

УДК 681.52.015.23

Цыганаш В. Е., Белоиваненко Ю. С.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В настоящее время разработка энергосберегающих технологий ведётся в двух направлениях: первое направление связано с процессами регистрации, учета и документирования потребляемой энергии. Оно проработано в достаточной степени и на хорошем уровне, но не затрагивает динамических процессов, происходящих в системах; второе направление посвящено локальным (отдельным) системам управления технологическим оборудованием. Поскольку работы в этом направлении ведутся давно, то достигнута высокая степень совершенства разработок и поэтому даже применение идеальных регуляторов может дать весьма небольшое повышение производительности и снижение удельного расхода энергии.

В связи с этим, наряду с заменой элементной базы и технических средств управления на более современные, основное внимание необходимо уделять совершенствованию принципов и методов управления объектами в целом. Прежде всего, это относится к программному управлению, оптимальному управлению и введению гибкого адаптивного управления. Перспективность этих направлений обусловлена наличием экстремальной зависимости распределения мощности не только на границе, но и в самой области допустимых значений переменных.

Электроэнергетическая система (ЭЭС) как объект управления относится к классу ключевых, структурообразующих компонентов современной техносферы [1]. Поэтому проблема эффективного управления ЭЭС относится к числу фундаментальных научно-технических проблем, остроту и важность решения которой подтверждают крупные техногенные аварии последнего времени. Сложность управления этим объектом обусловлена тем, что современная ЭЭС представляет собой комплекс различных подсистем, связанных между собой процессами интенсивного динамического взаимодействия и обмена энергией, веществом и информацией. К тому же этот объект является нелинейным, многомерным и многосвязным, в котором протекают сложные переходные процессы и возникают критические и хаотические режимы. Поэтому проблема эффективного управления такой динамической системой является весьма актуальной, чрезвычайно сложной и практически недоступной для существующих в энергетике методов автоматического управления.

Если рассматривать конкретнее эту проблему, то можно подчеркнуть, что технологический процесс в энергообъекте определяется сопутствующими потерями энергии. Эти потери связаны с характером протекающих тепловых и электромеханических процессов, свойства которых зависят не только от принятой конструкторами технологической схемы объекта, но, что особенно важно, и от применяемого принципа управления его технологическими процессами. Совершенствование технологической схемы производства электроэнергии на электростанциях происходит сравнительно медленно и вряд ли в ближайшее время стоит ожидать принципиально новых решений по повышению КПД процесса преобразования энергии топлива в тепловую энергию и далее в электрическую. Это, в свою очередь, не способствует экономии топлива и, соответственно, повышает себестоимость электроэнергии.

Процесс усложняется ещё и тем, что энергоблоки работают в базовом режиме и практически не используют возможность работы в широком диапазоне нагрузок. В этой связи возникает важная проблема повышения маневренности агрегатов электростанции, решение которой для парогенерирующих установок означает расширение диапазона нагрузок и тепловых режимов, в рамках которого система управления котлом способна обеспечить его устойчивую работу. При этом основное препятствие состоит в ограниченных возможностях существующих линейных систем управления энергоблоками. Между тем известно, что

современные теплоэнергетические суперсистемы представляют собой комплекс различных динамических подсистем, выполняющих разнообразные технологические функции: это, во-первых, подсистема производства тепловой энергии, осуществляемого с помощью паровых котлов, во-вторых, подсистема преобразования тепловой энергии в механическую, реализуемого с помощью турбоагрегатов, и, в-третьих, подсистема генерации электрической энергии, осуществляемой с помощью синхронных генераторов электрической энергии. Суть дела состоит в том, что подсистемы связаны между собой процессами интенсивного взаимодействия и обмена энергией, веществом и информацией.

Таким образом, возникает острая необходимость проведения фундаментальных научных исследований и опытно-конструкторских разработок, посвященных проблеме противоаварийного и энергосберегающего управления процессами производства тепловой и электрической энергии, т. е. поиску новых алгоритмов управления, которые бы обеспечивали надежную генерацию электроэнергии нужного качества с одновременной минимизацией расхода энергоносителя и, следовательно, себестоимости электроэнергии.

Целью работы является анализ повышенных требований к качеству функционирования энергообъектов, а именно: их устойчивости, надежности, повышения маневренности агрегатов электростанций, обоснование необходимости поиска принципиально новых путей совершенствования процессов управления энергообъектами и их группами в составе ЭЭС.

