

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ В УМНЫХ СЕТЯХ С ТРЕБОВАНИЯМИ КАЧЕСТВА ЭНЕРГИИ

Л. М. Четошникова

Будущие энергосети будут включать в себя разные локальные источники как альтернативы централизованной генерации энергии в поддерживаемых локальных нагрузках. Стоимость электрической энергии, выработанной локальными источниками, будет зависеть от вида источника, доступности возобновляемой энергии, использования накопителей энергии и т. д. В данной работе предлагается метод оптимизации использования локальных источников за счет тщательного отбора их с целью минимизации общей стоимости электроэнергии.

Ключевые слова: локальные источники энергии, возобновляемые источники энергии, микросеть, распределенная генерация.

Современная энергетика в мире развивается семимильными шагами. И это не просто метафора, таковы требования времени. Появляется больше возобновляемых источников, источников экологически чистой выработки, развиваются «умные электрические сети», что ведет к экономичности и экологичности энергетики.

Будущее развитие энергосетей предполагает более широкое включение локальной генерации, обеспечиваемой возобновляемыми и альтернативными источниками энергии и малыми электростанциями, дополняя сеть собственной инфраструктурой трансмиссии и распределения. Электроэнергетические системы (ЭЭС) будущего символически можно представить как на рисунке 1, где 1 – промышленные потребители, 2 – социально-бытовые потребители, 3 – традиционные крупные электростанции, 4 – малые ГТУ-ТЭЦ, 5 – мини- и микро-ГЭС, 6 – ВЭУ, 7 – солнечные электростанции, 8 – топливные элементы, 9 – поршневые двигатель-генераторы, 10 – накопители энергии, 11 – биогаз. Как видно из этого рисунка, ЭЭС будущего должны сочетать традиционные источники электроэнергии, без которых проблематично электроснабжение крупных потребителей и обеспечение целесообразных темпов роста электропотребления, а также распределенную генерацию.

Крупные электростанции имеют трансформацию на напряжения 110 кВ и выше и выход в основную сеть высших напряжений, осуществляющую транспорт электроэнергии до крупных центров потребления.

В дополнение к традиционным источникам, должны получить существенное разви-

тие установки распределенной генерации, в том числе на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ), которые устанавливаются в распределительной сети 6-35 кВ. Третий уровень составят мини- и микро-установки (мини- и микро-ГЭС, ВЭУ, солнечные электростанции, топливные элементы и т. п.), которые подключаются на напряжение 0,4 кВ и устанавливаются у небольших потребителей, например, в отдельных домах или даже в квартирах.

Подобная трансформация электроэнергетической системы будущего придает им положительные качества, но одновременно создает и определенные проблемы. Основные изменения в электроэнергетической системе в связи с появлением распределенной генерации сводятся к следующему:

- распределенная генерация в непосредственной близости от центра нагрузки создает возможность отсрочки или устраняет вовсе необходимость сооружения региональных электростанций и дополнительной сетевой инфраструктуры за счет срезания пикового потребления и разгрузки существующих сетей. Наличие источников напряжения в непосредственной близости от нагрузки увеличивает надежность энергоснабжения, способствует поддержанию должных уровней напряжения в сети и снижает риск потери устойчивости. За счет распределенной генерации снижаются потери в сетях и перетоки реактивной мощности [1];

- развитие распределенной генерации разгружает как основную, так и распределительную сеть, что способствует снижению потерь электрической энергии и повышению надежности и устойчивости ЭЭС. Кроме того,

появляются дополнительные возможности реализации электроэнергии за счет освобождения пропускной способности связей [2].

- как правило, в систему распределенной генерации входят элементы, имеющие новые динамические и энергетические характеристики, с другими возможностями управления по сравнению с используемыми в существующих системах электроснабжения. У таких источников, как, например, ветроэнергетические, плохо прогнозируемые характеристики работы, что затрудняет их интеграцию и с общей сетью, и с потребителем. Когда дует сильный ветер, нежелательно терять эту бесплатную энергию и надо, чтобы сеть ее могла принять. Возникает вопрос, как регулировать соединение с сетью такого непостоянного генератора, чтобы его эффективно использовать? Кроме того, начинает возникать масса других проблем: из-за непостоянства скорости ветра у таких источников колеблется напряжение, частота, непостоянна и выдаваемая в сеть мощность.

