

НЕЧЕТКО ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ЛИНЕЙНО-КВАДРАТИЧНЫЙ ДЕМПФИРУЮЩИЙ РЕГУЛЯТОР НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ГРАМИАНА

Д.Е. Катаев

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: dekataev@ipu.ru

Е.Ю. Кутяков

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: evgeniykutyaakov@gmail.com

Ключевые слова: электроэнергетические системы, линейно-квадратичное управление, синтез регулятора, грамиан, спектральное разложение.

Аннотация: Рассматривается задача настройки линейно-квадратичного регулятора с избирательным подавлением опасных мод для обеспечения глобальной устойчивости в электроэнергетической сети. Представленный ранее подход развит с добавлением нечеткой избирательности и адаптацией к большому количеству оптимизационных методов.

1. Введение

Демпфирование межрайонных колебаний в электроэнергетических системах (ЭЭС) продолжает оставаться актуальной задачей, несмотря на то, что данный вид колебаний давно известен и хорошо изучен [7].

Системные стабилизаторы (PSS) являются одним из наиболее распространенных средств подавления колебаний в ЭЭС. Изначально PSS представляли из себя модуляторы, на вход которых подается локальный сигнал, например, частота или мощность генератора, а на выходе генерируется сигнал, синфазный с частотой управляемого генератора, который далее передается на автоматический регулятор напряжения [3]. И хотя эти устройства при правильных настройках и определенном режиме работы сети могут гасить и межрайонные колебания [8], чаще всего они демпфируют только локальные колебания, возникающие между одним генератором и остальной системой [10].

По мере развития средств мониторинга появились модификации PSS на случай

глобальных сигналов, то есть сигналов, приходящих на вход PSS не только от управляемого генератора, но и от других генераторов системы. Первые попытки использования глобальных сигналов для управления возбуждением генератора были предприняты достаточно давно. Так, например, в работе [2] предлагают двухуровневый стабилизатор: первый уровень представлен в виде традиционного PSS, функционирующего на основе локального сигнала угловой скорости ротора; второй уровень формируют стабилизаторы на основе глобальных сигналов (активная мощность линий или разность угловых частот генераторов). Эта идея была развита в последующих работах, и со временем такой тип управления получил название глобального управления демпфированием (WADC) [11].

Существует множество различных методов настройки глобальных регуляторов. Одним из наиболее популярных является линейно-квадратичный метод. В литературе имеется достаточно большое количество обобщений этого метода на случай различных возникающих на практике осложнений. Однако, основным недостатком линейно-квадратичных регуляторов является их склонность к демпфированию всех мод системы, в том числе и хорошо демпфированных, что часто ведет к избыточному использованию ресурсов.

В ответ на указанный недостаток в литературе появляются методы селективной настройки глобальных регуляторов, позволяющие выбирать конкретные моды, демпфирование которых следует увеличить, и не демпфировать те моды, которые хорошо компенсируются локальным PSS. Такую настройку можно выполнить различными способами: [6, 9], в том числе и с использованием метода спектральных разложений решений уравнений Ляпунова [1]. Последний метод ранее уже применялся для задачи селективной настройки линейно-квадратичного регулятора [5]. В данной работе мы развиваем идею селективной настройки глобального PSS с помощью спектральных разложений решений уравнений Ляпунова, расширяя ее на случай нечеткой избирательности.

2. Избирательное демпфирование на основе субграмианов и его нечеткая модификация

Рассмотрим линейную или линеаризуемую динамическую систему, представимую в виде:

$$(1) \quad \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t),$$

где A и B – действительнзначные матрицы, $x(t)$ и $u(t)$ – отклонения векторов состояния и управления от равновесной точки. Принимая во внимание большое количество различных управляющих устройств в ЭЭС, считаем, что $u(t)$ относится только к предлагаемому демпфирующему регулятору, а остальные управления неявно включены в A . Ограничим область рассмотрения случаем линейной статической обратной связи:

$$(2) \quad u(t) = -Kx(t),$$

где K – действительнзначная матрица обратной связи, описывающая предлагаемый регулятор.

