

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ПРИСОЕДИНЕНИЯ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

П.Д. ЛЕЖНЮК, А.А. КОВАЛЬЧУК, В.В. КУЛИК, Д.С. СОБЧУК

Винницкий технический университет, Винница (Украина)

The method of definition the optimum places of the distributed power sources connection and their power in distributive electrical networks is observed. It is shown, that thus it is expedient to use assay values on sensitivity of power losses in networks to an installed capacity of energy sources.

Введение. На сегодня наметился и реализуется на практике постепенный переход от сугубо централизованной модели электроснабжения потребителей, основой которой являются мощные тепловые и атомные электрические станции, к комбинированной, когда часть электроэнергии производится рассредоточенными источниками [1–3]. Они работают непосредственно в распределительных электрических сетях, разгружая тем самым сети 110 и выше кВ. Распределительные электрические сети при этом приобретают черты локальной электрической системы. Присоединение рассредоточенных источников электроэнергии (РИЭ) к электрическим сетям (ЭС) имеет как позитивные, так и негативные стороны, что приводит к необходимости решения оптимизационных задач, касающихся определения схем их присоединения и транспортировки вырабатываемой электроэнергии.

К преимуществам рассредоточенного генерирования относится, прежде всего, уменьшение влияния на окружающую среду, а также снижение потерь электроэнергии и улучшение качества напряжения в электрических сетях. Однако, кроме преимуществ есть и недостатки, среди которых нужно выделить усложнение функционирования электрических сетей в случае роста в них установленных мощностей РИЭ. Поскольку электрические сети энергосистем проектировались и сооружались при условиях централизованного электроснабжения, то развитие в них РИЭ порождает новые нехарактерные для прошлого периода проблемы и задачи. В частности, возникает задача оптимизации узлов присоединения и схем выдачи мощности для РИЭ с заданными техническими характеристиками.

В работе предложен метод, который на основании оценивания чувствительности потерь электроэнергии в ЭС, а также многофакторного анализа, позволяет получать эффективные решения таких задач. В результате реализации решений обеспечивается уменьшение потерь электроэнергии в ЭС, а также повышение ее качества. Кроме того, достигается возможность локального повышения надежности функционирования ЭС за счет частично резервирования централизованных источников энергии.

Определение потенциальных мест присоединения РИЭ к распределительным электрическим сетям. В произвольный момент времени при известных мощностях нагрузки и напряжениях в узлах \dot{U}_i можно определить задающие токи узлов сети с РИЭ:

$$\dot{J}_i = \frac{\dot{S}_{ni} - \dot{S}_{pi}}{\sqrt{3}\dot{U}_i} = \dot{J}_{ni} - \dot{J}_{pi},$$

где $\dot{S}_{ni} = P_{ni} + jQ_{ni}$ – активная и реактивная мощности нагрузки i -го узла; \dot{U}_i – напряжение i -го узла; $\dot{S}_{pi} = P_{pi} + jQ_{pi}$ – мощности потенциально возможных РИС в i -м узле.

Линейная модель нормального режима, полученная представлением нагрузки и генерации узлов сети задающими токами, эквивалентна нелинейной модели для заданного момента времени. Рассмотрим простейший случай – магистральную ЭС с тремя нагрузками (рис. 1), по которой осуществляется распределение электроэнергии от центра питания к трансформаторным подстанциям (ТП) 10/0,4 кВ.

Пренебрегая мнимой составляющей падения напряжения, можно перейти к аналитическим преобразованиям отдельных составляющих задающих токов. Согласно методу наложения по участку (0-1) электрической сети протекают согласованно направленные токи \dot{I}_1 , \dot{I}_2 и \dot{I}_3 , обусловленные нагрузками отдельных ТП 10/0,4 кВ и генерированием РИЭ. Потери активной мощности на участке сети (0-1) с сопротивлением R_{0-1} определяются:

$$\Delta P = 3 \cdot |\dot{J}_{0-1}|^2 \cdot R_{0-1} = 3 \cdot |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3|^2 \cdot R_{0-1}. \quad (1)$$

Представив токи в виде активной и реактивной составляющих, уравнение (1) принимает вид:

$$\Delta P_{\Sigma} = 3 \cdot \left[(I'_1 + I'_2 + I'_3)^2 + (I''_1 + I''_2 + I''_3)^2 \right] \cdot R_{0-1}, \quad (2)$$

где I'_i, I''_i – активные и реактивные составляющие токов.