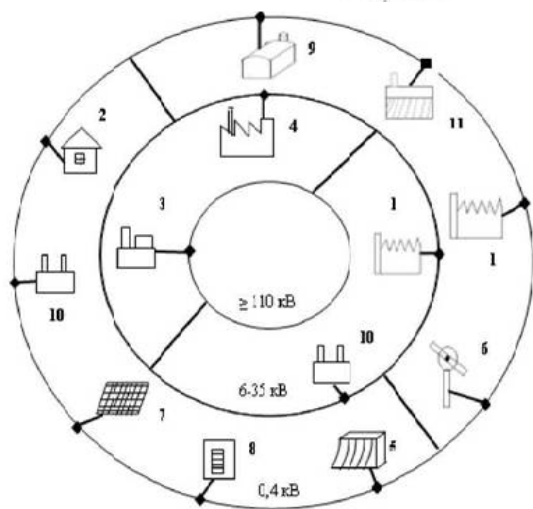


Рисунок 1 – Электроэнергетическая система будущего

Когда таких небольших источников генерации становится много, в электросети могут случиться проблемы уже системного характера. При очень сильном ветре ВЭУ останавливаются, что при значительных их мощностях вносит серьезные возмущения в работу ЭЭС. Все это может привести к нарушению устойчивости системы и каскадному развитию аварии, что порождает очередную задачу – управление работой системы. Для этого нужна очень серьезная, интеллектуальная, гибкая система, которая сочетает локальное и централизованное управление с системой

сбора и передачи больших объемов информации. При этом она должна иметь мощные вычислительные средства для анализа и прогнозирования обстановки в энергосистеме в целом и на отдельных участках [3];

- к настоящему времени имеются некоторые исследования влияния распределенной генерации на свойства ЭЭС в установившихся и переходных режимах, однако эта проблема находится еще в начальной стадии изучения и более-менее уверенные выводы и рекомендации делать пока преждевременно;

- нет научно обоснованных выводов о влиянии распределенной генерации на качество электроэнергии по уровням напряжений. Неоднозначно также влияние распределенной генерации на генерацию высших гармоник в системе. Теоретически, наличие локальных источников в распределительных сетях позволяет более стабильно поддерживать уровни напряжений в узлах за счет возможностей генераторов по генерированию реактивной мощности. В традиционных распределительных сетях потери напряжения тем больше, чем дальше от питающей подстанции высокого напряжения находятся потребители. Что касается генерации в сеть высших гармоник, то это происходит в результате подключения локальных источников к распределительной сети через преобразователи переменного тока в постоянный и обратно;

- существующие системы релейной защиты и автоматики построены с использованием принципа одностороннего питания распределительной сети низкого напряжения. При наличии распределенных источников энергии сеть должна иметь многостороннее питание, что приводит к изменению принципов построения ряда ее элементов. Это усложняет систему релейной защиты и автоматики, противоаварийного управления ЭЭС. Кроме этого, подключение источников распределенной генерации к распределительной сети увеличивает токи короткого замыкания, что может потребовать замены коммутационных аппаратов, изменения настроек защит и т. д.;

- современные средства диспетчерско-технологического управления, которыми располагают сегодня диспетчера распределенной сети 10-6 кВ, не позволяют вести контроль перетоков в распределенной сети. Вопросы реагирования существующих схем релейной защиты на разные режимы генерации в распределенной сети сего-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ В УМНЫХ СЕТЯХ С ТРЕБОВАНИЯМИ КАЧЕСТВА ЭНЕРГИИ

дня тоже мало изучены. А они требуют глубокого анализа и исследования. В последнее время появился ряд разработок, в которых предпринимаются попытки решения этой проблемы на основе распределенной системы диспетчерского управления с использованием Интернет-технологий [4].

Для эффективной работы сетей с распределенной генерацией необходима совокупность устройств, устанавливаемых в электрической сети и предназначенных для стабилизации напряжения, повышения управляемости, оптимизации потокораспределения, снижения потерь, повышения статической и динамической устойчивости, а в итоге – повышения пропускной способности сети и снижения потерь. Требуется тщательное изучение свойств и характеристик различных установок, разработка их математических моделей работы в различных режимах, новых методов анализа режимов работы систем электроснабжения, математических моделей и методов планирования развития систем электроснабжения и ЭЭС с учетом распределенной генерации.

