

УДК 621.31 : 517.977

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛКЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ

А.Б. Искаков

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: isk_alex@mail.ru

И.Б. Ядыкин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: jadikin1@mail.ru

Н.Н. Бахтадзе

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: sung7@yandex.ru

Ключевые слова: электроэнергетика, теория управления, спектральные методы, мониторинг, прогнозирование, модальный анализ по Ляпунову, LQ регулятор, сценарное предиктивное моделирование.

Аннотация: Доклад суммирует некоторые результаты, полученные авторами по развитию новых спектральных и структурных методов в теории управления за последние 5 лет в рамках выполнения проекта РНФ 19-19-00673, и их применение для адаптивного прогнозирования, мониторинга и управления в электроэнергетике. В частности, в докладе рассмотрено применение модального анализа по Ляпунову для оценки структуры взаимодействий низкочастотных колебаний в ЭЭС, селективный метод настройки глобального линейно-квадратичного регулятора для подавления межрайонных колебаний в сети на основе спектрального разложения грамиана наблюдаемости замкнутой системы, а также представлены методы построения предиктивных моделей билинейных систем, основанные на индуктивных знаниях, извлекаемых посредством интеллектуального анализа больших данных.

1. Введение

Развитие и использование спектральных и модальных подходов для мониторинга и управления в электроэнергетике традиционно является одним из самых перспективных направлений научных исследований. Методы модального анализа используются при анализе критических собственных мод и используются практически во всех задачах управления в электроэнергетике. Они применяются при

оценке границ устойчивости ЭЭС, при идентификации и демпфировании опасных межрайонных колебаний, при определении центров качаний в сети и предсказании их устойчивости в режиме реального времени, в задачах динамического уменьшения размерности моделей, в алгоритмах оптимального разделения сети в случае аварий, в алгоритмах настройки регуляторов генераторов, при выборе оптимального расположения датчиков и регуляторов в сети, при вычислении предельных пропускных способностей и оптимального потокораспределения в сети, а также в алгоритмах балансирования генерации и потребления в локальных электросетях с распределённым управлением [1].

В течение последних 5 лет авторы доклада развивают альтернативный подход к модальному анализу, который заключается в том, что участие собственных мод и переменных состояния рассматривается не в эволюции переменных состояния и мод соответственно, а в соответствующих им функциях Ляпунова. В основе этого подхода лежат спектральные разложения для решений уравнения Ляпунова, полученные в работе [2]. Практическая значимость этих спектральных разложений состоит в том, что они позволяют охарактеризовать вклад отдельных собственных компонент системы или их парных комбинаций в асимптотическую динамику энергии возмущения в системе.

2. Оценка структуры взаимодействий низкочастотных колебаний в ЭЭС

В больших динамических системах, подверженных шуму или вынужденным колебаниям, с течением времени постоянно возникают возмущения. В этом случае устойчивость «в малом» определяется энергией возмущений, накопленных в системе с течением времени. Например, в современных крупных ЭЭС потеря устойчивости может сопровождаться накоплением энергии в низкочастотных колебаниях. Существующие методы нелинейного модального анализа, такие как нормальные формы, модальные ряды и билинейная аппроксимация, оценивают модальные взаимодействия с точки зрения нелинейной мгновенной динамики, но не учитывают напрямую эффект накопления энергии возмущений во времени, который как раз может вызывать резонансный отклик в системе. Для анализа этого эффекта в [3] была разработана новая концепция модального анализа по Ляпунову (Lyapunov modal analysis – LMA), объединяющая селективный модальный анализ и спектральные разложения функций Ляпунова, которые представляют квадрат L_2 нормы возмущений в состояниях или сигналах. Предложенный подход позволяет анализировать устойчивость динамической системы «в малом» с точки зрения энергии возмущений, накапливаемой в переменных состояния во времени. На основании LMA предложены новые модальные показатели, которые характеризуют отдельные моды и модальные взаимодействия в связи с конкретными переменными состояниями.

В [4] на основании LMA предложен метод оценки местоположения и структуры межрайонных колебаний и их взаимодействия на графе электроэнергетической системы. В отличие от обычного модального анализа, этот метод позволяет анализировать геометрию и структуру их парных взаимодействий с точки зрения их взаимного действия, которое создается в узлах сети с течением времени.