Если выделить из действительных частей токов в (2) составляющие, обусловленные РИЭ I'_{p1} , I'_{p2} , I'_{p3} , то

$$\Delta P_{0-1} = 3 \cdot \left[\begin{aligned} & \left(I'_{n1} + I'_{n2} + I'_{n3} \right)^2 + \left(I''_{n1} + I''_{n2} + I''_{n3} \right)^2 - \\ & - \left\{ 2 \left(I'_{n1} + I'_{n2} + I'_{n3} \right) \left(I'_{p1} + I'_{p2} + I'_{p3} \right) - \right. \\ & \left. - \left(I'_{p1} + I'_{p2} + I'_{p3} \right)^2 \right\} \right] \cdot R_{0-1}. \quad (3) \end{aligned}$$

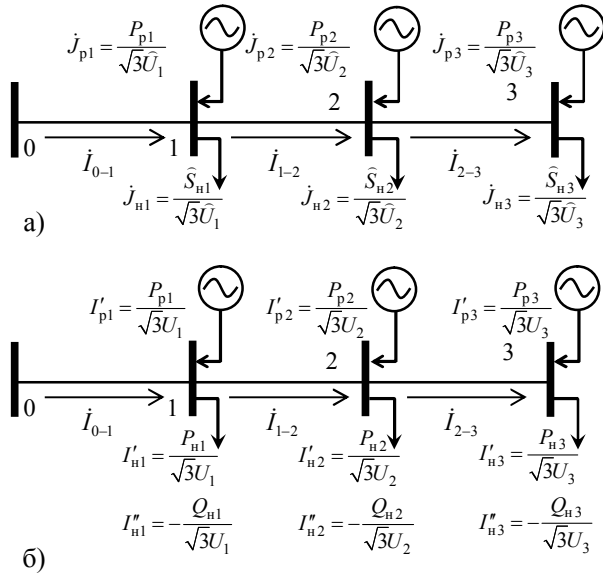


Рисунок 1 – Схема потоков мощности в магистральной сети с РИЭ

В (3) учтены только активные составляющие токов РИЭ в предположении об отсутствии реактивной составляющей падений напряжений и полной компенсации реактивной мощности РИЭ в узлах их подключения. Из (3) видно, что на потери мощности за счет присоединения РИЭ влияет не только их текущая мощность (через I'_{pi}), но, что важнее, соотношение между активными составляющими токов нагрузки I'_{ni} и токов РИЭ I'_{pi} . Исходя из (3), потери мощности в ЭС после подключения РИЭ могут быть представлены в виде двух составляющих:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_n + \delta P_p. \quad (4)$$

В (4) первая составляющая – потери мощности в ЭС до подключения РИЭ, а вторая – определяет дополнительные потери, обусловленные их подключением. Выделив последнюю составную из (4) и выполнив ряд преобразований, можно получить выражения, характеризующие изменение потерь в ЭС от установки РИЭ в отдельных её узлах:

$$\begin{aligned} \delta P(I'_{p3}) &= 3I_{p1}^2 \left[\left(\frac{I'_{p2} + I'_{p3}}{I'_{p1}} \right) + \left(\frac{I'_{p1} - 2I'_{\Sigma}}{I'_{p1}} \right) \right] R_{0-1}; \\ &\dots \\ \delta P(I'_{p3}) &= 3I_{p3}^2 \left[\left(\frac{I'_{p1} + I'_{p2}}{I'_{p3}} \right) + \left(\frac{I'_{p3} - 2I'_{\Sigma}}{I'_{p3}} \right) \right] R_{0-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $I'_{\Sigma} = (I'_{n1} + I'_{n2} + I'_{n3})$ – суммарный ток нагрузки, протекающий по ветви 0–1.

Обобщив выражения (5), получим выражение для определения влияния установки РИЭ в i -м узле на потери активной мощности в k -й ветви разомкнутой ЭС произвольной конфигурации:

$$\delta P_k(I'_{pi}) = 3I_{pi}^2 \left[\frac{\sum_{j \in N_k} I'_{pj}}{I'_{pi}} - \frac{2 \sum_{j \in N_k} I'_{nj}}{I'_{pi}} \right] R_k, \quad (6)$$

где k – номер ветви электрической сети; N_k – множество узлов ЭС, питающихся по данной ветви.