Микросетью принято называть локализованную группировку объектов по производству электроэнергии, ее аккумулированию и объектам потребления. Обычно микросеть присоединена к конвенциональной централизованной сети (макросеть) в точке присоединения. При отсоединении, то есть размыкании микросети и макро-сети, микросеть может функционировать в автономном режиме.

Генерация и нагрузка в микросети обычно соединены на низком напряжении. С точки зрения системного оператора, микросеть может управляться как единый объект. Единый или многочисленные распределенные источники генерации в микросети и ее способность обеспечивать потребителей энергией в автономном режиме обеспечивают высокую степень надежности.

Для примера рассмотрим локальную электрическую микросеть, выполненную на базе Smart Grid и использующую нетрадиционные возобновляемые источники энергии. В качестве локальных источников рассматриваются, например, солнечные панели, ветряные турбины, устройства накопления энергии и топливные элементы. В общем случае локальная генерация может быть интегрирована в общую сеть или стать единственным источником энергии, когда отсутствует подключение к сетям общего пользования. Успешная

интеграция ВИЭ в электрическую систему возможна при внедрении Smart Grid по мере увеличения доли выработки электроэнергии с использованием возобновляемых источников энергии.

Интеллектуальная микросеть должна действовать эти дополнительные источники с целью более эффективного распределения энергии путем приближения генерации энергии к потребителям, чтобы сократить потери в линиях и поддерживать КПД передачи как можно более высоким. Проблема еще заключается в том, что невозможно оценить заранее выработку энергии такими источниками, т. к. в реальных условиях переменчивого характера естественных потоков энергии (ветра, солнца) получаемая от них мощность не будет соответствовать мощности самой установки. На самом деле, топология сети и управление потоками могут значительно влиять на количество энергии, потребляемой нагрузками от разных источников в зависимости от их положения в сети. Кроме того, полная стоимость энергии также будет зависеть от величины ее потерь в распределительных сетях. В этом случае должны применяться специфические методы оптимизации. Локальные источники должны вводиться, прежде всего, с целью обеспечения наилучших показателей.

Во-первых, их работа должна соответствовать режиму максимальной эффективности (скорости ветра, близкие к номинальным для данного типа ветроустановки, высокий уровень солнечной радиации).

Во-вторых, они могут вносить вклад в поддержание напряжений сети в заданном диапазоне.

В-третьих, они могут обеспечивать качество энергии на требуемом уровне, внося в сеть гармонические токи.

При оптимизации использования локальных источников необходимо принять во внимание все эти аспекты. Поэтому коммуникационная инфраструктура должна иметь информацию о сети, синхронизации и контроле локальных источников. Такая инфраструктура будет основываться на коммуникационном протоколе, который необходимо составить согласно выбранной стратегии сетевого менеджмента. Это станет важным отличительным свойством умной сети, где система получения данных и руководящего контроля принимает информацию от распределенных сенсоров нагрузки сети и команды об отключении, чтобы адаптировать структуру рас-

предела к динамике генерации энергии и потребления.

В данной работе рассматривается сеть с несколькими локальными источниками (ЛИ) энергии. Каждый источник имеет разные эксплуатационные издержки, пропорциональные выработанной активной энергии. Минимизация общих расходов обеспечивается при балансе энергии источника и потреблением ее нагрузкой. При этом сеть оптимизирована с ограничениями как по максимальной энергии, обеспеченной ЛИ, так и по качеству энергии.

Рассмотрим электрическую сеть, питаемую двумя классами источников:

1. Главным источником (ГИ), соединенным с общими шинами.

2. Локальными возобновляемыми источниками, расположенными в сети

Источники имеют ограничения по активной генерированной энергии и максимальной мощности. Поэтому ЛИ не могут полностью обеспечить нагрузку сети. Чтобы избежать значительных потерь в линии к линейным источникам подключается часть рядом расположенных потребителей и удаленных от главного источника. Потребители, расположенные вблизи ГИ, обеспечиваются энергией от него.

При создании модели линейной сети предполагается, что электрические параметры могут быть представлены в диапазоне частот как набор K гармоник, при этом соотношения между токами и напряжениями для каждой гармоники линейные.

