



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Локальная виртуальная электростанция. Экспериментальные исследования принципов работы микрогенерационной установки*

Вернер Д., Хесс Т., инженеры, Шегнер П., доктор техн. наук

**Институт электроэнергетических систем и техники высоких напряжений
Дрезденского технического университета, Германия**



Вернер Д.

Хесс Т.

Шегнер П.

Представлена концепция локальной виртуальной электростанции. Иерархический подход позволяет учесть ограничения локальной сети и упрощает задачу оптимизации. Система может расширяться и объединять сотни микрогенерационных установок. Для изучения принципов их работы в виртуальной среде разработана тестовая комбинированная энергетическая установка.

Ключевые слова: распределенная энергетика, когенерационная установка, локальная виртуальная электростанция, иерархический подход.

Энергосистема Германии претерпевает существенные изменения. Декларируется цель заменить существующую энергетическую систему на базе традиционного органического топлива более надежной и эффективной. Уже в 2012 г. доля возобновляемых источников в производстве электроэнергии достигла 23 %, к 2025 г. предполагается дальнейшее ее увеличение до 45 %. Планируемая смена парадигмы обеспечивается большим количеством государственных стимулирующих программ. В частности, приняты законы о возобновляемых источниках энергии [1], комбинированной выработке тепловой и электрической энергии [2], энергосбережении. Эти программы позволят увеличить число установок распределенной энергетике, в первую очередь — солнечных и ветровых электростанций. Как правило, такие установки присоединены к распределительным электрическим сетям низкого или среднего напряжения.

Активное продвижение децентрализованной генерации на возобновляемых источниках с изменяющейся выработкой энергии и

постепенным замещением традиционных электростанций требует ответа на множество вопросов. Вот лишь некоторые из них:

1. Каким образом может быть обеспечено устойчивое функционирование энергосистемы при уменьшении суммарной вращающейся массы электрических машин?

2. Возможно ли создать локальные сети с установками распределенной генерации? Какие типы алгоритмов управления для этого необходимы?

3. Как использовать новые управляемые установки распределенной генерации, в частности, электростанции с комбинированным производством тепловой и электрической энергии (когенерационные установки) для обеспечения безопасного и надежного функционирования систем электроснабжения?

Стимулирующие программы направлены на совершенствование выработки не только электроэнергии, но и тепловой энергии. Изменения происходили на протяжении многих лет. В 1996 — 2010 гг. доля отопительных приборов, использующих газ, возросла с 39,7 до 49 % за счет вытеснения старого и неэффективного оборудования, например котлов, работающих на жидком топливе. В большей части нового отопительного оборудования предусмотрены конденсационные котлы, но

* Проект, представленный в статье, финансируется по гранту № 03ЕТ1042А Федерального министерства экономики и технологий Германии. Дополнительно проект поддерживается компанией "Verbundnetz Gas AG" (Германия). **Перевод статьи — Е. В. Раубаль.**

существенно увеличилось и использование тепловых насосов. Когенерационные установки пока играют второстепенную роль, несмотря на то, что они активно поддерживаются стимулирующими программами.

Две новые технологии — применение тепловых насосов и когенерационных установок — определяют общее направление развития современной энергетической системы. Благодаря простоте использования накопителей тепловой энергии появились широкие возможности гибкого регулирования графиков нагрузки теплового оборудования. Комбинированное производство тепловой и электрической энергии, интеграция возобновляемых источников энергии в энергосистему позволит решить ряд важных задач. Их решению посвящен междисциплинарный исследовательский проект “Локальные виртуальные электростанции на базе микрокогенерационных установок” [3]. Номинальная мощность таких установок не превышает 15 кВт. В данной статье представлены структура и принцип работы локальных виртуальных электростанций, а также экспериментальная среда, используемая для подтверждения соответствия когенерационных установок требованиям, предъявляемым к этим электростанциям.

