

Bernd M. Buchholz · Zbigniew A. Styczynski

Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks

 Springer

Бернд М. Бухгольц · Збигнев А. Стычински

Smart Grids – основы и технологии энергосистем будущего

Перевод с английского



Москва
Издательский дом МЭИ
2017

УДК 621.311-52;620.9-52
ББК 31-5-05
Б 943

Научные редакторы перевода:

Ю.В. Шаров,
профессор, Член Правления, руководитель Блока инжиниринга ПАО «Интер РАО»;
П.Ю. Коваленко,
ассистент кафедры автоматизированных электрических систем УрФУ;
К.А. Осинцев,
руководитель направления ООО «Интер РАО – Инжиниринг»

Бухгольц Б.М.

Б 943 Smart Grids — основы и технологии энергосистем будущего /
Б.М. Бухгольц, З.А. Стычински; пер. с англ.: науч. ред. перевода
Ю.В. Шаров, П.Ю. Коваленко, К.А. Осинцев; под общ. ред.
Н.И. Воропая. — М.: Издательский дом МЭИ, 2017. — 461 с.: ил.

ISBN 978-5-383-01228-4

Книга доктора Бернда Михаэля Бухгольца и профессора Збигнева Антони Стычински — профессионалов и практиков мирового уровня — посвящена актуальной концепции Smart Grid. Авторами детально раскрыты ключевые предпосылки к созданию интеллектуальных электроэнергетических систем и представлен всесторонний анализ потенциала внедрения концепции в таких областях, как генерация, передача и потребление электроэнергии, а также рынок электроэнергии, мощности и системных услуг. Значительное внимание уделено перспективам применения передовых информационно-коммуникационных технологий в электроэнергетике будущего. Авторы рассматривают широкомасштабное внедрение возобновляемых источников энергии, виртуальных электростанций и повышение степени автоматизации управления в качестве основы интеллектуальных электроэнергетических систем; в книге систематизирован мировой опыт и достижения в этой области.

Этот обширный и многогранный труд адресован научным работникам, аспирантам и студентам вузов, обучающимся по направлению «Электроэнергетика и электротехника», специалистам, рассматривающим возможность реализации интеллектуальной электроэнергетической системы в России, а также широкому кругу любознательных читателей.

УДК 621.311-52;620.9-52
ББК 31-5-05

ISBN 978-5-383-01228-4 (рус.)
ISBN 978-5-642-45119-5 (англ.)

© Бухгольц Б.М., Стычински З.А., 2017
© Издание на русском языке, оформление
АО «Издательский дом МЭИ», 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к изданию на русском языке	15
Предисловие к изданию на английском языке	19
Предисловие к изданию на немецком языке	21
Список аббревиатур	23
Глава 1. КОНЦЕПЦИЯ И СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ БУДУЩЕГО	27
1.1. Движущие силы интеллектуальных сетей	27
1.2. Ключевые элементы концепции европейской интеллектуальной сети	31
1.3. Изменения энергетической политики в Европе и их последствия для интеллектуальных сетей	38
<i>Список литературы к гл. 1*</i>	44
Глава 2. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ: РЕСУРСЫ И ПОТЕНЦИАЛ	46
2.1. Новые тенденции и требования к генерации электроэнергии	46
2.2. Возобновляемые источники энергии, отличающиеся непостоянством выработки электроэнергии: ветер и солнце	50
2.2.1. Ветроэлектрические установки	50
2.2.2. Использование солнечной энергии для производства электроэнергии	56
2.3. Комбинированное производство тепловой и электрической энергии на основе возобновляемых источников энергии	63
2.3.1. Электростанции на биотопливе	64
2.3.2. Геотермальные электростанции	67
2.3.3. Топливные элементы	68
2.4. Системы аккумулирования электроэнергии	73
2.4.1. Типы систем аккумулирования электроэнергии	73
2.4.2. Системы длительного аккумулирования больших объемов электроэнергии	74
2.4.2.1. Гидроаккумулирующие электростанции	74
2.4.2.2. Аккумуляция энергии сжатым воздухом	75
2.4.3. Стационарные аккумуляторные батареи	77
2.4.4. Преобразование электроэнергии в газ с использованием электролиза	81
2.4.5. Управление электропотреблением с использованием накопителей тепловой энергии	83
2.5. Повышенные требования к гибкости регулируемых электростанций	85
<i>Список литературы к гл. 2</i>	89
Глава 3. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОНЦЕПЦИИ SMART GRID В МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ	91
3.1. Подстанции — узлы электрической сети	91
3.1.1. Схемы и компоненты подстанций	92
3.1.2. Инновационные технологии распределительных устройств с воздушной изоляцией	97
3.1.3. Распределительное устройство с элегазовой изоляцией	101
3.2. Управление и автоматизация ЭЭС с помощью цифровых технологий	103
3.2.1. Иерархия и обработка данных при управлении ЭЭС и ее автоматизации	103
3.2.2. Системы защиты и управления на подстанциях	106
3.2.2.1. История развития	106
3.2.2.2. Усовершенствованная технология ИЭУ	109