Суммируя изменения потерь мощности по всем ветвям распределительной ЭС, через которые транспортируется к основному центру питания мощность РИЭ, установленного в i -м узле, выражение для определения влияния на потери мощности в ЭС может быть представлено в так:

$$\begin{aligned} \delta P_{\Sigma}(I'_{pi}) &= \sum_{k \in M_i} \delta P_k(I'_{pi}) = \\ &= \sum_{k \in M_i} \left[3I_{pi}^2 \left[\frac{\sum_{j \in N_k} I'_{pj}}{I'_{pi}} - \frac{2 \sum_{j \in N_k} I'_{nj}}{I'_{pi}} \right] R_k \right] = \\ &= 3I_{pi}^2 \left\{ \sum_{k \in M_i} \left[\frac{\sum_{j \in N_k} I'_{pj}}{I'_{pi}} R_k \right] - \sum_{k \in M_i} \left[\frac{2 \sum_{j \in N_k} I'_{nj}}{I'_{pi}} R_k \right] \right\} = \\ &= 3I_{pi}^2 \left(R_{\Sigma}^{yb}(I'_{pi}) - R_{\Sigma}^{ym}(I'_{pi}) \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где M_i – множество ветвей электрической сети, соединяющих центр питания с узлом присоединения i -го РИЭ.

В (7) выделено два эквивалентных сопротивления:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma}^{yb}(I'_{pi}) &= \sum_{k \in M_i} \left[\frac{\sum_{j \in N_k} I'_{pj}}{I'_{pi}} R_k \right]; \\ R_{\Sigma}^{ym}(I'_{pi}) &= \sum_{k \in M_i} \left[\frac{2 \sum_{j \in N_k} I'_{nj}}{I'_{pi}} R_k \right], \end{aligned}$$

где $R_{\Sigma}^{yb}(I'_{pi})$ – эквивалентное активное сопротивление, которое увеличивает сопротивление ЭС протеканию тока I'_{pi} и, таким образом, повышает расчетное значение потерь в ЭС, вызванное присоединением РИЭ в i -м узле; $R_{\Sigma}^{ym}(I'_{pi})$ – составляющая, характеризующая эквивалентное умень-

шение сопротивления ЭС и, соответственно, потерь в ЭС из-за присоединения РИЭ в i -м узле.

Из (7) видно, что изменение потерь мощности в линии электропередач при присоединении РИЭ к i -му узлу зависит не только от значения его тока, но и от значений токов нагрузки и токов РИЭ в других узлах, которые протекают по данной линии. Это обстоятельство обязательно должно учитываться для эффективного выбора мест присоединения и графиков выдачи мощности рассредоточенных источников электроэнергии. Изменение потерь мощности в ЭС, связанное с установкой РИЭ, можно охарактеризовать величиной эквивалентного сопротивления распределительной сети $R_{\Sigma}^P(I'_{pi})$ на пути транзита мощности РИЭ i -го узла:

$$R_{\Sigma}^P(I'_{pi}) = R_{\Sigma}^{yb}(I'_{pi}) - R_{\Sigma}^{ym}(I'_{pi}). \quad (8)$$

Расчетные сопротивления в (8) могут принимать произвольные значения в зависимости от значения и направления токов нагрузки и токов РИЭ, протекающих в ветвях ЭС и обусловленных перетоками активной мощности к отдельным ТП 10/0,4 кВ. Если $R_{\Sigma}^{ym} \geq 0$, то это указывает на наличие положительного эффекта (уменьшение потерь мощности и электроэнергии и, опосредованно, уменьшение потерь напряжения) для ЭС от присоединения РИЭ. Если $R_{\Sigma}^{yb} > R_{\Sigma}^{ym}$, то это говорит об увеличении потерь в ЭС из-за перераспределения потоков мощности, вызванного присоединением РИЭ.

Таким образом, исходя из эквивалентных сопротивлений (8) можно подобрать совокупность узлов электрической сети, для которых присоединение РИЭ будет максимально эффективным по критерию минимума потерь мощности в заданном режиме, а также потерь электроэнергии за определенный промежуток времени. Определяющим условием в данном случае является наличие соответствующего информационного обеспечения (достаточного для получения адекватных результатов расчета характерных режимов ЭС) и отсутствие существенных изменений в схеме ЭС на протяжении определенного промежутка времени. В реальных условиях эксплуатации распределительных ЭС это приводит к неопределенности в методике выбора места присоединения РИЭ. Требуется проведения ряда имитационных расчетов с возможными изменениями нормальной схемы ЭС.