Локальные виртуальные электростанции

Предпосылки. В последние годы виртуальные электростанции находятся в центре внимания энергетиков и экономистов. Многие операторы децентрализованных электростанций объединяют свою работу с помощью телекоммуникационных технологий для повышения гибкости продаж и обеспечения рентабельности. Разработаны и продолжают разрабатываться специальные алгоритмы управления и методы прогнозирования.

С увеличением количества установок распределенной генерации возрастает их влияние на распределительные и магистральные сети. Например, могут быстро изменяться объемы и направления мощности или превышать установленные пределы напряжения. Поэтому в сетях с распределенной генерацией необходимо активно поддерживать стационарные и динамические режимы. В настоящее время поддерживаются в основном напряжение и частота, но практически не используется возможность активного воздействия на сеть для исключения возникновения локальных “узких мест”. С целью анализа таких возможностей и проводятся

исследования в рамках рассматриваемого проекта.

Локальные виртуальные электростанции — это развитие уже известной концепции виртуальных электростанций. Они ограничены небольшим районом, например, в границах одной низковольтной сети и позволяют сочетать плановые режимы работы установок распределенной генерации с заданными ограничениями энергосистемы. Возможные ограничения — это уровень напряжения или значение электрической нагрузки в “узких местах”. На локальные виртуальные электростанции на базе микрокогенерационных установок распределенной генерации накладываются дополнительные ограничения в виде обеспечения необходимого количества тепловой энергии в домохозяйствах в течение всего времени работы.

Структура коммуникаций. Возможны различные подходы к разработке структуры коммуникаций виртуальной электростанции [4]. В общем случае их можно разделить на централизованные и децентрализованные. Централизованный подход характеризуется сбором всех требуемых данных от микрокогенерационных установок (МКГУ) и домохозяйств в центре управления. На основе алгоритма линейного программирования формируются и передаются обратно в домохозяйства индивидуальные графики для всех установок. В них следует учитывать одновременно тепловое потребление домов и емкость накопителя теплоты, с которым интегрирована микрокогенерационная установка. С ростом числа установок затрудняется оптимизация их функционирования и усложняются системы коммуникаций. Кроме того, сложнее учитывать сетевые ограничения. Децентрализованный подход в отличие от централизованного минимизирует объем передаваемых данных, а ограничения учитываются на соответствующем уровне.

В общем случае локальные виртуальные электростанции могут быть представлены иерархической системой, содержащей три уровня (рис. 1).

Уровень 1 представляет собой уровень бытовых потребителей с тепловой нагрузкой каждого домохозяйства, мощностью его микрокогенерационной установки и емкостью накопителя. Главной целью является получение необходимого количества теплоты для домохозяйства и обеспечение гибкости режима генерации за счет использования накопителей.

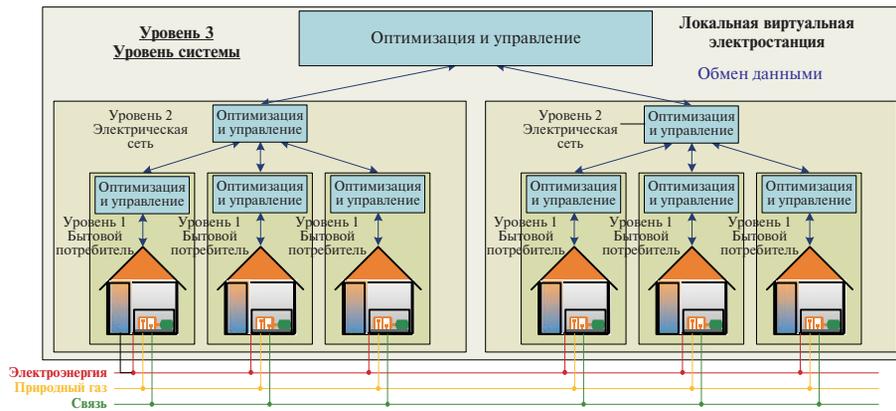


Рис. 1. Уровни иерархической системы обмена информацией локальной виртуальной электростанции