3.2.2.3. Схемы защиты на подстанциях УВН, СВН и ВН	115
3.2.3. Технологии для центров диспетчерского управления	124
3.3. Технологии передачи значительных объемов электроэнергии	128
3.3.1. Обзор	128
3.3.2. Передача электроэнергии переменным током	131
3.3.3. Передача электроэнергии постоянным током	135
3.3.4. Гибкие системы передачи электроэнергии переменным током с использованием регулирования активной и реактивной мощности	140
3.4. Актуальные проблемы магистральных электрических сетей	145
3.4.1. Влияние непостоянства ветровой и солнечной генерации	145
3.4.2. Дислокация центров генерации и потребления	148
3.4.3. Применение силовой электроники в схеме выдачи мощности и ее влияние на мощность короткого замыкания	151
<i>Список литературы к гл. 3</i>	154
Глава 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ И ВЛИЯНИЕ НОВЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СЕТИ	155
4.1. Категории распределительных сетей	155
4.2. Оборудование в сетях среднего напряжения: первичное и вторичное распределение	156
4.3. Структуры сетей среднего и низкого напряжения	162
4.4. Режимы заземления нейтрали	166
4.4.1. Заземление нейтрали через дугогасящий реактор	168
4.4.2. Изолированная нейтраль	170
4.4.3. Глухое и низкоомное резистивное заземление нейтрали	171
4.4.4. Комбинированное заземление нейтрали	172
4.4.5. Обобщение режимов заземления нейтрали	172
4.4.6. Практический опыт выбора наиболее эффективного метода заземления нейтрали	174
4.5. Системы защиты в распределительных сетях	178
4.5.1. Сети среднего напряжения	178
4.5.2. Питающие подстанции сетей среднего напряжения	185
4.5.3. Сети низкого напряжения	187
4.6. Эксплуатация распределительной сети	187
4.6.1. Обеспечение качества электроэнергии	187
4.6.2. Управление процессами	194
4.7. Новые тенденции в распределительных системах	198
4.7.1. Распределенная генерация и новые типы нагрузки	198
4.7.2. Факторы, влияющие на качество электроэнергии	200
<i>Список литературы к гл. 4</i>	202
Глава 5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И НАБЛЮДАЕМОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	203
5.1. Основные причины крупных системных аварий в энергосистемах и приобретенный опыт	204
5.1.1. Общие сведения. Явление лавины напряжения	204
5.1.2. Системная авария на северо-востоке США и в Канаде (2003 г.)	207
5.1.3. Крупномасштабное отключение электроснабжения в Лондоне (2003 г.)	210
5.1.4. Системная авария в Швеции и Дании (2003 г.)	211
5.1.5. Системная авария в Италии (2003 г.)	212
5.1.6. Системная авария в Афинах (2004 г.)	214

5.1.7. Крупная авария на юге Москвы (2005 г.)	215
5.1.8. Крупное отключение электроснабжения в Германии и других странах континентальной Европы (2006 г.)	216
5.2. Операционные зоны и системные услуги	219
5.2.1. Управление электроэнергетическими системами	220
5.2.2. Регулирование частоты	223
5.2.3. Регулирование напряжения	225
5.2.4. Восстановление электроснабжения	226
5.2.5. Формирование графиков генерации: принцип более выгодного предложения	227
5.2.6. Обеспечение системных услуг распределенными источниками энергии	228
5.3. Наблюдаемость электроэнергетической системы и интеллектуальное управление критическими режимами	234
5.3.1. Необходимость повышения наблюдаемости	234
5.3.2. Методы прогнозирования для надежного функционирования электроэнергетических систем	236
5.3.2.1. Основные принципы прогнозирования генерации на основе ВИЭ с непостоянной выработкой электроэнергии	236
5.3.2.2. Прогноз критических режимов в объединенной ЭЭС на сутки вперед	240
5.3.2.3. Необходимость в прогнозах критических режимов в иерархической структуре управления ЭЭС	241
5.3.2.4. Региональный подход к задаче прогнозирования, обеспечению баланса и формированию режимных графиков в распределительных сетях	242
5.3.3. Современные концепции защиты	245
5.3.3.1. Оценка надежности защиты	245
5.3.3.2. Адаптивная защита	248
5.3.3.3. Системная защита	251
5.3.4. Мониторинг режимов ЭЭС на основе синхронизированных векторных измерений	253
5.3.5. Методы оценки статической и динамической устойчивостей ЭЭС	258
5.3.6. Мониторинг погодных условий и гибкая загрузка ЛЭП	264
5.3.7. Выводы	264
<i>Список литературы к гл. 5</i>	<i>265</i>
Глава 6. ТРИ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	267
6.1. Зависимость между интеллектуальными ЭЭС и интеллектуальными рынками электроэнергии (Smart Markets) на уровне местных распределительных сетей	267
6.2. Принцип 1: автоматизация и дистанционное управление местными распределительными сетями	271
6.2.1. Регулирование напряжения	271
6.2.1.1. Традиционное регулирование напряжения и адаптация к режимам интеллектуальных энергосистем	271
6.2.1.2. Применение подхода интеллектуального электроснабжения к регулированию напряжения	275
6.2.2. Возможности регулирования перетоков мощности	276
6.2.3. Ускоренная локализация повреждений и восстановление электроснабжения после аварийных отключений	279
6.2.4. Расширенные концепции защиты	282
6.2.4.1. Изменение требований к схемам защиты	282