Исходя из приведенного выше, для выбора потенциальных мест присоединения РИЭ можно рассмотреть два подхода:

- присоединение РИЭ по принципу минимального риска, когда место подключения выбирается максимально близко к шинам питающей подстанции 110(35)/10 кВ. При этом независимо от изменений нагрузки и коммутаций в электрических сетях будет обеспечено минимальное влияние РИЭ на потери электроэнергии в ЭС и уровни напряжения (как отрицательное, так и положительное);

- присоединение РИЭ по принципу максимального эффекта, когда место подключения подбирается с учетом эффекта уменьшения потерь мощности в ЭС за счет оптимизации перетоков мощности от основного центра питания к узлам нагрузки. При этом потери электроэнергии могут существенным образом уменьшаться, но эффект зависит от соотношения мощности РИЭ и суммарной нагрузки ЭС, а также коммутаций в схеме сети.

Окончательное решение относительно места присоединения и схемы выдачи мощности РИЭ нужно принимать на основании анализа чувствительности потерь мощности в ЭС к изменениям в ней.

Определение мест присоединения РИЭ к электрической сети и их установленной мощности на основании анализа чувствительности. Рассмотрим задачу

определения мест присоединения РИЭ по критерию минимума потерь. При недостаточном уровне информационного обеспечения в задаче проектирования существенно усложняется определение значения критериев оптимальности для отдельных вариантов. Можно говорить не о детерминированных значениях критериев оптимальности, а об их интервалах неопределенности. Указанное обстоятельство может быть использовано для обоснования равноэкономичности вариантов присоединения РИЭ, а также уменьшения капитальных затрат на их реализацию.

Если после анализа целесообразности присоединения РИЭ в каждом узле (из сформированного ранее перечня), учитывая эксплуатационные и технические характеристики определяются наиболее эффективные места их расположения, то следующей задачей является выбор окончательного решения путем оптимизации расчетной мощности РИЭ, которая должна максимально отвечать установленной мощности РИЭ. Для принятия окончательного решения относительно оптимальных мощностей РИЭ целесообразно воспользоваться методом анализа чувствительности [4].

Используя (6) запишем выражение изменения потерь мощности в ЭС, как результат присоединения РИЭ в наиболее электрически отдаленном узле (например, узел 3, рис. 1):

$$\begin{aligned} \delta P_{\Sigma}(I'_{p3}) = & 3I_{p3}'^2 \left[\frac{I'_{p1} + I'_{p2} + I'_{p3} - 2(I'_{n1} + I'_{n2} + I'_{n3})}{I'_{p3}} \right] R_{0-1} + \\ & + 3I_{p3}'^2 \left[\frac{I'_{p2} + I'_{p3} - 2(I'_{n1} + I'_{n2} + I'_{n3})}{I'_{p3}} \right] R_{1-2} + \\ & + 3I_{p3}'^2 \left[\frac{I'_{p3} - 2(I'_{n1} + I'_{n2} + I'_{n3})}{I'_{p3}} \right] R_{2-3}. \end{aligned} \quad (9)$$

После несложных преобразований:

$$\delta P_{\Sigma}(I'_{p3}) = 3I'_{p3} \left[\begin{aligned} &(I'_{p1} - 2I'_{n1})R_{0-1} + \\ &+ (I'_{p2} - 2I'_{n2})(R_{0-1} + R_{1-2}) + \\ &+ (I'_{p3} - 2I'_{n3})(R_{0-1} + R_{1-2} + R_{2-3}) \end{aligned} \right]. \quad (10)$$

Обобщая на электрическую сеть произвольной конфигурации:

$$\delta P_{\Sigma}(I'_{pk}) = 3I'_{pk} \left[\sum_{i=1}^n (I'_{pi} - 2I'_{ni}) \sum_{j \in M_{ki}} R_j \right], \quad (11)$$

где M_{ki} – множество общих ветвей схемы электрической сети на пути между центром питания, i -м узлом и k -м узлом – местом установки исследуемого РИЭ: $M_{ki} = M_k \cup M_i$.

