

ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Стратегии загрузки устройств распределенной генерации в течение суток

Кирпиков А. В., инж.

ОАО «Тяжпромэлектромет», Екатеринбург

Кирпикова И. Л., канд. техн. наук, Обоскалов В. П., доктор техн. наук

ФГАОУ «Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

Рассмотрена математическая модель оценки экономической эффективности применения устройств распределенной генерации (УРГ), функционирующих в качестве источников электро- и теплоснабжения потребителей. За основу принят критерий максимального чистого дисконтированного дохода. Показано, что конфигурация графиков мощности распределенной генерации и их корреляция с суточным графиком цены существенно влияет на экономический эффект. Получены критериальные соотношения выгоды включенного состояния УРГ и их работы в базовом режиме. Эксплуатация этих устройств в режиме когенерации позволяет расширять диапазон экономичности включенного состояния.

Ключевые слова: распределенная генерация, экономическая эффективность, графики нагрузки, критерии эффективности.

В последнее время в России и за рубежом все больше внимания уделяется теоретическим и практическим проблемам развития распределенной генерации (РГ) [1–5]. Это обусловлено тем, что при росте цен на электрическую и тепловую энергию на оптовом рынке темпы увеличения стоимости УРГ значительно меньше, и это делает их экономически эффективными при использовании в системах энергоснабжения потребителей энергии.

Экономическая эффективность УРГ зависит от стратегии их загрузки (суточного графика генерации энергоносителя). Возможны различные сценарии работы этих устройств: в пиковой зоне ценовых графиков; в базовом режиме с максимальной генерацией тепловой и электрической энергии; по переменному графику, согласованному с суточным графиком цен; в качестве резервного источника питания и др. В любом случае стратегия суточной загрузки УРГ является значимым фактором при технико-экономическом обосновании их применения. В качестве критерия оптимизации суточной загрузки здесь, как правило, используется максимум чистого дисконтированного дохода (ЧДД), который зависит как от соотношения цен на энергоносители и основное оборудование,

так и от согласования графика загрузки УРГ с суточным графиком цен на энергоносители [6]:

$$J = K_{\text{пр}} - \gamma K_{\text{УРГ}} + (\vartheta_t^{\text{ЭЭ}} \bar{u}^{\text{ЭЭ}} W^{\text{ЭЭ}} + \vartheta_t^{\text{ТЭ}} \bar{u}^{\text{ТЭ}} W^{\text{ТЭ}} - I_{\text{Т1}}) \tau, \quad (1)$$

где J — ЧДД; $K_{\text{пр}}$ и $K_{\text{УРГ}}$ — капиталовложения соответственно в подключение потребителя к централизованным сетям энергоснабжения и сооружение УРГ; γ — коэффициент, определяемый ежегодными отчислениями на амортизацию и обслуживание УРГ; $\bar{u}^{\text{ЭЭ}}$, $\bar{u}^{\text{ТЭ}}$ и $W^{\text{ЭЭ}}$, $W^{\text{ТЭ}}$ — среднесуточная рыночная цена и выработка соответственно электрической и тепловой энергии; τ — эквивалентный срок службы; $I_{\text{Т1}}$ — издержки (превалирует топливная составляющая) в текущем году; $\vartheta_t^{\text{ЭЭ}}$, $\vartheta_t^{\text{ТЭ}}$ — коэффициенты согласования графиков генерируемой мощности и цены на энергоноситель, зависящие от коэффициентов вариации v и корреляции $k(u, P)$:

$$\vartheta_t^e = 1 + v(u_t^e) v(P_t^e) k(u_t^e, P_t^e), \quad e \in \{\text{ЭЭ}, \text{ТЭ}\}. \quad (2)$$

Качественное заключение о пропорциональности дохода — см. выражения (1) и (2) — и коэффициента корреляции между ценой и мощностью неоднозначно. Нельзя сделать

абсолютный вывод, что принимаемый за критерий оптимизации максимум ЧДД соответствует коэффициенту корреляции $k(u^e, p^e) = 1$. Наличие дисперсии $\sigma^2(P_t^e)$ генерации при пропорциональном регулировании вызывает отклонение генерируемой мощности от максимальной и в результате — уменьшение среднегодовой выработки электроэнергии, что в конечном итоге может привести к снижению ЧДД.

Режим максимальной загрузки. Рассмотрим две стратегии работы УРГ при производстве только электроэнергии:

в базовом режиме с максимальной загрузкой. При этом корреляционный момент (covariance) цены и мощности $Cov(u^{33}, P^3) = 0$;

по графику, согласованному с графиком рыночной цены — $P_t^3 = cu_t^{33}$, $\sigma(P^3) \neq 0$. При этом $k(u^{33}, P^3) = 1$.

