



УДК 621.311.1:621.311.24

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.25](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.25)

КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПАРАДИГМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОСЕТЕЙ: ФОРМАЛИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРНЫХ, РЕЖИМНЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДЕТЕРМИНАНТ

Д.А. Барнакова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул.
Лермонтова, 83
e-mail: barnakovada@ex.istu.edu

Аннотация. Современная трансформация энергетического сектора характеризуется массовым внедрением распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии, что требует пересмотра классических подходов к проектированию микросетей с целью соблюдения нормативов надежности и качества электроснабжения. Возникает необходимость в четкой систематизации различных архитектур микросетей, которые в современных условиях эволюционируют в сложные киберфизические системы. Отсутствие унифицированной методологии выбора топологии и алгоритмов управления затрудняет эффективную интеграцию распределенной генерации в существующие энергосистемы. Цель исследования заключается в разработке формализованной классификации микросетей по ключевым техническим и функциональным признакам для оптимизации процесса их проектирования. В работе использованы методы системного анализа, принципы иерархического управления и сравнительный анализ топологий по роду электрического тока и масштабируемости. Предложена структурированная классификация микросетей, базирующаяся на режимах функционирования (автономный и сетевой), архитектуре распределения (переменный, постоянный или гибридный ток) и установленной мощности. Обосновано применение специфических стратегий управления, таких как метод статических характеристик и модельно-упреждающее регулирование, для каждого типа систем. Систематизация методологий проектирования является обязательным условием для обеспечения функциональной совместимости оборудования и повышения живучести интеллектуальных энергосетей. Результаты исследования позволяют обоснованно выбирать проектные решения на предпроектной стадии, минимизируя риски нестабильности частоты и напряжения в условиях высокой неопределенности генерации.

Ключевые слова: распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, киберфизические системы, качество электроэнергии, управление спросом, системы накопления энергии, иерархическое управление.

UDC 621.311.1:621.311.24

CLASSIFICATION PARADIGMS FOR MICROGRID DESIGN: FORMALIZING ARCHITECTURAL, OPERATIONAL, AND FUNCTIONAL DETERMINANTS

D.A. Barnakova

Irkutsk National Research Technical University, house 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia
e-mail: barnakovada@ex.iastu.edu

Abstract. The modern transformation of the energy sector is characterized by the massive introduction of distributed generation based on renewable energy sources, which requires a revision of classical approaches to the design of microgrids in order to comply with standards of reliability and quality of power supply. There is a need for a clear systematization of the various architectures of microgrids, which in modern conditions are evolving into complex cyber-physical



systems. The lack of a unified methodology for selecting topology and control algorithms makes it difficult to effectively integrate distributed generation into existing power systems. The purpose of the research is to develop a formalized classification of microgrids according to key technical and functional features in order to optimize their design process. The paper uses methods of system analysis, principles of hierarchical management, and a comparative analysis of topologies based on the type of electric current and scalability. A structured classification of microgrids based on operating modes (autonomous and networked), distribution architecture (alternating, direct current or hybrid current) and installed capacity is proposed. The application of specific management strategies, such as the static characteristics method and model-proactive regulation, for each type of system is justified. The systematization of design methodologies is a prerequisite for ensuring the interoperability of equipment and increasing the survivability of intelligent power grids. The results of the study make it possible to reasonably choose design solutions at the pre-design stage, minimizing the risks of frequency and voltage instability in conditions of high generation uncertainty.

Key words: distributed generation, renewable energy sources, cyber-physical systems, power quality, demand response, energy storage systems, hierarchical control.

Введение

Рост доли распределенной генерации (РГ) на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в структуре энергосистем и ужесточение нормативных требований к надежности электроснабжения (SAIDI, SAIFI) и качеству электроэнергии (THD, коэффициенты несимметрии) диктуют необходимость перехода к комплексным методологиям проектирования микросетей. В рамках современной электроэнергетической парадигмы микросеть рассматривается как киберфизическая система (КФС) с распределенными параметрами, требующая сквозного синтеза силовой части и многоуровневых алгоритмов управления. Современные микросети классифицируются как низковольтные активно-адаптивные системы с мультиагентной архитектурой управления [1]. В их состав входят объекты распределенной генерации, системы накопления электрической энергии (СНЭЭ) и устройства с регулируемым электропотреблением. Технологической особенностью таких систем является обеспечение устойчивого функционирования в параллельном с внешней сетью (grid-connected) и изолированном (islanded) режимах с реализацией алгоритмов безударного (бесшовного) перехода между ними. Формализация критериев классификации по топологическим, энергетическим и режимным признакам позволяет структурировать пространство проектных решений. Данный подход обеспечивает оптимизацию синтеза алгоритмов первичного и вторичного регулирования, а также гарантирует соблюдение нормативных требований к динамической устойчивости, энергоэффективности и масштабируемости интеллектуальных энергосистем.