Чувствительность потерь мощности δP_{Σ} к изменению тока (мощности) отдельного рассредоточенного источника I'_{pk} характеризует соответствующая производная. Для ее определения по мощности РИЭ, присоединенного в узле 3 схемы (рис. 1) воспользуемся выражениями (4) и (10):

$$\frac{\partial \delta P_{\Sigma}(I'_{p3})}{\partial I'_{p3}} = 6 \left[\begin{aligned} &\left(\frac{1}{2}I'_{p1} - I'_{n1}\right)R_{0-1} + \\ &+ \left(\frac{1}{2}I'_{p2} - I'_{n2}\right)(R_{0-1} + R_{1-2}) + \\ &+ \left(I'_{p3} - I'_{n3}\right)(R_{0-1} + R_{1-2} + R_{2-3}) \end{aligned} \right],$$

или обобщая на разомкнутую сеть произвольной конфигурации:

$$\frac{\partial \delta P_{\Sigma}(I'_{pk})}{\partial I'_{pk}} = 6 \left\{ \begin{aligned} &\left[(I'_{pk} - I'_{nk}) \sum_{j \in M_{kk}} R_j \right] + \\ &+ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \left[\left(\frac{1}{2}I'_{pi} - I'_{ni}\right) \sum_{j \in M_{ki}} R_j \right] \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Используя выражения (12) для всех m перспективных мест присоединения возобновляемых источников энергии, определенных согласно приведенному выше методу, может быть сформирована система уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{\partial \delta P_{\Sigma}(I'_{pDE_i})}{\partial I'_{pDE_i}} = 0; \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Решение системы уравнений (13) дает оптимальные расчетные мощности РИЭ для присоединения их в соответствующих узлах. По рассчитан-

Д.т.н., профессор Петр Лежнюк,
Винницкий национальный технический ун-т
Хмельницкое шоссе, 95,
21021, г. Винница (Украина)
Тел +38 (0432) 598-377,
e-mail: lpd@mail.ru

К.т.н. Алексей Ковальчук
ООО «Энергоинвест»
переулок Станиславского, 16,
21001, г. Винница (Украина)
Тел +38 (0432) 516-421,
e-mail: gedzenko@mail.ru

ным, таким образом, значениям оптимальных мощностей определяется узел ЭС с минимальным расхождением между расчетной оптимальной и установленной мощностями РИЭ.

Выводы. Развитие РИЭ в распределительных сетях за счет уменьшения нагрузки на централизованную систему электроснабжения, позволяет получить положительный эффект. Он проявляется в уменьшении потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях, по которым осуществляется передача мощности РИЭ, повышении качества электроэнергии, особенно уровней напряжения в электрически отдаленных узлах, а также в повышении надежности электроснабжения. Однако, это достигается лишь в случаях, когда установленная мощность РИЭ согласована с уровнем локального электропотребления, конфигурацией и параметрами электрической сети. Разработан метод, который базируется на анализе чувствительности потерь мощности в ЭС и позволяет однозначно характеризовать целесообразность присоединения РИЭ в выбранных узлах, исходя из технической эффективности эксплуатации распределительных сетей, а также минимизации потерь электроэнергии при ее транспортировке.

Литература

1. Кириленко А. В., Трач И. В. Технические особенности функционирования энергосистем при интеграции источников распределенного генерирования / А.В. Кириленко, И.В. Трач // Труды Института электродинамики НАН Украины. – 2009. – Вып. 24. – С. 3–7.
2. Катренко Г. Н. Тенденции в распределительных электрических сетях и основные мероприятия и перспективы, которые из них вытекают / Г.Н. Катренко // Электрические сети и системы. – 2011. – №1. – С. 4–9.
3. Мерцалов А. Е. Оптимизация процессов в энергетике / А.Е. Мерцалов // Электрические станции. – 2012. – № 1. – С. 26–37.
4. Лежнюк П.Д. Анализ чувствительности оптимальных решений в сложных системах критерияльным методом: Монография.– Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 2003. – 131 с.

К.т.н., доцент Владимир Кулик
Винницкий национальный технический ун-т
Хмельницкое шоссе, 95,
21021, г. Винница (Украина)
Тел +38 (0432) 598-377,
e-mail: kulik_vv@mail.ru

???????????????? Собчук
Винницкий национальный технический ун-т
Хмельницкое шоссе, 95,
21021, г. Винница (Украина)
Тел +38 (0432) 598-377,
e-mail: ?????????????????????