6.2.4.2. Схемы защиты с подключенными установками РГ	286
6.2.4.3. Векторные измерения в распределительных сетях	288
6.2.5. Экономические предпосылки формирования интеллектуальных ЭЭС на уровне местных распределительных сетей	290
6.3. Принцип 2: гибкость, создаваемая посредством виртуальных электростанций — интеллектуальная агрегация	293
6.3.1. Основы концепции виртуальных электростанций	293
6.3.2. Роль систем аккумулирования энергии и активного регулирования нагрузки ..	296
6.3.3. Бизнес-модели ВиЭС на перспективных рынках	300
6.4. Принцип 3: интеллектуальный учет и привлечение потребителей к участию в рынке электроэнергии	307
6.4.1. Основы технологии цифрового учета	307
6.4.2. Динамические тарифы	309
6.4.3. Влияние на поведение потребителей: реакция потребителей на сигналы рынка	312
6.4.4. Управление потреблением электроэнергии при зарядке электромобилей ..	318
6.5. Необходимость в системах связи для интеллектуальных распределительных сетей	322
<i>Список литературы к гл. 6</i>	<i>323</i>
Глава 7. СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	325
7.1. Действующие схемы поддержки генерации на основе ВИЭ	325
7.2. Перспективные рынки электроснабжения: общий обзор и анализ конкретного примера	330
7.3. Интеллектуальные услуги в области электроснабжения для совместного функционирования ЭЭС и рынков	337
7.3.1. Обзор интеллектуальных услуг на базе систем связи и информационных технологий	337
7.3.2. Услуги по считыванию показаний счетчиков и интеллектуального учета	339
7.3.3. Обмен данными и управление информацией	341
<i>Список литературы к гл. 7</i>	<i>342</i>
Глава 8. ПЕРЕДОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОСНОВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЭС	343
8.1. Важность единых стандартов информационно-коммуникационных технологий для интеллектуальных ЭЭС	343
8.1.1. Аспекты стандартизации информационно-коммуникационных технологий ..	343
8.1.2. Стандарты в области коммуникации	344
8.1.3. Стандарты информационных моделей для баз данных	349
8.1.4. Информационная безопасность	351
8.2. История развития средств связи для диспетчерского управления в электроэнергетических системах	352
8.2.1. Развитие технологий дистанционного управления подстанциями	352
8.2.2. Внедрение протоколов цифровой передачи данных	357
8.3. Универсальность применения серии стандартов МЭК 61850 для диспетчерского управления ЭЭС	365
8.3.1. Базовая модель и структура МЭК 61850	365
8.3.2. Объектно-ориентированная модель данных	369
8.3.3. Протоколы универсального стандарта связи	378
8.3.4. Службы протоколов	380
8.3.5. Средства проектирования АСУ ПС, не зависящие от поставщика ИЭУ	384
8.3.6. Проверка соответствия системы связи стандарту и приемочные испытания ..	388

8.3.7. Новые разделы стандарта, касающиеся интеллектуальной ЭЭС.....	393
8.4. Управление данными на основе общей информационной СИМ-модели согласно МЭК 61968 и МЭК 61970	395
8.5. Безопасность данных и коммуникаций по МЭК/ТС 62351	401
8.6. Глобальные усилия по созданию единых стандартов для интеллектуальных ЭЭС..	403
8.6.1. Эталонная архитектура МЭК/ТО 62357.....	403
8.6.2. Мандат Европейской комиссии М/490.....	406
8.6.3. Анализ глобальных усилий по внедрению согласованных стандартов для интеллектуальных ЭЭС	410
<i>Список литературы к гл. 8</i>	<i>417</i>
Глава 9. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЭС В МИРЕ.....	421
9.1. Интеллектуальные технологии крупнейших ЭЭС мира.....	421
9.1.1. Амбициозная стратегия развития ЭЭС в Китае.....	421
9.1.2. Цели развития объединенной энергосистемы в США	424
9.1.3. Развитие электроэнергетической системы в России и соседних странах	430
9.2. Обзор проектов в области интеллектуальных ЭЭС в Европе	435
9.2.1. Проекты 5, 6, 7-й Рамочных программ Европейского союза	436
9.2.2. Европейская инвентаризация национальных проектов в области интеллектуальных ЭЭС.....	439
9.3. Примеры опыта применения интеллектуальных ЭЭС	444
9.3.1. Web2Energy: три основных принципа интеллектуального распределения на практике.....	444
9.3.2. RegModHarz: регион, снабжаемый электроэнергией от ВЭС.....	449
9.3.3. Проекты, основанные на реакции потребителей, в США.....	453
9.3.4. Испытательный полигон интеллектуальной ЭЭС на острове Чеджу в Южной Корее	456
<i>Список литературы к гл. 9</i>	<i>459</i>