Методы и материалы

Режим функционирования является фундаментальным критерием классификации микросетей. Автономные (изолированные) микросети характеризуются отсутствием физического сопряжения с централизованной энергосистемой в точке общего присоединения (Point of Common Coupling, PCC). Стабильность таких систем требует внедрения иерархических стратегий управления, в частности архитектур «ведущий-ведомый» (master-slave) или методов статических характеристик (droop control). Данные подходы необходимы для обеспечения динамического баланса активной и реактивной мощностей, а также стабилизации частоты в условиях стохастической волатильности генерации на базе ВИЭ и вариативности нагрузки [2, 3]. Сетевые микросети (параллельное включение), функционирующие в режиме синхронизации с внешней энергосистемой, реализуют механизмы двустороннего обмена мощностью. Это позволяет им интегрироваться в рыночные процессы, включая программы управления спросом (Demand Response, DR) и регулирование частоты. Эксплуатация систем в данном режиме предполагает использование прогностических моделей и алгоритмов оптимизации диспетчерских графиков,



обеспечивающих скоординированное взаимодействие с оператором распределительных сетей [4].

На показатели энергоэффективности, удельные капитальные затраты и сложность систем управления также влияет род используемого электрического тока в магистралях распределения. Микросети постоянного тока (DC microgrids) обеспечивают повышение общего КПД за счет исключения этапа инвертирования (DC/AC) при интеграции фотоэлектрических модулей, электрохимических генераторов и систем накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторов. Данная архитектура позволяет минимизировать коммутационные потери и устраняет проблему возникновения гармонических искажений напряжения, характерную для инверторных систем переменного тока. Однако широкомасштабная имплементация DC-сетей в настоящее время ограничена отсутствием унифицированных стандартов уровней напряжения, а также сложностью реализации селективной релейной защиты и алгоритмов прецизионной балансировки потенциалов шин [5, 6]. Микросети переменного тока (AC microgrids) сохраняют доминирующее положение благодаря полной совместимости с существующей электромеханической инфраструктурой, простоте трансформации уровней напряжения и наличию апробированных методологий регулирования частоты. К недостаткам данных систем следует отнести снижение эффективности при высокой концентрации однофазных нелинейных нагрузок, а также дополнительные потери, обусловленные многократной конвертацией по схеме DC/AC/DC [7, 8]. Гибридные комплексы AC/DC, сопряженные посредством двунаправленных преобразователей напряжения (Voltage Source Converter, VSC) с широтно-импульсной модуляцией, позволяют достичь максимальной гибкости при интеграции гетерогенных источников и потребителей. Реализация таких комплексов требует внедрения многоуровневых стратегий координации, направленных на оптимизацию межсистемных перетоков мощности, демпфирование циркулирующих токов и обеспечение динамической устойчивости в переходных режимах с применением методов векторного управления или модельно-упреждающего регулирования (Model Predictive Control, MPC) [5].

Энергетический баланс микросетей детерминируется структурой генерирующих мощностей, определяющей ключевые технико-экономические показатели (LCOE, NPV, срок окупаемости), экологические характеристики (углеродный след, выбросы NO_x/SO_x) и степень энергетической автономии. Микросети на базе ВИЭ обеспечивают декарбонизацию энергоснабжения, однако стохастическая природа солнечной инсоляции и ветрового потенциала требует применения методов прогнозирования (ARIMA, нейросетевые модели) и обязательного резервирования посредством СНЭЭ или традиционных генераторных установок для обеспечения нормативной надежности электроснабжения [9]. Традиционные микросети, функционирующие на основе дизель-генераторных или газопоршневых агрегатов, отличаются высокой степенью диспетчеризуемости, что гарантирует поддержание стабильности частоты при резких флуктуациях нагрузки. К недостаткам стоит отнести значительные операционные затраты и серьезный экологический ущерб окружающей среде в процессе эксплуатации. Гибридные конфигурации, интегрирующие ВИЭ и традиционные источники, позволяют реализовать стратегии оптимального распределения нагрузки (economic dispatch). Минимизация целевой функции, включающей затраты на топливо, амортизационный износ оборудования и штрафные санкции за отклонение от диспетчерского графика, достигается за счет внедрения интеллектуальных систем управления энергией (Energy management system, EMS) на базе детерминированных или эволюционных алгоритмов оптимизации [10].

Масштабирование микросетей формализуется через установленную мощность генерации и пиковую нагрузку, определяющих архитектуру, требования к системам связи и методы координации РЭР. Маломасштабные системы (до 10 кВт), ориентированные на индивидуальное энергоснабжение, характеризуются упрощенной топологией. В данных системах применяются бытовые инверторы с интегрированной функцией обнаружения островного режима (islanding detection) и локальные алгоритмы управления на базе ПИ-



регуляторов или аппарата нечеткой логики. Среднемасштабные микросети (10 кВт – 1 МВт), предназначенные для электроснабжения коммерческих и промышленных объектов, требуют внедрения иерархических систем управления (Multi-Goal Hierarchical Management Systems, MGEMS). Функционал таких систем включает прогностические модели генерации и потребления, алгоритмы оптимизации циклов заряда/разряда накопителей энергии, а также механизмы автоматического переключения между сетевым и автономным режимами при строгом соблюдении нормативов качества переходных процессов. Крупномасштабные системы (свыше 1 МВт) представляют собой сложные киберфизические комплексы с распределённой архитектурой управления. Данный класс систем характеризуется поддержкой стандартов МЭК 61850/61968 (IEC 61850/61968) и возможностью агрегации в виртуальные электростанции (Virtual Power Plant, VPP), что позволяет им функционировать в качестве единых субъектов оптового рынка электроэнергии и предоставлять системные услуги, включая регулирование частоты и обеспечение резервов активной мощности [11, 12].

