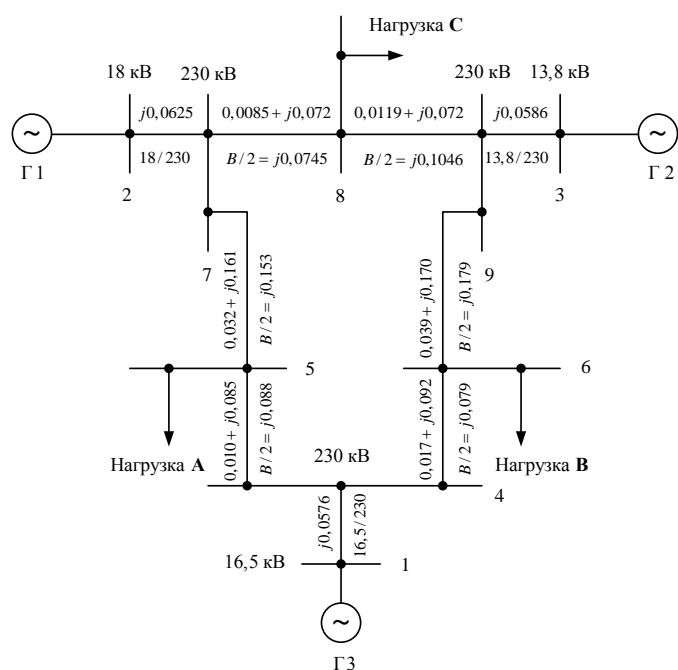


Рис. 1. Схема замещения 9 узловой энергосистемы (все сопротивления отнесены к базовому значению мощности 100 МВА)

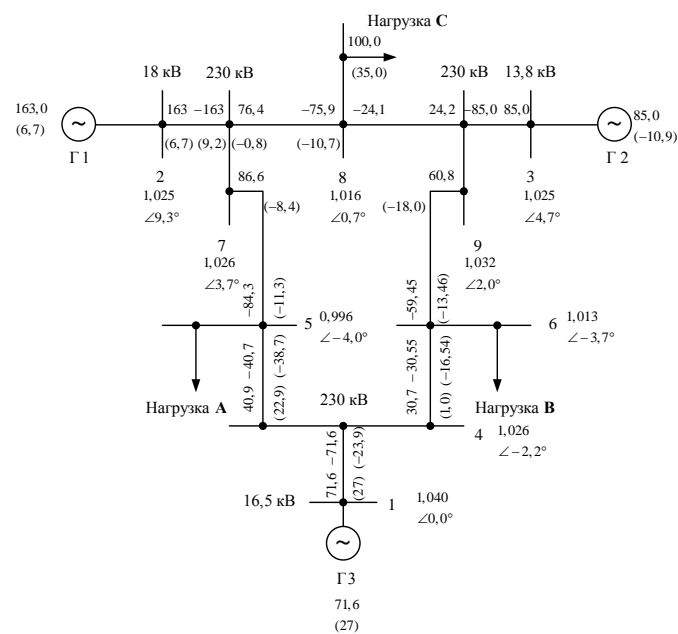


Рис. 2. Потокораспределение в исходном режиме 9 узловой энергосистемы (все перетоки даны в МВт и МВА)

Вектор состояния линейной модели ЭЭС имеет вид

$$\mathbf{x} = (s_1 \parallel E'_{q,2} \parallel E'_{d,2} \parallel s_2 \parallel E'_{q,3} \parallel E'_{d,3} \parallel s_3 \parallel \delta_{12} \parallel \delta_{13})^T,$$

где $s_1(t), s_2(t), s_3(t)$ – скольжения синхронных генераторов Г1, Г2 и Г3; $E'_{q,i}(t), E'_{d,i}(t)$ – продольные ЭДС генераторов Г2 и Г3; $\delta_{12}(t), \delta_{13}(t)$ – разность фазных углов напряжений на шинах генераторов.

Собственные значения матрицы состояния A (моды колебаний системы) составляют множество чисел

$$\text{eig}(A) = \{-0,0027 \pm 0,0346 \cdot j; -0,0006 \pm 0,023 \cdot j; -0,0002 \pm 0,0001 \cdot j; -0,0166; -0,0104; -0,0005\}. \quad (26)$$

Как видно из соотношения (26), рассматриваемая модель энергосистемы является статически устойчивой.

Спектральные свойства исходной системы характеризует поверхность ε -спектра [11-13], приведенная на рис. 3, а. Видно, что моды колебаний энергосистемы находятся достаточно близко к мнимой оси комплексной плоскости, т.е. система имеет малый запас по статической устойчивости.