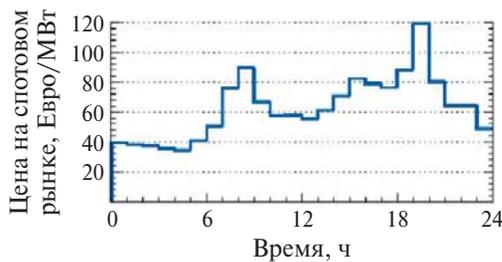


Рис. 2. Типовой ценовой график

Следующий иерархический уровень — *уровень электрической сети*, которая объединяет все уровни домохозяйств в одну линию или низковольтную сеть и обобщает передаваемые данные. Дополнительно учитываются такие сетевые ограничения, как допустимые уровни напряжения и нагрузочные способности кабелей или трансформаторов.

Верхний уровень — *уровень системы* — объединяет все уровни сети и представляет собой общую локальную виртуальную электростанцию, которая взаимодействует с энергетическим и резервным рынками. Уровень системы решает задачи управления графиками и контроля функционирования локальной виртуальной электростанции, основываясь на обобщенных данных, полученных с нижних уровней.

Работа локальной виртуальной электростанции может быть разделена на четыре основных этапа:

1. *Прогнозирование* минимального и максимального объемов производимой электроэнергии в каждом домохозяйстве на основе прогноза погоды и состояния теплового накопителя. Это обуславливает некоторую энергетическую зону, где минимум соответствует такому количеству произведенной электроэнергии, при котором удовлетворяются

потребности домохозяйства в тепловой энергии, а максимум — обеспечиваются не только потребности в тепловой энергии, но и полная емкость накопителя.

2. *Реализация* произведенной электроэнергии с учетом сетевых ограничений.

3. *Определение графиков работы* для каждого объекта нижерасположенных уровней иерархии с учетом их потенциалов.

4. Обеспечение требуемого графика нагрузки в *режиме реального времени*. Отклонения, например, из-за ошибок в прогнозе, должны быть максимально скомпенсированы на следующем вышестоящем уровне.

На рис. 2 и 3 в качестве примера приведены типовой ценовой график и графики работы системы, включающей в себя 100 микрогенерационных установок максимальной электрической мощностью 4 кВт каждая. Здесь не учитывались сетевые ограничения и ошибки прогнозов. Ценовой график за одни сутки (рис. 2) характеризуется двумя периодами высокой цены: между 8–9 ч и 19–20 ч и более низкой ценой в начале дня.

На первом этапе *уровень системы* получает от нижерасположенных уровней агрегированную энергетическую зону, показывающую возможности производства электроэнергии (см. рис. 3, а). На этой основе определяется график нагрузки, который распределяется среди нижерасположенных *уровней сети* (см. рис. 3, б). Уровень сети вновь распределяет график нагрузки, задавая графики для отдельных бытовых потребителей (см. рис. 3, в). Как видно из рис. 2 и 3, взаимосвязь между ценовым графиком и графиками нагрузок теряется с увеличением числа потребителей, поскольку для каждого должны быть учтены возможности производства электроэнергии (минимальный и максимальный уровни).

Кроме анализа структуры обмена данными и работы локальной виртуальной электростанции, важно также определить поведение микрогенерационной установки. С этой целью была спроектирована и изготовлена лабораторная экспериментальная установка, позволяющая проводить продолжительные испытания.

Комбинированная энергетическая установка

В рамках исследования спроектирована экспериментальная среда для микрогенерационной установки, названная “комбинированной энергетической установкой” [5, 6]. Как показано на рис. 4, испытательная установка содержит эмуляторы тепловой сети и электрической системы. Это позволяет проводить всевозможные испытания одно- и трехфазных микрогенерационных установок номинальной мощностью до 10 кВт в виртуальной среде.

