

# Тестирование «умных» электросетей

**Одной из главных обязанностей операторов электросетей является поставка чистого электропитания своим потребителям. Без соответствующего предварительного тестирования и квалификационных испытаний изделий, которые будут использоваться в электросетях, обеспечить это невозможно. В статье рассматриваются требования, предъявляемые электрическими компаниями и надзорными организациями к взаимодействию с электросетями.**

**Кен Кристенсен  
(Ken Christensen)**

Развитие «умных электросетей» (Smart grid) идет полным ходом. Еще недавно они были мечтой инженеров-энергетиков и электрических компаний, а сегодня стремительно обретают форму. Главной движущей силой «умной» электросети являются распределенные энергоресурсы (РЭР). Распределенная выработка электроэнергии становится все более важным компонентом энергетики в мировом масштабе. С ростом числа и производительности энергосистем на основе возобновляемых источников энергии и подключенных к сети накопительных устройств эти РЭР доказали, что не только являются эффективным источником электроэнергии, но и способствуют стабилизации электрической сети. Интеллектуальное координирование и управление распределением электроэнергии, поступающей от РЭР, в сущности, и является «умной» электросетью.

Когда РЭР, такие как ветряные и солнечные генераторы, аккумуляторные батареи, дизельные генераторы и двунаправленные зарядные устройства для электротранспорта с гибридным питанием, управляются и координируются интеллектуально, от этого выигрывают и операторы электросетей, и потребители. Такие управляемые источники электроэнергии обычно объединяются в микросети. Микросети могут работать, будучи подключенными к общей энергосистеме или не подключаясь к ней, в автономном режиме. Мощность микросетей может варьироваться от нескольких киловатт в жилых домах до десятков мегаватт в населенных пунктах, как, например, микросеть Gas & Electric Berrege Springs в Сан-Диего.

Оператор электросети может дистанционно управлять такими интеллектуальными РЭР с помощью современной силовой электроники, регулируя их активную и реактивную мощность. Это позволяет управлять активной мощностью для поддержания стабильной частоты и компенсировать реактивную мощность для стабилизации напряжения.

Для государственных и частных электрических компаний микросети тоже сулят определенную выгоду. Микросети можно отключить от общей сети

и использовать для электроснабжения в аварийных ситуациях. Во время стихийных бедствий микросети школ и продуктовых магазинов могут давать энергию для освещения, связи и хранения пищевых продуктов. Хорошим примером может послужить микросеть, которую построила компания Advanced Solar Products для школы г. Байонн в штате Нью-Джерси. Во время урагана «Сэнди» эта микросеть в течение нескольких дней давала энергию для связи и освещения.

От микросетей выигрывают и потребители. Объединяя аккумуляторные накопители энергии и электротранспорт с солнечными батареями, «умные» микросети могут смягчать или полностью компенсировать пиковые скачки нагрузки и сохранять избыточную энергию, выработанную в середине дня, для дальнейшего применения в более поздние часы, когда нагрузка на сеть может почти вдвое превышать дневную.

Илон Маск (Elon Reeve Musk), глава компании Tesla Motors, недавно заявил, что собирается объединить солнечный генератор SolarCity с автомобильным зарядно-разрядным устройством Tesla и аккумуляторной батареей Tesla PowerWall, которые, работая вместе, будут оптимизировать генерацию электроэнергии. Он тонко подметил их символическую взаимосвязь, заявив, что «солнечная энергия и аккумуляторы так же неотделимы друг от друга, как арахисовое масло от желе». И на той же неделе, когда Маск заговорил о микросетях, ConEd, энергопоставляющая компания Нью-Йорка, заявила, что сэкономит \$1,2 млрд на обновлении подсистем за счет внедрения РЭР, которые позволят компенсировать пики энергопотребления, что при ином подходе потребовало бы существенной модернизации инфраструктуры.

За последние пять лет стоимость РЭР существенно упала, достигнув отметки, за которой нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) возобновляемых источников энергии становится сравнимой с LCOE традиционных электростанций. Кстати, в недавних статьях и дискуссиях по вопросам РЭР

речь шла только о положительных финансовых аспектах интеграции возобновляемых источников энергии с «умными» сетями, а побочные экологические преимущества почему-то не упоминались.