Таким образом, метод можно применить для анализа резонансных явлений, которые возникают в современных ЭЭС, особенно в связи с ростом использования возобновляемых источников энергии и активным применением тиристорных преобразователей.

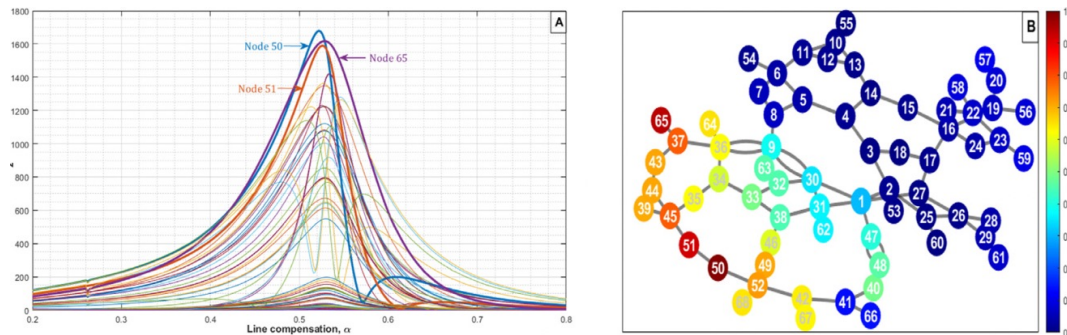


Рис. 1. Профиль резонансного взаимодействия между двумя модами на графе сети тестовой модели IEEE с 68 шинами [4].

Преимущества новых энергетических показателей были проиллюстрированы с помощью мотивационных примеров и тестовых экспериментов для модели IEEE с 68 узлами. В частности, было промоделировано изменение реактивного сопротивления ключевых линий электропередачи в энергосистеме Новой Англии с использованием тиристорного управляемого последовательного конденсатора (Thyristor Controlled Series Capacitor – TCSC). В ходе сценарного эксперимента частоты двух межрайонных колебаний начинают сближаться, и происходит резонансное взаимодействие мод. На рисунке 1 слева показана динамика резонансного взаимодействия для возмущения угла напряжения в узлах ЭЭС в зависимости от параметра компенсации линии α , а справа – профиль резонансного взаимодействия двух колебаний на графе сети.

3. Селективный LQ регулятор для подавления глобальных колебаний

В качестве второго примера применения спектральных разложений функций Ляпунова (2) рассмотрим традиционную в электроэнергетике задачу анализа и синтеза адаптивных регуляторов для подавления глобальных колебаний в сети ЭЭС. Многие методы решения этой задачи основаны на модели линейно-квадратичного регулятора (LQR). Различные подходы к LQR были разработаны для учета различных эффектов, таких как доступность измеряемых переменных, ограничения инфраструктуры связи, задержки связи и разного вида неопределенности. Одним из основных недостатков классических глобальных LQR-регуляторов является то, что они склонны тратить энергию управления на излишнее подавление каждой моды в системе, включая быстрые моды, которые уже демпфируются традиционными стабилизаторами (PSS). В работе [5] был предложен новый селективный LQ-подход для глобального подавления колебаний в сети, основанный на спектральных разложениях для решений уравнения Ляпунова. В этом методе вместо полного состояния, при оптимизации используется не полный сигнал, а только выбранный

набор колебаний в этом сигнале, что позволяет повысить гибкость и точность настройки регулятора.

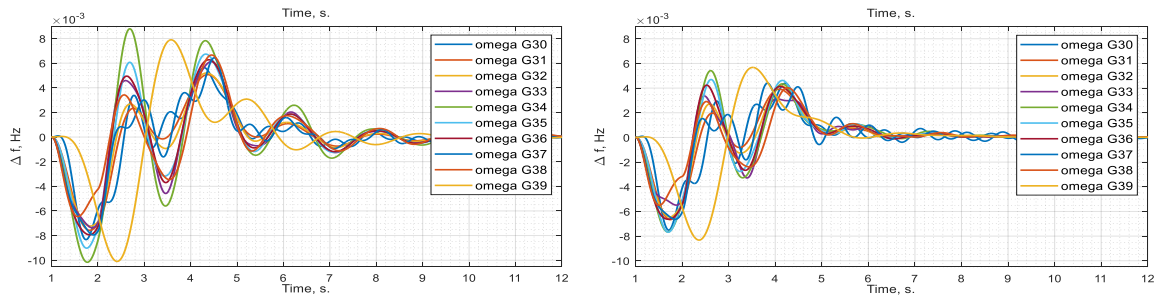


Рис. 2. Динамика возмущения частоты в тестовой системе с использованием стандартной LQR настройки (слева) и селективной LQR настройки (справа) [5].