Каждый локальный источник представляет собой генератор активного тока, то есть параллельно идеальному источнику тока I_m^k подключен импеданс соответствующего генератора $Z_{ЛИm}^k$, где $k = 1, 2, \dots, K$ обозначает номер гармоники и $m = 1, 2, \dots, M$ обозначает номер локального источника. При этом главный источник смоделирован как источник напряжения с идеальным генератором напряжения V_0^k последовательно с импедансом соответствующего генератора Z_0^k . Вектор токов, обеспечиваемый M локальными источниками, при гармонике k обозначается как

$$I^{(k)} = [I_1^{(k)}, \dots, I_M^{(k)}]^T \in C^M, \quad (1)$$

а вектор всех локально генерируемых токов как

$$I = [I^{(1)T}, \dots, I^{(K)T}]^T \in C^{MK}. \quad (2)$$

На рисунке 2 нагрузки изображаются как генераторы, поглощающие ток, и включенные параллельно с соответствующим импедансом. Фиксированные токи идеального генератора, характеризующие L нагрузок, обозначаются как $I_l^{(k)}$, где $l = 1, 2, \dots, L$. Импедансы участков линий обозначены $Z_{Li}^{(k)}$.

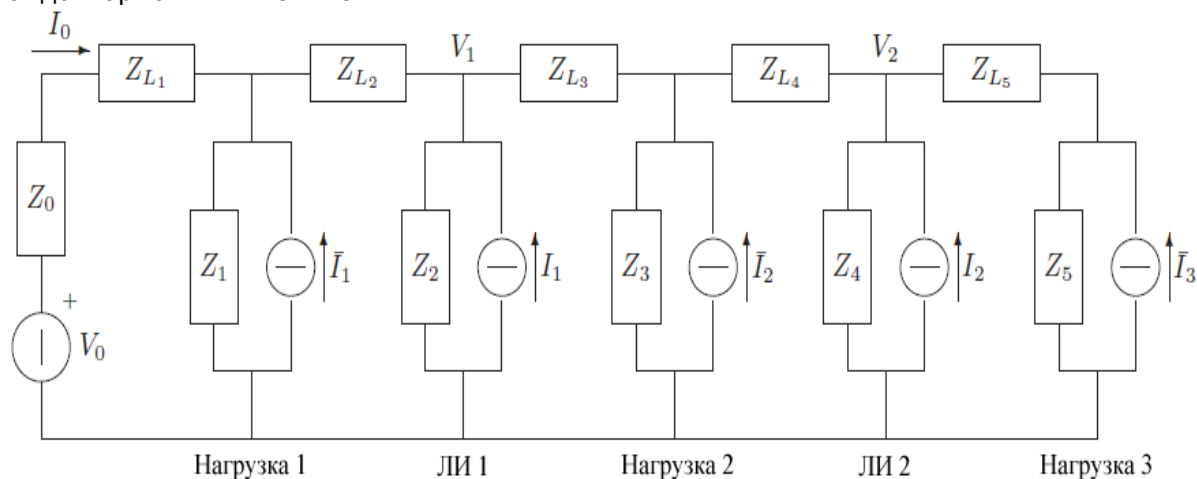


Рисунок 2 – Схема замещения электрической сети

На схеме замещения электрической сети (рисунок 1) в обозначениях опущен индекс гармоники $^{(k)}$.

Для линейной сети согласно принципу суперпозиции обеспечивается линейное соотношение (в диапазоне заданных частот):

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ В УМНЫХ СЕТЯХ С ТРЕБОВАНИЯМИ КАЧЕСТВА ЭНЕРГИИ

$$\begin{aligned} I_0^{(k)} &= a^{(k)} I^{(k)} + \alpha^{(k)} \\ V_m^{(k)} &= b_m^{(k)} I^{(k)} + \beta_m^{(k)}, \quad m > 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где векторы ряда $a^{(k)}$ и $b_m^{(k)}$ оба размером M , зависят от импедансов линии и нагрузки и от топологии специфической сети, постоянные $\alpha^{(k)}$ и $\beta_m^{(k)}$ также зависят от токов нагрузки $\bar{I}_l^{(k)}$ и от V_0^k .