Задача синтеза классического линейно-квадратичного регулятора с целевой функцией $J(K)$, как, например, в [4] может быть выражена через грамиан наблюдаемости P замкнутой системы:

$$(3) \quad J(K) = E\{x_0^T P x_0\} \rightarrow \min, (A - BK)^T P + P(A - BK) = -(Q + K^T R K),$$

где $E\{\cdot\}$ – математическое ожидание, Q – положительно полуопределенная матрица. Решение уравнения Ляпунова из (3) для системы (1), замкнутой регулятором (2) может быть разложено по спектру матрицы динамики замкнутой системы $\sigma(A - BK) = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ ([1]):

$$(4) \quad P = \sum_{i,j=1}^n P_{ij}, P_{ij} = -\left\{ \frac{R_i^* \tilde{Q} R_j}{\lambda_i^* + \lambda_j} \right\}_H, R_i = u_i v_i^T,$$

где $(\cdot)^*$ – комплексное сопряжение, $\{\cdot\}_H$ – эрмитова часть матрицы, R_i и R_j – матрицы вычетов, определяемые правыми собственными векторами столбцами u_i и левыми строками v_i^T матрицы $A - BK$. Каждая матрица P_{ij} в (4) называется парным субграмианом и отражает вклад пары (λ_i, λ_j) в асимптотическую вариацию энергии возмущения в системе, характеризуемой грамианом P .

В [5] предложен подход к избирательному демпфированию, основная идея которого заключается в выборе некоторого множества S критических мод (собственных чисел) $A - BK$ и, соответственно, использовании только относящихся к ним парных субграмианов в целевой функции. В оригинале предложено выбирать критические моды по четким правилам, т.е. функция принадлежности была булева. В силу того, что в процессе изменения значения K моды могут как выходить из множества, так и входить в него, это вызвало две проблемы: во-первых, в некоторых случаях бывшие критические моды могли группироваться прямо у границы заданной критической области, что нежелательно, во-вторых, целевая функция приобретала большое количество существенных разрывов. Поэтому, предлагаем нечеткий избирательный частичный грамиан P_S^f взамен четкого:

$$(5) \quad P_S^f = \sum_{i,j} \mu_i^S \mu_j^S P_{ij},$$

где μ_i^S и μ_j^S – произвольно определяемые нечеткие степени принадлежности i -ой или j -ой моды к критическому множеству S . Тогда постановка задачи оптимизации $J_S(K)$:

$$(6) \quad J_S(K) = E\{x_0^T P_S x_0\} \rightarrow \min$$

3. Результаты

В качестве тестовой использована модель ЭЭС IEEE 39. Вводные данные для эксперимента идентичны использованным в [5].

Использование нечеткой функции принадлежности мод к критическому множеству имеет эффект сглаживания на разрывную целевую функцию. Хотя целевая функция все еще остается негладкой, это позволяет полноценно использовать градиентные методы оптимизации, пусть и не вполне вычислительно эффективно.

Так, экспериментально подтверждена работоспособность квазиньютоновского алгоритма Бroyдена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно (BFGS, `fminunc` в MATLAB) при использовании нечеткого подхода. Но, во-первых, с градиентными методами невозможно провести сравнение хода оптимизации при использовании четкого и нечеткого подходов, а, во-вторых, целевая функция все еще негладкая, поэтому целесообразно использовать метод конфигураций (метод Хука–Дживса, `patternsearch` в MATLAB).

Проведено два идентичных вычислительных эксперимента, идентичных во всем, кроме формы определения критического множества S : четкой или нечеткой. В обоих случаях решалась задача оптимизации (6) (пусть здесь четкий случай будет частным случаем нечеткого). Четкая постановка привела к сходимости алгоритма за меньшее количество итераций, а сами итерации были короче по времени, так как целевая функция с четкой функцией принадлежности требует меньше вычислений. Однако, на рис. 1 видно, что для представленного генератора G3 переходные процессы, полученные для решения с четкой функцией принадлежности оказываются существенно хуже, чем с нечеткой. Аналогичная ситуация наблюдается и большинства других генераторов системы.