Теперь перед производителями РЭР стоит сложная задача тестирования и проверки изделий, которые будут использоваться в электросетях. Многие производители никогда не выпускали изделия, которые должны соответствовать стандартам безопасности и отвечать требованиям, предъявляемым электрическими компаниями и надзорными организациями к взаимодействию с электросетями. Затраты времени и ресурсов на тестирование и квалификационные испытания РЭР всегда будут висеть тяжким грузом на производителях РЭР. Специализированные лаборатории могут проводить измерения параметров электросетей и системных компонентов в разных климатических условиях. Но сложный набор изменяющихся параметров невозможно одновременно тестировать в реальных условиях. Например, измерение параметров инверторов солнечных батарей ранним утром можно выполнять лишь раз в сутки в конкретных погодных условиях и с одним типом солнечного модуля. И если условия окажутся непригодными или возникнет проблема в схеме измерения, то тест придется перенести на следующий подходящий день. Тестирование в контролируемых лабораторных условиях является единственным приемлемым способом, отвечающим жестким требованиям ускорения продвижения товара на рынок.

Любой подключенный к сети генератор должен пройти обязательный набор тестов (таблица). Во многих случаях каждая страна (а подчас и каждая электростанция) предъявляет свои уникальные требования. Все эти тесты можно разделить на четыре группы (в скобках указаны соответствующие стандарты для Северной Америки):

- Проверка конструкции изделия.
- Требования безопасности/правила безопасности для электроустановок/нормативные акты (NFPA70/NEC, FCC).
- Промышленные стандарты (IEEE 1547/UL1741, требования CEC к эффективности инверторов).
- Требования для подключения к сетям (CAISO правило 21, ERCOT, WECC).

Кроме того, производители распределенных генераторов электроэнергии должны выполнять полное измерение их параметров в широком диапазоне рабочих условий, которые могут встретиться в процессе эксплуатации генератора, срок службы которого составляет обычно более 20 лет. Во всех этих условиях нужно измерять качество электроэнергии, гармоники, КПД генерации и преобразования электроэнергии.

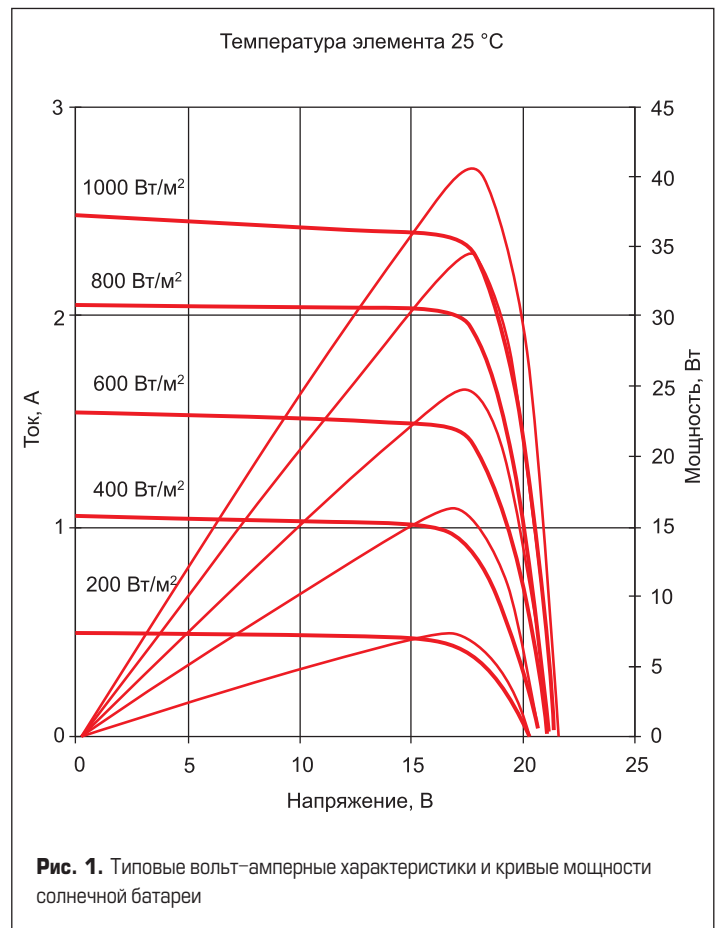


Рис. 1. Типовые вольт-амперные характеристики и кривые мощности солнечной батареи

Превосходным примером РЭР являются инверторные преобразователи солнечных батарей. Тестирование всех перечисленных выше параметров обычно занимает 30–40% от времени разработки инвертора солнечной батареи. Инверторные преобразователи солнечных батарей должны надежно генерировать электроэнергию в самых жестких климатических условиях — от пурги на крышах в северной Канаде в январе до песчаных бурь в пустыне на юго-западе США в августе. Инверторы должны обнаруживать аномальное напряжение