Активная энергия, генерированная каждым источником, гармоникой k может быть записана как функция генерированных токов:

$$\begin{aligned} P_m^{(k)} &= I^{(k)H} R_m^{(k)} I^{(k)} + \\ &+ I^{(k)H} p_m^{(k)} + p_m^{(k)H} I^{(k)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $R_m^{(k)}$ и $p_m^{(k)}$ – соответственно, коэффициенты $M \times M$ – матрицы, ряда M -размерного вектора.

$$\begin{aligned} R_m^{(k)} &= \begin{cases} 0 & m = 0 \\ e_m^T b_m^{(k)} + b_m^{(k)H} e_m & m > 0 \end{cases} \\ p_m^{(k)} &= \begin{cases} a^{(k)H} V_0^{(k)} & m = 0 \\ e_m^T \beta_m^{(k)} & m > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

с e_m вектором строкой длины M , чей m -тый компонент ≥ 1 .

Для получения общей активной энергии от m локальных источников можно просуммировать активные энергии по гармоникам

$$P_m = \sum_{k=1}^K p_m^{(k)}, \quad (5)$$

где $m=1,2,\dots,M$.

Предположим, что каждый источник имеет собственную стоимость, которая, как мы предполагаем, пропорциональна вырабатываемой активной мощности P_m , $m=0,\dots,M$, т. е., локальный источник имеет стоимость $c_m P_m$, где c_m – удельная стоимость на единицу мощности. В общем случае, $c_0 > c_m$, $m \neq 0$, то есть линейные источники, как правило, менее дорогие, чем главный источник. В некоторых случаях удельную стоимость ЛИ можно даже принять равной нулю, при использовании, например, возобновляемых источников (ВЭУ или СЭС). Отметим, что расходы могут изменяться с течением времени и будут пропорциональны вырабатываемой активной мощности.

Оптимизационная проблема имеет два ограничения. Первое – это ограничение по максимальной активной генерированной энергии каждым ЛИ

$$0 \leq P_m \leq P_{max,m}. \quad (6)$$

Второе ограничение связано с показателями качества электроэнергии, а именно достижением минимального значения сдвига фаз между током и напряжением. При этом достигается баланс выработанной и потребленной энергии.

Проблема оптимизации может быть записана как минимизация общего расхода

$$\min C(I) = \min \sum_{m=0}^M c_m P_m \quad (7)$$

и ограничение качества, которое выражается как ограничение по коэффициенту искажения мощности коэффициентом $\bar{\lambda}$, а именно:

$$\lambda = \frac{|P_0|}{\sqrt{2 \sum_{k=1}^K |V_0^{(k)}|^2} \cdot \sqrt{2 \sum_{k=1}^K |I_0^{(k)}|^2}} \geq \bar{\lambda}, \quad (8)$$

здесь P_0 – активная энергия главного источника.

При решении уравнений с заданными ограничениями становится ясным, что вопрос оптимизации – это квадратичная задача с квадратичными ограничениями, которая требует специфических числовых методов решения.

Для практического выполнения оптимизации предлагается повторяющийся подход на базе метода крутого спуска, где, начиная от приемлемого решения, каждый ЛИ обновляет вырабатываемый ток, чтобы свести к минимуму общую стоимость сети. При каждом повторении шаги соответствует разным ЛИ и разным гармоникам. Каждое обновление выполняется заполнением ограничений по энергии и качеству, поэтому статус сети возрастает через приемлемые решения. Данное решение может выполняться распределенным способом каждым ЛИ, при условии, что он знает параметры сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропай, Н. И. Распределенная генерация в электроэнергетических системах // Матер. Меж-

ЧЕТОШНИКОВА Л. М.

дунар. научно практической конф. «Малая энергетика-2005», 2005. – С. 9–11.

2. Агроскин, В. Распределённая генерация, перспективы и проблемы / В. Агроскин // ЭСКО №7(19) июль 2003. – С. 5–8.

3. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М. : ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.

4. Четошникова, Л. М. Управление электроэнергией и сервис-ориентированные сети / Л. М. Четошникова, Н. И. Смоленцев, С. А. Четошников // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2012. – № 16(275). – С. 98–102.

5. Z. Fan, G. Kalogridis, C. Efthymiou, M. Sooriyabandara, M. Serizawa, and J. McGeehan, “The New Frontier of Communications Research: Smart Grid and Smart Metering,” in ACM E-Energy Conference, Passau, Germany, Apr. 2010.

Четошникова Л. М., д.т.н., доцент, E-mail: *chl1m56@mail.ru*, Россия, Челябинская область, г. Миасс, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», (НИУ), филиал в г. Миассе, кафедра «Автоматика», +7(3513) 63-28-85.