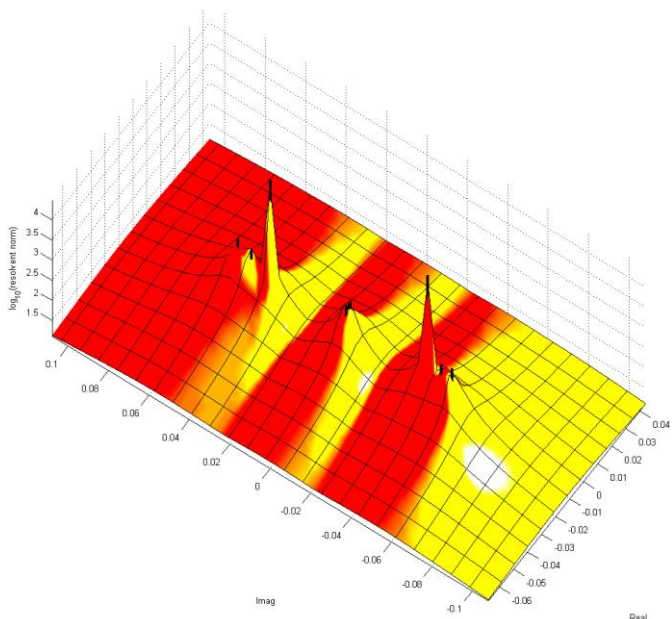
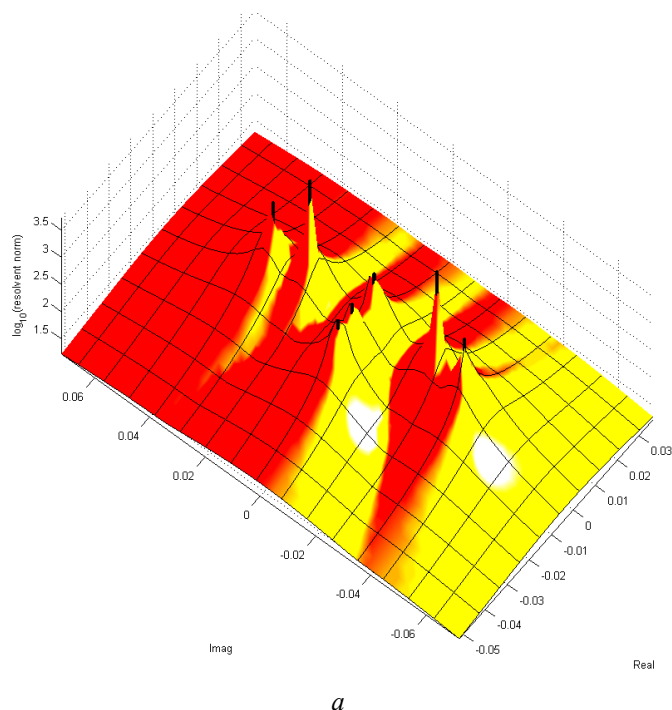


Рис. 3. ε -спектр 9 узловой энергосистемы: а – без СТАТКОМА; б – с подключением СТАТКОМА

Будем считать, что СТАТКОМ подключен к шине 8 и предназначен для увеличения степени демпфирования

межсистемных колебаний. В результате проведенных расчетов были выбраны параметры регулятора порядка $k=4$, обеспечивающие следующие собственные значения матрицы состояния компенсированной энергосистемы:

$$\{-0,015 \pm 0,053 \cdot j; -0,014 \pm 0,047 \cdot j; -0,012 \pm 0,039 \cdot j; -0,011; -0,012; -0,014\}. \quad (27)$$

Спектральные свойства управляемой системы характеризует ε -спектр на рис. 3, б. Здесь моды колебаний энергосистемы существенно удалены от мнимой оси комплексной плоскости, т.е. система увеличила запас по статической устойчивости. Выположивание поверхности ε -спектра по сравнению с графиком на рис. 3, а свидетельствует об увеличении степени робастности. При этом сравнение множеств (26) и (27) показывает, что синтезированный на основе ЛМН регулятор также повысил степень демпфирования мод колебаний компенсированной энергосистемы.

В заключение отметим, что метод ЛМН является результативным прикладным методом синтеза регуляторов энергосистемы на основе устройства FACTS. Синтезированные с его помощью устройства FACTS регуляторы энергосистемы способны обеспечивать желаемое демпфирование конкретных мод колебаний и обеспечивать высокую степень робастности энергосистемы к различным действующим возмущениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочкин В.И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. / В.И. Кочкин, О.П. Нечаев. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2000.
2. FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks. / E. Acha, C.R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Pérez, C. Angeles-Camacho. – John Wiley & Sons, 2004.

3. Hingorani N.G. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. / N.G. Hingorani, L. Gyugyi. – IEEE Press, 2000.

4. Баландин Д.В. Синтез регуляторов на основе решения линейных матричных неравенств и алгоритма поиска взаимнообратных матриц / Д.В. Баландин, М.М. Коган // Автоматика и телемеханика. – 2005. – №1.

5. Кривдина Л.Н. Стабилизация дискретных объектов по выходу на основе линейных матричных неравенств // Информатика и системы управления. – 2006. – №2.

6. Зубов В.И. Устойчивость движения. – М.: Высшая школа, 1984.