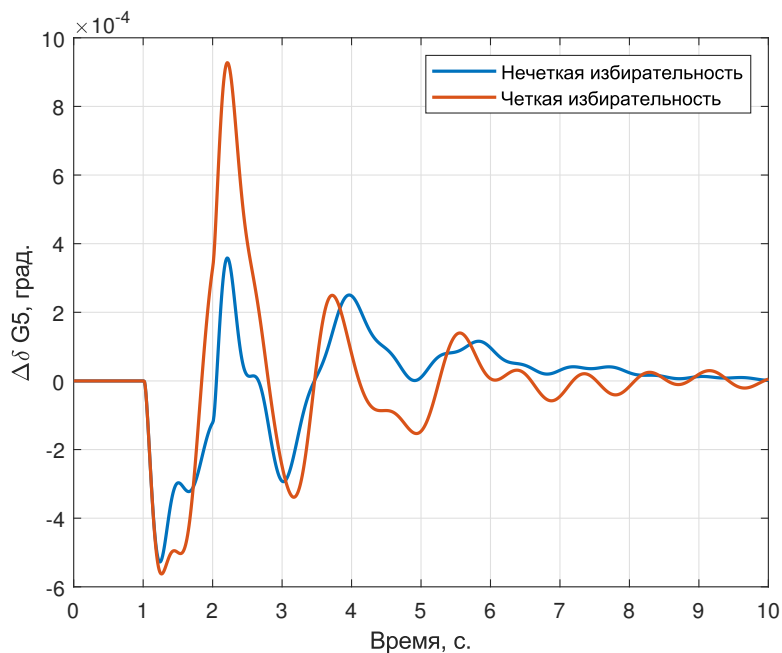


Рис. 1. Динамика отклонения частоты генератора G3 при использовании решений, полученных при четком или нечетком определении множества критических мод S

Само по себе это не значит, что нечеткая постановка задачи позволяет находить более выгодное решение. Тем не менее, можно заключить, что дополнительная гибкость определения целевой функции для предложенного регулятора имеет существенную ценность.

4. Заключение

В данной работе предложено нечеткое обобщение ранее представленного метода синтеза избирательного демпфирующего линейно-квадратичного регулятора на основе субграмианов. Применение нечеткой функции принадлежности моды к критическому множеству позволяет более гибкую постановку задачи оптимизации, что ситуативно может приводить к нахождению более выгодного решения. Дополнительно это позволяет сгладить целевую функцию, что существенно расширяет набор применимых для решения оптимизационных методов. Это особенно важно в силу того, что результаты вычислительного эксперимента указывают на актуальность применения глобальной или гибридной оптимизации для синтеза предложенного регулятора.

Список литературы

1. Ядыкин И.Б., Искаков А.Б. Спектральные разложения для решений уравнений Сильвестра-Ляпунова-Крейна // Доклады академии наук. 2017. Т. 472, № 4. С. 388-392.
2. Aboul-Ela M., Sallam A., McCalley J., Fouad A. Damping controller design for power system oscillations using global signals // IEEE Transactions on Power Systems. 1996. Vol. PS-11, No. 2. P. 767-773.
3. Demello F. P., Concordia C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1969. Vol. PAS-88, No. 4. P. 316-329.
4. Dorfler F., Jovanovic M., Chertkov M., Bullo F. Sparsity-promoting optimal wide-area control of power networks // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. PS-29, No. 5. P. 2281-2291.
5. Iskakov A.B., Tomin N.V., Yadykin I.B., Panasetsky D.A., Kutyakov E.Y., Voropai N.I. // Selective lq wide area damping of power networks based on the spectral decomposition of gramians. IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, No. 9. P. 152-157.
6. Jain A., Chakraborty A., Biyik E. An online structurally constrained lqr design for damping oscillations in power system networks // 2017 American Control Conference (ACC). Seattle: IEEE, 2017. P. 2093-2098.
7. Klein M., Rogers G., Kundur P. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems // Transactions on Power Systems. 1991. Vol. 6, No. 3. P. 914-921.
8. Klein M., Rogers G., Moorty S., Kundur P. Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1992. Vol. EC-7, No. 3. P. 382-390.
9. Xie R., Kamwa I., Chung C. A novel wide-area control strategy for damping of critical frequency oscillations via modulation of active power injections // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. Vol. PS-36, No. 1. P. 485-494.
10. Yang X., Feliachi A. Stabilization of inter-area oscillation modes through excitation systems // IEEE Transactions on Power Systems. 1994. Vol. PS-9, No. 1. P. 494-502.
11. Zhang Y., Bose A. Design of wide-area damping controllers for interarea oscillations // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. Vol. PS-23, No. 3. P. 1136-1143.