Для иллюстрации метода в эксперименте по моделированию тестовой системы IEEE с 39 шинами, было выбрано 3 собственных колебания с частотами менее 1 Гц и коэффициентами демпфирования менее 0,15 в качестве критических для селективного LQ метода настройки регуляторов. На рисунке 2 представлена динамика возмущения частоты в переходном процессе при использовании регуляторов по стандартному LQ алгоритму (слева) и по селективному LQ алгоритму (справа). Тестовые эксперименты показали, что предложенный селективный подход систематически улучшает решение обычной задачи LQR для выбранного набора межрайонных колебаний.

4. Сценарное предиктивное моделирование состояния энергообъектов

Виртуальные анализаторы устойчивости находят все большее применение при решении задач планирования режимов и оперативного управления в современных электроэнергетических системах (ЭЭС) [6, 7]. Вследствие широкого распространения распределенной генерации и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в ЭЭС, ее режимы функционирования близки к предельным по показателям устойчивости, поэтому необходимо совершенствовать как методы предсказательного моделирования, так и методы анализа и превентивного управления не только для режимов малых отклонений, но и в существенно нелинейных режимах. Среди нелинейных систем класс билинейных является классом, наиболее близким к существенно нелинейным системам.

В серии работ [8–10] были получены результаты по объединению спектральных методов с инновационными методами идентификации и прогнозирования в ЭЭС. В том числе, получены результаты развития и обобщения этих методов на класс билинейных моделей ЭЭС, что позволит расширить область их применения. Предложена методология объединения спектральных разложений грамианов дискретных моделей электроэнергетических систем с инновационными методами искусственного интеллекта и вейвлет анализа с целью создания прогнозных моделей для оценки устойчивости систем электроснабжения. В рамках единого подхода объединены различные методы обработки дискретной информации: ассоциативный

поиск, дискретное вейвлет преобразование, обработка больших массивов дискретных данных технологических архивов, дискретные прогнозирующие модели и сепарабельные спектральные разложения их грамианов управляемости и наблюдаемости. Предложены методы формирования точечных виртуальных линейных моделей состояния энергосистемы и интеллектуальных алгоритмов идентификации, основанных на машинном обучении и формировании базы знаний, извлекаемых посредством анализа данных архивов технологических параметров функционирования энергосистемы. Разработано алгоритмическое обеспечение системы интеллектуального динамического прогнозирования нелинейных нестационарных объектов на основе кратно- масштабного вейвлет-разложения и квантовых алгоритмов кластеризации. Выведены критерии устойчивости линейных моделей в пространстве вейвлет-преобразований. Созданы методы и алгоритмы динамической оценки и прогнозирования в реальном времени состояния энергосистемы, использующие для оперативного прогноза модели реального времени ее различных элементов. Разработаны методы построения моделей дискретных билинейных систем для алгоритмов оценивания запасов устойчивости методом грамианов.