С помощью установки могут быть решены три важные задачи:

- моделирование в виртуальной среде работы микрогенерационной установки при подключении к сети и в автономном режиме;
- проверка соответствия микрогенерационной установки требованиям локальной виртуальной электростанции и параметрам сети;

определение параметров микрогенерационной установки для моделирования локальной виртуальной электростанции.

Эмулятор тепловой сети — модель тепловой сети (рис. 5), сконструированная по модульному принципу. Она может быть использована для тестирования различных устройств выработки тепловой энергии, таких, как тепловые насосы, микрогенерационные установки или конденсационные котлы. Область тестирования включает в себя, с одной стороны, теплотехнический анализ

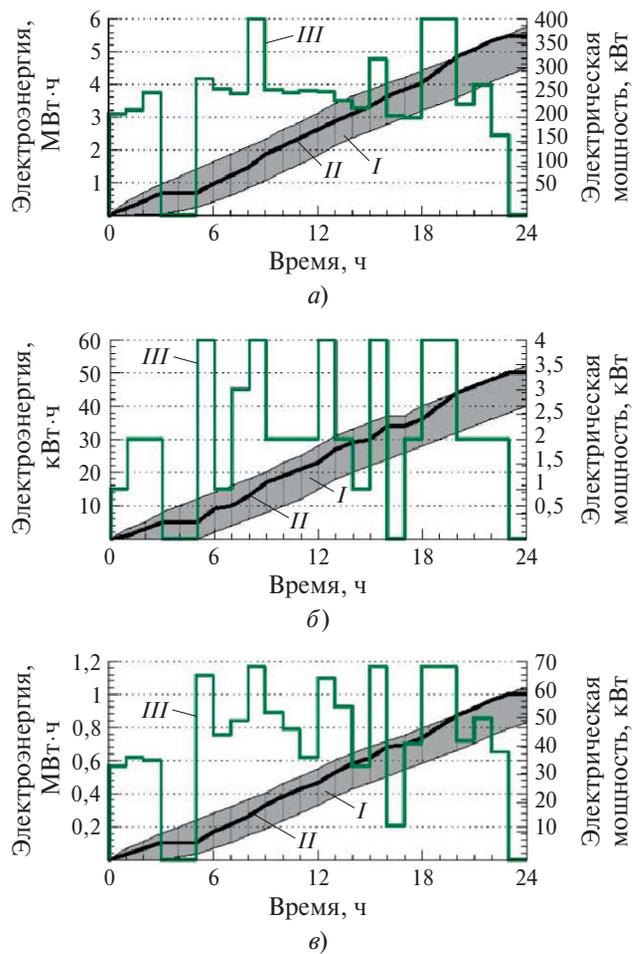


Рис. 3. Графики нагрузки и производимой электроэнергии на уровне системы (а), сети (б) и бытового потребителя (в): I — зона производимой электроэнергии; II и III — производимая электроэнергия и электрическая мощность

устройств генерации тепловой энергии, с другой — исследование влияния разных гидравлических схем, которые реализуются путем последовательного и параллельного соединений тепловых резервуаров.

На модель тепловых сетей наложена система, имитирующая конструкцию здания и измерительные устройства. Она задает темпе-



Рис. 4. Структура комбинированной энергетической установки



Рис. 5. Модель тепловой сети

ратуру обратной воды и поток теплоносителя в качестве исходных значений для эмулятора в зависимости от текущих режимов работы установки тепловой генерации.

Тесты, которые можно провести на модели тепловой сети, позволяют определить базовые требования для успешного внедрения локальной виртуальной электростанции. Рассмотрение тепловой нагрузки — обязательно, поскольку параметры характерных режимов различных устройств тепловой генерации имеют существенное влияние на алгоритмы управления и оптимизации локальной виртуальной электростанции и должны приниматься во внимание.

Эмулятор электрической сети. Эта модель дополняет эмулятор тепловой сети, создавая комбинированную энергетическую установку. Обычно напряжение в точке общего присоединения фиксируется. Эмулятор электрической сети позволяет моделировать низковольтные сети с переменными параметрами. Таким образом можно задать любой требуемый сигнал.