Таблица. Стандарты и типовые требования к сетям для РЭР

	Европа	МЭК	Северная Америка	Китай	Прочие страны
Стандарты безопасности	Директива по низковольтным устройствам: 2006/95/EC; EN 62109-1/2, фотоэлектрические инверторы; EN 50178, ветровые генераторы и топливные элементы EN 60730-1 FS; Маркировка CE	IEC 62109-1 IEC 62109-2	США: UL 1741 UL 62109-1 IEEE 1547 NEC 2014/2017 UL 1699B (AFCI) Канада: C22.2 / 107.1	Golden Sun	Япония: Технический стандарт JET PVm для электрооборудования Австралия: AS 3100
Требования ЭМС	Директива по ЭМС 2004/108: EN 61000-3-2/12 EN 61000-6-1/2/3/4 EN 61000-3-3/11 EN 55011	IEC 61000 серия CISPR11	IEEE 1547/1 IEEE C37.90 IEEE C62.41.2 IEEE C62.45 IEEE C90.2 FCC часть 15		
Стандарты на технические характеристики	EN 3744 EN3746 (шум) EN 50530, КПД инверторов EN 61683, КПД преобразования	ISO 3744 ISO 3746 IEC 61683	ANSI C12.1 управление инверторами Sunspec Калифорния: требования CEC к КПД Нью-Джерси — КПД	Golden Sun	Индия: IEC 61683 IEC 60068-2
Требования энергосетей	EN 50438, EN 62116, EN 61727 Германия: BDEW, VDE 0124-100 VDE-AR-N 4105, VDE 0126-1 Италия: CEI 0-21, CEI 0-16, ENEL Великобритания: G59/3, G83/2 Испания: RD1699/RD661	IEC 61727 IEC 62116	IEEE 1547/1/A SA — правило 21 1547/Поддержка сетей CSA C22.2 107.1	CGC/GF004:2011 CNCA/CTA 0004-2009A NB/T32004-2013	Австралия: AS 4777.2/3 Япония: JEAC 9701 Корея: программа сертификации фотоэлектрических устройств Бразилия: ABNT NBR 16149 ABNT NBR 16150 ABNT NBR IEC 62116 Южная Африка: SAGC
Программное обеспечение	EN 60730-1	IEC 60730-1	UL 1998 UL 60730-1 UL 61508		

и частоту и корректировать их или отключаться по команде оператора сети.

Одним из важнейших аспектов экономической целесообразности солнечной электростанции является максимальный КПД преобразования электроэнергии из постоянного тока в переменный. Повышение генерируемой мощности всего на долю процента в течение всего срока службы солнечной батареи может приводить к дополнительной выработке электроэнергии в масштабе электростанции на сотни или тысячи долларов на каждый миллион. Учитывая малую прибыльность современной энергетики, эти финансовые крохи зачастую оказывают решающее влияние на целесообразность проекта.

Полный КПД инверторов солнечных батарей определяется в основном двумя ключевыми компонентами: эффективностью отслеживания точки оптимальной мощности (MPPT) и эффективностью преобразования постоянного напряжения в переменное. Мощность, генерируемая солнечной батареей, зависит от ее рабочей точки на вольт-амперной характеристике. Пример вольт-амперной характеристики солнечной батареи приведен на рис. 1. Ток, генерируемый батареей, растет с ростом освещенности. Напряжение снижается с ростом температуры. В течение дня температура и освещенность постоянно изменяются. За точное и эффективное отслеживание MPPT отвечает встроенная в инверторный преобразователь микропрограмма управления. В какой-то степени эти алгоритмы управления составляют «фирменный секрет» каждого инвертора.

Для тестирования способности инвертора отслеживать точку MPPT солнечной батареи используется имитатор фотоэлектрической батареи, который имитирует поведение батареи выбранного типа. Имитатор фотоэлектрической батареи генерирует кривую мощности, соответствующую характеристикам конкретной солнечной батареи. Каждая модель солнечной батареи обладает уникальной вольт-амперной характеристикой, которая зависит от технологии изготовления батареи (тонкопленочная, поликремниевая и т. п.) и конструкции фотоэлементов. Представьте себе сложность и стоимость тестирования каждой солнечной батареи с инвертором без имитатора фотоэлектрической батареи. Помимо всего прочего, расширенные имитаторы фотоэлектрических батарей автоматизируют тестирование и составление отчетов согласно стандарту EN50530, который является промышленным стандартом для измерения характеристик отслеживания точки максимальной мощности. Протокол EN50530 исследует систему отслеживания точки максимальной мощности инвертора в статическом и динамическом режиме, систематически измеряя эффективность алгоритма MPPT. На полное

выполнение тестов EN50530 уходит почти 7 ч. Автоматизация протокола EN50530 и автоматическая генерация определенных в стандарте отчетов повышают эффективность работы инженеров.