При анализе эффективности текущей загрузки УРГ основным критерием является максимум суточной прибыли, которую в режиме производства только электроэнергии с учетом выражения (2) можно определить из равенства:

$$\begin{aligned} \Pi &= \sum_{t=1}^{24} u_t^{33} P_t^3 - \sum_{t=1}^{24} B(P_t^3) = \\ &= \vartheta^{33} \bar{u}^{33} W^{33} - \sum_{t=1}^{24} B(P_t^3), \end{aligned} \quad (3)$$

где $B(P^3)$ — характеристика затрат на производство электроэнергии (расходная характеристика), где превалирует топливная составляющая.

При линейности $B(P^3) = c^{33} P^3$ (где c^{33} — себестоимость производства электроэнергии) топливные затраты также выразим через математическое ожидание мощности, в результате чего равенство (3) преобразуется к виду

$$\Pi = (\vartheta^{33} \bar{u}^{33} - c^{33}) W^{33}. \quad (4)$$

В первом случае (при работе УРГ в базовом режиме с максимальной нагрузкой P_{max}^3) коэффициент корреляции между ценой на электроэнергию и нагрузкой генератора равен нулю. При $\vartheta^{33} = 1$ суточная прибыль

$$\Pi_1 = 24(\bar{u}^{33} - c^{33}) P_{max}^3. \quad (5)$$

Данное соотношение позволяет сделать дополнительный (почти тривиальный) вывод: в силу аддитивности функции прибыли и при неучете пусковых характеристик для выполнения условия $\Pi_t > 0$ необходимо отключать УРГ на интервалах, где рыночная цена на электроэнергию ниже себестоимости ее

производства на УРГ. Следует отметить, что это соотношение получено при условии неизменности нагрузки на суточном интервале. Однако оно справедливо для интервала любой длительности (в том числе часового), т.е. сделанное заключение имеет обобщающий характер.

Во втором случае (при работе генератора с переменной нагрузкой) наибольший экономический эффект имеет место при коэффициенте корреляции между ценой на электроэнергию и мощностью генератора, равном единице (мощность УРГ пропорциональна цене). Тогда

$$\Pi_2 = [(1 + v^{33} v^3) \bar{u}^{33} - c^{33}] \bar{W}^{33}, \quad (6)$$

где v^{33} , v^3 — коэффициенты вариации цены и мощности.

Принимая во внимание инженерное правило двух сигм (приемлемое для определения расчетных нагрузок в системе электроснабжения [7]), приближенно можно считать, что средняя мощность \bar{P} подчиняется правилу

$$\bar{P}^3 \approx P_{max}^3 - 2\sigma^3 = P_{max}^3 - 2v^3 \bar{P}^3,$$

откуда

$$\bar{P}^3 = \frac{P_{max}^3}{1 + 2v^3}.$$

Выражение (6) с учетом указанного правила будет иметь вид

$$\Pi_2 = 24[\bar{u}^{33} - c^{33} + v^{33} v^3 \bar{u}^{33}] \frac{P_{max}^3}{1 + 2v^3}.$$

Разница прибыли в обоих случаях

$$\begin{aligned} \Pi_1 - \Pi_2 &= 24 P_{max}^3 \left[\bar{u}^{33} - c^{33} - \right. \\ &\left. - (\bar{u}^{33} - c^{33} + v^{33} v^3 \bar{u}^{33}) \frac{1}{1 + 2v^3} \right]. \end{aligned}$$

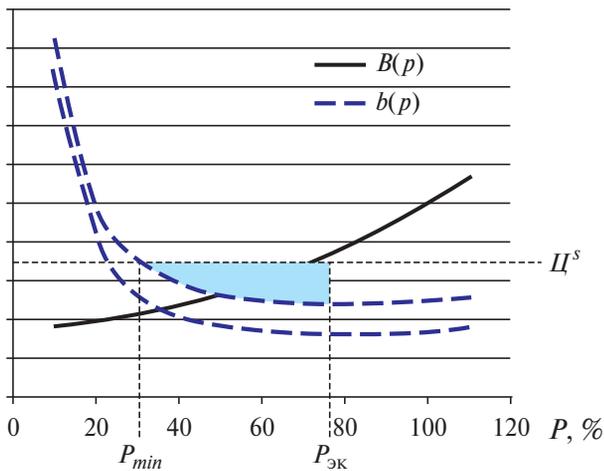
Эта разность положительна, если

$$(\bar{u}^{33} - c^{33})(1 + 2v^3) - (\bar{u}^{33} - \beta u^T + v^{33} v^3 \bar{u}^{33}) > 0.$$