В модели электрической сети напряжение на зажимах $u_T(t)$ зависит от предварительно заданных значений амплитуды и частоты, а ток $i(t)$ определяется схемой питания от микрогенерационной установки, как показано на рис. 4. В замкнутом контуре управления постоянная времени зависит от соотношения сопротивлений низковольтной сети (допускается в пределах от 1 до 3 мс).

Для моделирования низковольтной сети эмулятор может быть настроен как симметричная или несимметричная трехфазная система. Напряжение фазы относительно земли может изменяться непрерывно в диапазоне от 0 до 270 В, частота первой гармоники ре-

гулируется в диапазоне от 42,5 до 57,5 Гц. В дополнение к стационарному режиму должны учитываться быстрые динамические изменения. Возможны скачки напряжения до 10 % номинального значения и изменения частоты со скоростью до 4 Гц/с.

Модель электрической сети состоит из двух основных частей: трех однофазных усилителей мощности и двигателя-генератора. Однофазные усилители работают как “создатели сети”, каждый характеризуется полной расчетной мощностью $5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ в продолжительном режиме и $10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ в кратковременном режиме. Кроме того, возможны быстрые изменения напряжения до 52 В/мс. Двигатель-генератор обеспечивает выход эмулятора на трехфазный режим и работает как гибкая нагрузка с потреблением активной и компенсацией реактивной мощности. Он состоит из бесщеточной синхронной машины и инверторной асинхронной машины.

Схема модели для однофазного режима представлена на рис. 6, а. Три усилителя мощности (РА) соединены параллельно через развязывающие сопротивления. Параллельное соединение обеспечивает максимальное потребление мощности. Вследствие наличия развязывающих сопротивлений напряжение на выводах зависит от тока, определяемого схемой питания от микрогенерационной установки, поэтому должен быть задействован дополнительный контроллер выходного напряжения с малой постоянной времени. Поведение низковольтной сети моделируется дополнительным контроллером системы низкого напряжения, который задает выходное напряжение в зависимости от подаваемого тока. Последний из необходимых контроллеров — контроллер баланса мощности — гарантирует равномерное распределение мощности по каждому усилителю. В противном случае могут возникать отклонения как результат погрешности в развязывающих сопротивлениях.

Схема для трехфазного режима приведена на рис. 6, б. Три усилителя мощности РА, образующие трехфазную систему электроснабжения, дополнены описанным выше двигателем-генератором и сетевыми дросселями для предотвращения переходных процессов в электрической машине при быстрых изменениях напряжения. Необходимость нагрузки является следствием жесткого ограничения потребления электроэнергии усилителями мощности — примерно 30 % номинальной мощности.