7. Мисриханов М.Ш., Алгебраические и матричные методы в теории линейных ММО-систем / М.Ш. Мисриханов, В.Н. Рябченко // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 5. – С. 196-240.

8. Gahinet P. A linear matrix inequality approach to H_∞ control / P. Gahinet, P. Apkarian // International Journal of Robust and Nonlinear control. – 1994. – vol. 4. – P. 421-448.

9. Bernstein D.S. Matrix mathematics. – Princeton Univ. Press, 2009.

10. Андерсон П. Управление энергосистемами и устойчивость. / П. Андерсон, А. Фуад. – М.: Энергия, 1980.

11. Trefethen L.N. Computation of pseudospectra // Acta Numerica. – 1999. – no.8. – P. 247-295.

12. Tisseur F. Backward error and condition of polynomial eigenvalue problems // Linear Algebra Appl. – 2000. – vol. 309. – P. 339-361.

13. Мисриханов М.Ш. Квадратическая проблема собственных значений в электроэнергетике / М.Ш. Мисриханов, В.Н. Рябченко // Автоматика и телемеханика. – 2006. – №5. – С. 24-47.

Synthesis of STATCOM Control Algorithm Based on Linear Matrix Inequalities

Abdurahmanov A.M., Zimin K.A.

R&D Center FGS UES
Moscow, Russian Federation
abdurahmanov@ntc-power.ru

Ryabchenko V.N.

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation
ryabchenko.vn@gmail.com

Abstract. Is examined the method of the synthesis of control of power system with the devices FACTS for the purpose of oscillation damping of the overflows of power. The synthesis of the transfer function of the regulator of power system on the basis of the STATCOM, which ensures the required degree of damping of the fluctuations of the overflows of power, is achieved on the basis of linear matrix inequalities (LMI). In the case of the regulators of complete order the synthesis is reduced to the solution only of LMI, while in the case of the regulator of the lowered order - to the search for two mutually-reverse matrices.

Keywords: power system, fluctuations in power flow, device of FACTS, STATCOM, damping control, linear matrix inequality (LMI), matrix zero divisor.

REFERENCES

1. Kochkin V.I., Nechayev O.P. *Primeneniye staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh energosistem i predpriyatiy* [The use of static reactive power compensators in electric networks of power systems and enterprises], Moscow, Publishing House of the NTs ENAS, 2000. (in Russ.)
2. Acha E., Fuerte-Esquivel C.R., Ambriz-Pérez H., Angeles-Camacho C. *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*, John Wiley & Sons, 2004.
3. Hingorani N.G., Gyugyi L. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press, 2000.

4. Balandin D.V., Kogan M.M. Synthesis of controllers on the basis of the solution of linear matrix inequalities and the search algorithm mutually inverse matrices [Sintez regulyatorov na osnove resheniya lineynykh matrichnykh neravenstv i algo-ritma poiska vzaimnoobratnykh matrits], *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 2005, no.1. (in Russ.)

5. Krivdina L.N. Stabilization of discrete objects to enter the basis of linear matrix inequalities [Stabilizatsiya diskretnykh obyektoy po vykhodu na osnove lineynykh matrichnykh neravenstv], *Informatika i sistemy upravleniya [Informatics and control systems]*, 2006, no.2. (in Russ.)

6. Zubov V.I. *Ustoychivost dvizheniya* [Resistance movement], Moscow, Vysshaya shkola, 1984. (in Russ.)

7. Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N. Algebraic and matrix methods in the theory of linear MIMO-systems, *Herald of ISPU*, 2005, is. 5. pp. 196-240. (in Russ.)

8. Gahinet P., Apkarian P. A linear matrix inequality approach to H_∞ control, *International Journal of Robust and Nonlinear control*, 1994, vol. 4, pp. 421-448.

9. Bernstein D.S. *Matrix mathematics*, Princeton Univ. Press, 2009.

10. Anderson P., Fuad A. *Upravleniye energosistemami i ustoychivost* [Power systems management and sustainability], Moscow, Energy, 1980. (in Russ.)

11. Trefethen L.N. Computation of pseudospectra, *Acta Numerica*, 1999, no.8, pp. 247-295.

12. Tisseur F. Backward error and condition of polynomial eigenvalue problems, *Linear Algebra Appl*, 2000, vol. 309, pp. 339-361.

13. Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N. The quadratic eigenvalue problem in the power [Kvadraticheskaya problema sobstvennykh znacheniy v elektroenergetike], *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 2006, no.5, pp. 24-47. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Абдурахманов А.М. Синтез алгоритма управления СТАТКОМ на основе линейных матричных неравенств / А.М. Абдурахманов, К.А. Зимин, В.Н. Рябченко // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2016. – Т.3, №1. – С. 56-61.

Reference to article

Abdurahmanov A.M., Zimin K.A., Ryabchenko V.N. Synthesis of STATCOM control algorithm based on linear matrix inequalities, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2016, vol.3, no.1, pp. 56-61.