Добиться поставленной цели при решении этой задачи можно используя частотный метод оптимального управления [2]. Он основан на применении в качестве критерия оптимального управления коэффициента использования мощности источника питания $K_n(t)$, характеризующего отклонение от оптимального режима значения мощности, потребляемой от источника питания.

$$K_n(t) = \frac{P_n(t) - P_{\text{пот}}(I) - \Delta P_p(t)}{P_n(t)} = \frac{P_n(t) - P_{\text{пот}}(I) - (I\Delta U + U\Delta I)}{P_n(t)},$$

где $P_n(t) = UI$ – заданное значение мощности источника питания;

$\Delta P_p(t)$ – неиспользованная мощность источника питания, возникающая в результате отклонения от оптимального режима по току на ΔI и по напряжению на ΔU ;

$P_{\text{пот}}(I)$ – мощность потерь, зависящая от тока I в силовой цепи;

U – напряжение на нагрузке;

t – время.

Если через $P_n(t)$ обозначить полезную мощность, то при правильном выборе $P_n(t)$ и $\Delta P_p(t) = 0$ в системе поддерживается оптимальный электрический режим $P_n(t) = P_n(t)_{\text{max}}$.

Достоинствами этого критерия являются:

- возможность представления сигналов как в фазочастотной, так и во временной области;
- реализация перемещения изображающей точки, характеризующей течение процесса энергопотребления непосредственно по границе возможного, т. е. по экстремали;
- определение через переменные доступные для точного измерения;
- благодаря тому, что максимум функционала обеспечивается при максимуме подинтегральной функции, он может характеризовать мгновенную мощность и поэтому хорошо подходит для решения задач динамики;
- $K_n(t)$ позволяет отказаться от параметрической оптимизации и реализовать решение задачи непосредственно через функционал;
- обеспечивает инвариантность к системе координат, в которой рассматривается моделируемая система;
- предоставляет значения $K_n(t)$ в нормированной форме и сочетает достоинства аддитивного и мультипликативного представления критерия;
- позволяет применять мощный арсенал поисковых методов определения равновесных состояний;

– входит в единую группу функционалов, допускающих их унификацию как по структуре, так и по параметрам;

– при технической реализации позволяет произвести сочетание двух регуляторов в системе оптимального и обычного, синтезированного исходя из заданных показателей качества системы регулирования.

Особый интерес среди достоинств этого критерия предоставляет возможность разработки модели процесса энергопреобразования на его основе [3]. Его связь с ключевыми параметрами технологического процесса открывает перспективу особо тесного взаимодействия с такой моделью.

Не менее важным является и то обстоятельство, что измерение и фильтрация, с одной стороны, управление и регулирование, с другой стороны, находятся друг с другом в некоторой замечательной взаимосвязи, которая впервые была выяснена Калманом и сформулирована им как принцип двойственности [4].

Благодаря этому принципу по аналогии с механикой можно ввести относительную, переносную и абсолютную системы координат и для сигналов. Это открывает перспективу проведения декомпозиции для мощного энергопотребителя и представления его структуры в виде отдельных подсистем.

Такой подход значительно упрощает анализ системы в целом. В частности, это делает возможным и проведение анализа на устойчивость и стабильность такой системы, опираясь на ее модель, которая выполняет и функции анализатора для сигналов, характеризующих ток и напряжение энергопотребителя. За основу при построении такой модели может быть взят управляемый модулированный фильтр, с помощью которого определяется величина отклонения мощности в энергопотребителе от оптимального режима [5]. По сути, это параметрическая модель, содержащая управляемый колебательный контур (КК) и управляемый по частоте генератор синусоидальных колебаний. Воздействия, характеризующие ток I и напряжение U силовой цепи энергопотребителя, поступают одновременно на входы модели. При этом сигнал, представляющий ток, преобразуется с помощью генератора в частотно-модулированный сигнал i , который поступает непосредственно в КК, а сигнал, представляющий напряжение, воздействует на индуктивность L КК, изменяя его резонансную частоту. В результате процессы, происходящие во временной области в КК, преобразуются в фазочастотную область и на выходе модели формируется сигнал, характеризующий оптимальное решение и отклонение от него. Этот сигнал характеризует $K_n(t)$, который также допускает декомпозицию и может быть представлен аддитивной и мультипликативной составляющими.