Применяемые здесь контроллеры активной и реактивной мощности в отличие от

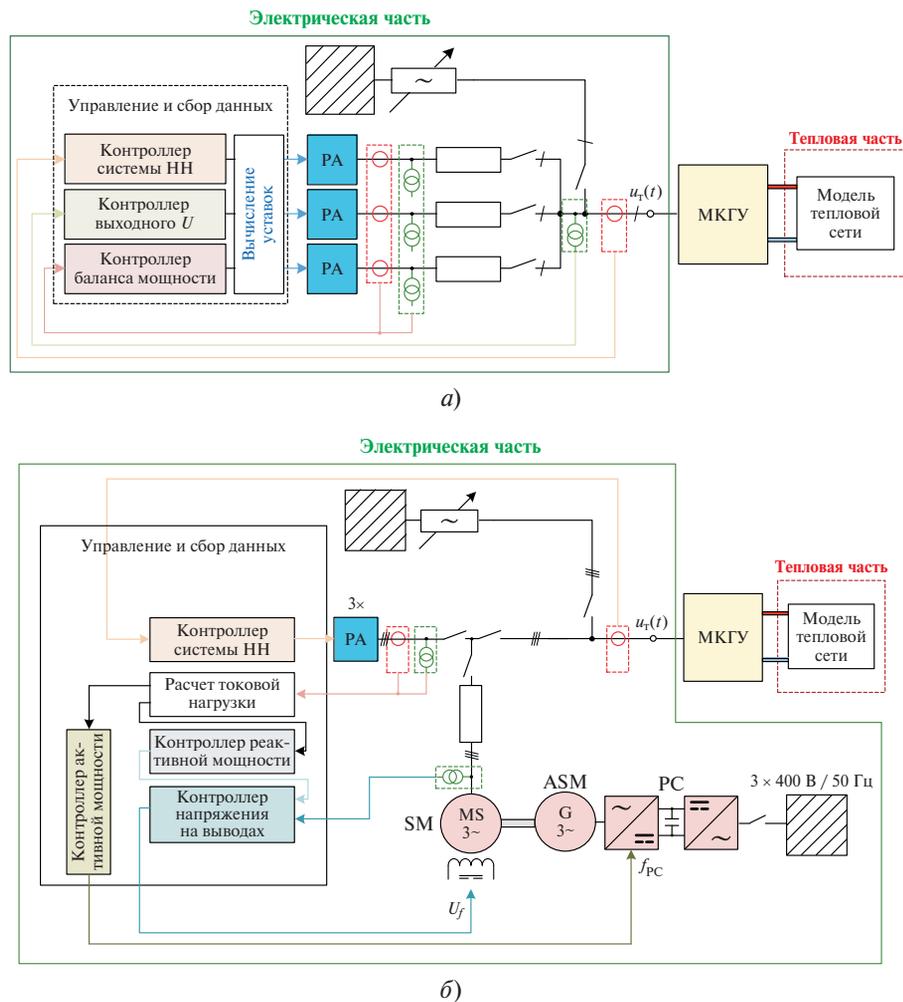


Рис. 6. Схемы моделей электрической сети для однофазного (а) и трехфазного (б) режимов

однофазного исполнения более важны для стабильной работы системы. Эти контроллеры осуществляют ограничение потребления мощности согласно заранее заданным значениям. Как правило, с помощью регуляторов электропотребление усилителей мощности устанавливается равным нулю.

Выводы

1. В представленной концепции локальной виртуальной электростанции иерархический подход позволяет учесть ограничения локальной сети и упрощает задачу оптимизации. Система может расширяться и объединять сотни микрогенерационных установок.

2. Для улучшения функционирования и повышения гибкости локальных виртуальных электростанций должно быть известно поведение микрогенерационных установок. Разработанная тестовая комбинированная энергетическая установка позволяет выполнять все возможные испытания в виртуальной среде.

Список литературы

1. **Bundesministerium** der Justiz: Gesetz für Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG), 2009.
2. **Bundesministerium** der Justiz: Gesetz zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung, 2008.
3. **Regionales Virtuelles Kraftwerk** auf Basis der Mini- und Mikro-KWK-Technologie-Intelligente Vernetzung von thermischen und elektrischen Verbrauchersystemen / J. Seifert, A. Meinzenbach, J. Haupt, P. Seidel, T. Hess, J. Werner, P. Schegner: Forschungsbericht TU Dresden, 2014.
4. **Hess T., Werner J., Schegner P.** Storage Potential of the Local Virtual Power Plant based on μ CHP-Devices. — IEEE PES Transmission & Distribution. Chicago, 2014.
5. **Werner J., Hess T., Schegner P.** Flexible Test Facility for Evaluation of the Static and Dynamic Parameters of Micro Combined Heat and Power Plants. — Power Plant and Power System Control (PPPSC). Toulouse, 2012.
6. **Werner J., Schegner P., Seifert J.** The Combined Energy Lab — A Test Environment for Testing μ CHPs in Grid-Connected and Islanded Mode of Operation. — IEEE PES General Meeting. Vancouver, 2013.