Результаты

В ходе исследования формализованы основные архитектурные и функциональные типы микросетей. Режимы функционирования. Автономные микросети требуют внедрения стратегий master-slave или методов статических характеристик (droop control) для балансировки мощности в условиях отсутствия связи с точкой общего присоединения. Сетевые системы ориентированы на двусторонний обмен мощностью и участие в управлении спросом. Типология по роду тока. Выявлено, что микросети постоянного тока минимизируют каскады преобразования и устраняют проблему THD. Микросети переменного тока сохраняют доминирование за счет совместимости с инфраструктурой, тогда как гибридные комплексы обеспечивают максимальную гибкость через бидирекционные преобразователи с векторным или модельно-упреждающим управлением. Масштабируемость. Установлена зависимость сложности управления от мощности: маломасштабные (до 10 кВт) базируются на ПИ-регуляторах; среднемасштабные (до 1 МВт) требуют систем энергоменеджмента; крупномасштабные (свыше 1 МВт) функционируют как виртуальные электростанции.

Обсуждение

Сравнительный анализ продемонстрировал, что, несмотря на высокую эффективность DC-архитектур, их имплементация ограничена отсутствием селективных защит. Использование гибридных топологий нивелирует этот недостаток, однако требует введения сложных алгоритмов подавления циркулирующих токов. Особое внимание следует уделять динамической устойчивости в моменты «бесшовного» перехода между сетевым и островным режимами. Перспективным вектором развития является переход от локальных алгоритмов к распределенным стратегиям на базе протоколов МЭК, что критично для КФС мощностью более 1 МВт.

Заключение

Выбор архитектуры микросети на предпроектной стадии является задачей мультикритериальной оптимизации, требующей учета совокупности детерминированных и стохастических факторов. К ним относятся: технические ограничения (баланс активной и реактивной мощностей, показатели динамической устойчивости частоты и напряжения), технико-экономические критерии (LCOE, CAPEX/OPEX, дисконтированный срок окупаемости), а также нормативно-правовые требования (регламенты технологического присоединения и стандарты качества электроэнергии). Формализованная классификация позволяет структурировать пространство проектных решений, обеспечивая обоснованный синтез топологии системы и выбор иерархических алгоритмов управления — от локальных ПИ-регуляторов до распределенных стратегий на базе алгоритмов MPC. Данный подход гарантирует соблюдение целевых показателей надежности, минимизацию коэффициента гармонических искажений и обеспечение масштабируемости системы. В контексте развития интеллектуальных энергосистем (Smart Grids) систематизация методологий проектирования микросетей является необходимым условием для обеспечения интероперабельности РГ. Данный подход способствует повышению живучести сети при каскадных отказах и позволяет реализовать адаптивные сценарии функционирования в условиях высокой неопределенности параметров генерации и нагрузки.

Литература

1. Григораш, О.В., Квитко, А.В. Микросети (Microgrids) как основа интеллектуальной энергетики: учеб. пособие. Краснодар: КубГАУ, 2020, – 185 с.



2. Lasseter, R.H. Microgrids, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2002, Volume 1, pp. 305–308.
3. Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J. [et al.] Hierarchical Control of Microgrids, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, Volume 58, Issue 1, pp. 158–172.
4. Olivares, D.E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A.H. [et al.] Trends in Microgrid Control, IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, Volume 5, Issue 4, pp. 1905–1919.
5. Илюшин, П.В., Вольный, В.С. Обзор структур микросетей низкого напряжения с распределёнными источниками энергии. Доклады научных конференций, М., 2020, – 12 с.
6. Justo, J.J., Mwasilu, F., Jung, J. [et al.] AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, Volume 24, pp. 387–405.
7. Макаров, В.Г. Модельно-упреждающее управление в электроприводе и электроэнергетике: монография. Казань: Изд-во КНИТУ, 2021, – 240 с.
8. Planar, V., Kumar, R. Hybrid AC/DC Microgrids: A Review of Control Strategies and Architectures, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, Volume 135, p. 107498.
9. Techno-Economic Sustainability Analysis of Optimal Microgrid Systems with Hybrid Renewable Energy Technologies, ResearchGate, 2026.
10. Guerrero, J.M. [et al.] Hierarchical Control of Microgrids, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, Volume 58, Issue 1, pp. 158–172.
11. Farrokhhabadi, M., Cañizares, C.A., Simpson-Porco, J.W. [et al.] Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples, IEEE Transactions on Power Systems, 2020, Volume 35, Issue 1, pp. 13–29.
12. Шакарян, Ю.Г., Лачугин, М.В. Виртуальные электростанции — перспективное направление интеграции распределенной генерации в энергосистемы. Энергия единой сети, 2017, – №3 (32), с. 14–23.