Тестирование преобразования напряжения из постоянного в переменное обычно выполняется по протоколу тестирования инверторов Sandia и/или стандарту IEC 61683 — международному стандарту, определяющему процедуру измерения КПД преобразователей энергии. Это сложные процедуры, требующие применения климатических камер и прецизионных измерительных приборов. Как и во всех измерениях, контрольно-измерительные приборы должны иметь точность выше, чем точность измерения, которую вы хотите получить. Пиковый КПД преобразования большинства современных солнечных инверторов превышает 98%. В процессе измерения КПД преобразования инженерам необходимо получить разрешение не хуже 0,1%, поэтому для измерения входного постоянного и выходного переменного напряжений нужно использовать анализатор мощности с погрешностью не хуже 0,05%.

Дополнительно тестирование усложняется тем, что технологии изготовления инверторов постоянно изменяются. Для снижения стоимости компонентов, стоимости монтажа и потерь ( $P_t$ ) постоянное напряжение солнечных батарей постоянно увеличивают. Следующее поколение солнечных генераторов, включающих солнечные батареи и инверторные преобразователи, работает при напряжении 1500 В постоянного тока. Поэтому испытательные лаборатории должны обновлять свои анализаторы мощности, имитаторы фотоэлектрических батарей и источники питания для работы с таким высоким напряжением.

Компания Keysight Technologies создала решение, способное тестировать инверторные преобразователи следующего поколения с напряжением 600, 1000 и 1500 В постоянного тока. Это решение состоит из имитатора фотоэлектрических батарей Keysight N8900APV (рис. 2) и анализатора мощности Keysight IntegraVision PA2203A (рис. 3), подключенного к трехфазному инверторному преобразователю мощностью 12 кВт. Это решение позволяет имитировать реальные климатические условия и оценивать их влияние на все характеристики инвертора. В сочетании с имитатором сети переменного тока это решение для тестирования инверторов позволяет диагностировать проблемы качества электроэнергии, качества генератора и КПД.

\* \* \*

Проблемы индивидуального тестирования РЭР могут быть очень сложными. Исследование взаимодействия всех компонентов микросети в строгом соответствии с требованиями сетевого взаимодействия повышает сложность тестирования в геометрической прогрессии. С широким распространением микросетей, несомненно, будет расти и объем квалификационных испытаний, требуемых операторами электросетей. Без соответствующего тестирования перед подключением изделий к сети сеть становится менее надежной.

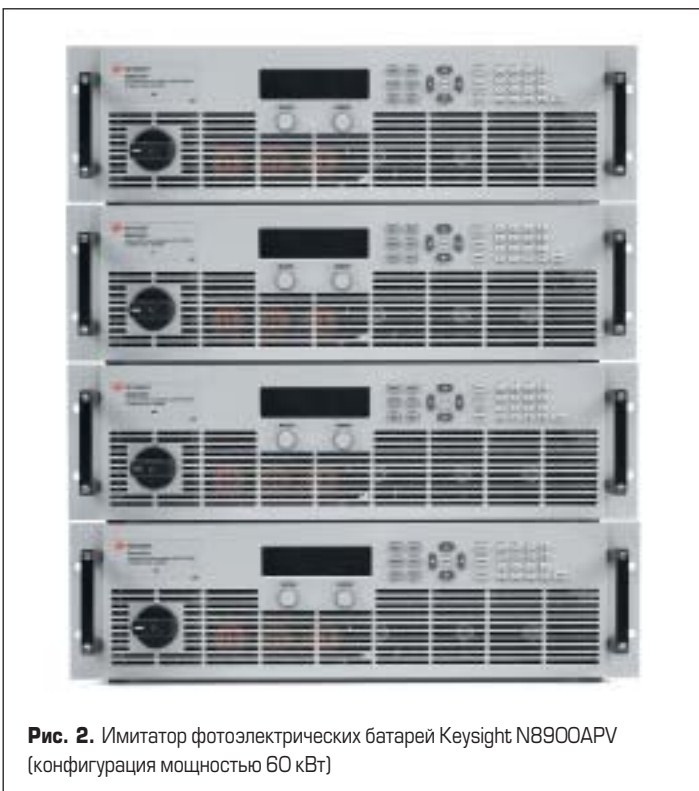


Рис. 2. Имитатор фотоэлектрических батарей Keysight N8900APV (конфигурация мощностью 60 кВт)



Рис. 3. Четырехканальный анализатор мощности Keysight PA2203A