Модель в такой форме хорошо себя зарекомендовала при лабораторных и промышленных испытаниях на электротермической установке, но её аппаратная реализация достаточно сложна. Для оценки стабильности работы такой системы подходит метод, пригодный как для линейных, так и для нелинейных систем. Для этого достаточно воспользоваться вторым методом Ляпунова, основанным на построении функции Ляпунова. Принимая во внимание возможность декомпозиции как самого объекта, так и $K_n(t)$ учтем, что это должна быть векторная величина, содержащая медленное движение (аддитивная составляющая) и быстрое движение (мультипликативная составляющая). Такой подход позволяет определить функцию Ляпунова и решить вопрос об устойчивости системы. Проверка этого утверждения была осуществлена в промышленных условиях на нелинейных процессах энергопреобразования, происходящих в дуговой сталеплавильной печи. По аналогии с механикой, процессы в силовой цепи представлялись как результат взаимодействия двух подсистем [6].

При этом первая подсистема «источник питания» (ИП) выполняет функции окружающей среды для объекта и характеризует абсолютное движение, а результат взаимодействия ИП с объектом (подсистемой «Нагрузка» - H) характеризует относительное движение в системе в целом. Тогда переносное движение можно отождествить с подсистемой быстрых движений. Воздействуя на переменную ИП (напряжение), на нагрузку H (ток) и изменяя параметры дуги можно регулировать и определяющую переменную – фактическую мощность,

поступающую в нагрузку. Она может быть измерена киловаттметром. При этом прибор точнее фиксирует медленную составляющую и сглаживает огибающую быстрых движений, характеризующих мгновенную мощность удвоенной промышленной частоты источника питания. Медленная составляющая, являющаяся главной в процессе управления, визуально лучше определяется и оператором, чем, например, напряжение или ток, измеряемые вольтметром и амперметром для каждой отдельной фазы агрегата. Происходит это из-за расширения частотного диапазона сигнала, измеряемого киловаттметром, как в сторону самых медленных движений, вплоть до появления постоянной составляющей мощности, так и в сторону самых быстрых движений до удвоенной промышленной частоты, что позволяет оператору точнее определять мощности в отдельных фазах агрегата и корректировать по ним положение общей рабочей точки для трех фаз агрегата в целом с меньшими запаздываниями при принятии решений. Интересно отметить, что полученный эффект разделения движений усиливается и за счет снижения уровня помех по мере приближения рабочей точки к траектории оптимального режима, являющейся экстремалью процесса энергопреобразования. При достижении оптимального режима быстрые движения в относительной системе отсчета себя почти не проявляют, несмотря на наличие переносного и абсолютного движений.

Этот процесс фильтрации кроме лучшего согласования частотных параметров объекта с рабочим частотным диапазоном лица принимающего решения (оператора) позволяет увеличить не только точность и быстродействие системы управления, но и допускает двусторонние вариации на границах допустимых областей функционирования системы, расширяя тем самым эти области до их предельных значений.

ВЫВОДЫ

Рассмотренный подход к управлению энергопотребителем позволяет: обеспечить работоспособность системы в условиях широкого изменения динамических свойств объекта, повысить надёжность систем, унифицировать отдельные регуляторы или блоки регуляторов и приспособить их для работы с различными видами однотипных объектов.

Экспериментальная проверка приведенных технических решений в промышленных условиях на индукционной плавильной печи ИСТ-1М и дуговых печах ДСП-12 и ДСП-100 подтвердила возможность обеспечения устойчивости работы такой системы и её высокую экономическую эффективность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. – М. : Мир, 1985. – 424 с.
2. Цыганаши В. Е. Особенности реализации частотного метода оптимального управления / В. Е. Цыганаши // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 3. – С. 117–120.
3. Цыганаши В. Е. Особенности модели, применяемой для решения задачи оптимального управления мощным энергопотребителем / В. Е. Цыганаши, Ю. С. Белоиваненко, В. А. Винников // *Важке машинобудування «Проблеми та перспективи розвитку» : Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції 2-05.06.08*. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 132.
4. Брамер К. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Брамер, Г. Зиффлинг ; пер. с нем. В. Б. Колмановского. – М. : Наука, 1982. – 200 с.
5. Цыганаши В. Е. Анализ модели силовой электрической цепи мощной электротермической установки / В. Е. Цыганаши. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. – Донецьк: ДонНТУ, 2003. – Вип. 58. – С. 130–135.
6. Цыганаши В. Е. О стабильности и устойчивости системы управления мощным энергопотребителем / В. Е. Цыганаши // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 3. – С. 137–140.