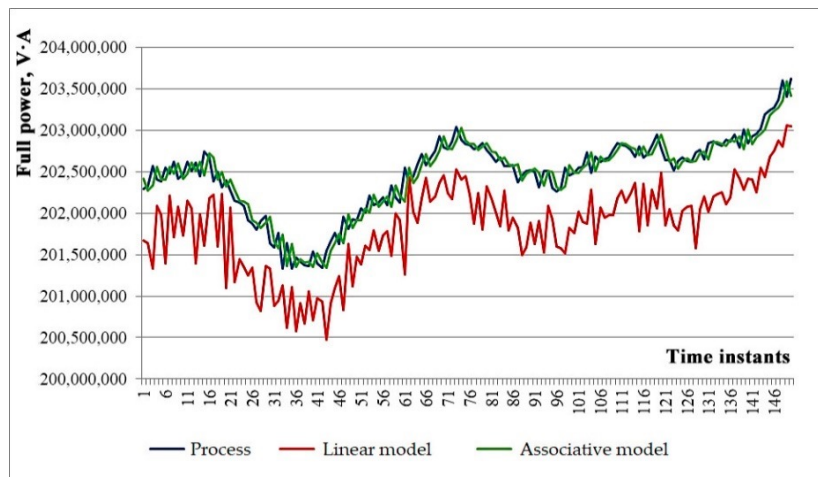


Рис. 3. Сравнение прогноза мощности тестовой ЭЭС с помощью ассоциативной модели (зелёным) и традиционной линейной модели (красным) [8].

Применение разработанных методов проиллюстрировано на рисунке 4 с помощью моделирования в Matlab. Для формирования модели использовались данные воздушной линии электропередачи Костромская ГЭС – Загоркинская насосно-аккумулирующая станция (НАЭС). Данные мониторинга переходных процессов собирались с помощью PMU (Phasor Measurement Units) на линиях электропередачи 500 кВ. Выборка производилась в течение 20 мс каждые 10 мин. На рисунке показан результат анализа и прогноза полной мощности нагрузки, которая фактически приходится на потребителя. Можно видеть преимущество ассоциативной модели в точности по сравнению с традиционной линейной моделью. Прогноз процесса получен с помощью традиционной линейной и ассоциативной моделей, работающих в течение 43,7 с (2185 временных шагов, 20 мс на каждый шаг).

5. Выводы

В работе приведено несколько примеров того, как развитые авторами доклада спектральные и структурные методы теории управления были успешно применены к практическим задачам прогнозирования, мониторинга и управления в электроэнергетике. Мы ожидаем, что спектральные разложения решений матричных уравнений, известных в теории управления, могут предоставить ключевой инструмент для разработки ещё более широкого набора новых алгоритмов и интеллектуальных методов прогнозирования и управления в макро- и микросетях.

Список литературы

1. Воропай Н.И., Голуб И.И., Ефимов Д.Н., Исаков А.Б., Ядыкин И.Б., Спектральный и модальный методы в исследованиях устойчивости электроэнергетических систем и управлении ими. // Автоматика и телемеханика. 2020. № 10. С. 3–34.
2. Yadykin I.B., On properties of gramians of continuous control systems // Automation and Remote Control. 2010. Vol. 71, No. 6. P. 1011–1021.
3. Isakov A.B., Yadykin I.B., Lyapunov modal analysis and participation factors applied to small-signal stability of power systems // Automatica. 2021. Vol. 132. P. 109814.
4. Isakov A.B., Kutuyakov E.Yu., Tomin N.V., Panasetsky D.A., Abramnikov A.N., Dushin S.V., Estimation of the location of inter-area oscillations and their interactions in electrical power systems using Lyapunov modal analysis // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2023. Vol. 153. P. 109374.
5. Isakov A.B., Tomin N.V., Yadykin I.B., Panasetsky D.A., Kutuyakov E. Yu., Voropai N.N., 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. Voropai N.I., Tomin N.V., Sidorov D.N., Kurbatsky V.G., Panasetsky D.A., Zhukov A.V., Efimov D.N., Osak, A.B. A suite of intelligent tools for early detection and prevention of blackouts in power interconnections // Automation and Remote Control. 2018. Vol. 79, No. 10. P. 1741–1755.
7. Mellodge P., A Practical Approach to Dynamical Systems for Engineers. Oxford: Elsevier, 2016.
8. Bakhtadze N., Yadykin I., Discrete Predictive Models for Stability Analysis of Power Supply Systems // Mathematics. 2020. Vol. 8, No. 11. P. 2020.
9. Bakhtadze N., Yadykin I., Analysis and prediction of electric power system's stability based on virtual state estimators // Mathematics. 2021. Vol. 9, No. 24. P. 3194.
10. Bakhtadze N., Yadykin I., Maximov E., Maximova N., Cheresenko A., Vershinin Yu., Forecasting the Risks of Stability Loss for Nonlinear Supply Energy Systems // IFAC-PapersOnLine. 2021. Vol 54, No. 1. P. 478–483.