Простые математические преобразования приводят к условию: $\Pi_1 - \Pi_2 > 0$ при

$$\sigma^3 < 2(\bar{u}^{33} - c^{33}). \quad (7)$$

Таким образом, на интервалах, где цена на электроэнергию выше себестоимости ее производства на УРГ, при относительно малом колебании суточной цены оптимальной стратегией является работа УРГ в базовом режиме с максимальной загрузкой, в то время как при достаточно большой дисперсии



Экономические характеристики устройства распределенной генерации

цены — работа УРГ по графику цены (мощность УРГ пропорциональна цене).

Пусть $\bar{u}^{\text{э}} = 1,5$ руб/(кВт · ч), $c^{\text{э}} = 1,2$ руб/(кВт · ч). Работа УРГ в базовом режиме выгодна, если $\sigma^{\text{н}} < 0,6$ руб/(кВт · ч) или если рыночная цена на электроэнергию колеблется в пределах (0,3 – 2,7) руб/(кВт · ч). Однако, если цена топлива увеличивается на 20 %, т. е. $c^{\text{э}} = 1,44$ руб/(кВт · ч), диапазон экономичности работы УРГ в базовом режиме сокращается до (1,33 – 1,62) руб/(кВт · ч), т. е. вполне возможно, что реальное суточное колебание цены значительно больше, поэтому выгоднее работа УРГ в режиме загрузки, пропорциональной цене.

Работа УРГ с нагрузкой, соответствующей максимальному КПД. Выше показано, что при определенных условиях работа УРГ с постоянной (максимальной) генерацией более выгодна, чем с пропорциональной загрузкой. Возникает вопрос об оптимальности режима работы с максимальной нагрузкой. Возможно, что работа с постоянной нагрузкой, отличной от максимальной, эффективнее, чем работа с максимальной загрузкой.

При фиксированной и функционально неизменной на часовом интервале нагрузке УРГ суточная прибыль

$$\begin{aligned} \Pi &= \sum_{t=1}^{24} \Pi_t = \sum_{t=1}^{24} [u_t^{\text{э}} P_t^{\text{э}} - u_{\text{T}} B(P_t^{\text{э}})] = \\ &= \sum_{t=1}^{24} [u_t^{\text{э}} - u_{\text{T}} b(P_t^{\text{э}})] P_t^{\text{э}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где u_{T} — цена используемого топлива; $B(P_t^{\text{э}})$ и $b(P_t^{\text{э}}) = B(P_t^{\text{э}})/P_t^{\text{э}}$ — часовой и удельный расходы топлива, соответствующие мощности $P_t^{\text{э}}$.

При отсутствии интегральных ограничений вследствие аддитивности формулы (8)

$$\max \Pi = \sum_{t=1}^{24} \max \Pi_t.$$

Исходя из этого, оптимальным режимом работы УРГ можно считать работу с мощностью, в каждый момент времени соответствующей условию минимального удельного расхода топлива:

$$\max [u_t^{\text{э}} - u_{\text{T}} b(P_t^{\text{э}})] = u_t^{\text{э}} - \min u_{\text{T}} b(P_t^{\text{э}}).$$

Нелинейность характеристики затрат. Известно, что расходная характеристика энергоагрегата близка к квадратичной (см. рисунок):

$$B(P) = aP^2 + bP + c,$$

где a , b , c — коэффициенты параболы.

При этом кривая удельного расхода топлива имеет гиперболический характер:

$$b(P) = B(P)/P = aP + b + c/P.$$

Наличие линейной составляющей обуславливает локальный минимум $b(P)$, соответствующий условию

$$\frac{d}{dP} b(P) = a - c/P^2 = 0.$$

Этому условию удовлетворяет мощность

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{a/c}. \quad (9)$$

Данной мощности соответствует максимальный КПД установки. Действительно, КПД, выраженный через энергетическую характеристику топлива,

$$\eta = \frac{W}{\beta B(P)T} = \frac{1}{\beta b(P)}. \quad (10)$$

Для натурального газа $\beta = 10,8$ кВт · ч/м³.

Согласно формуле (10) минимальному удельному расходу соответствует максимальный КПД.

В свою очередь КПД установки является функцией мощности УРГ. При этом максимальный КПД газопоршневых и газотурбинных установок, а также ГТУ соответствует максимальной мощности. Отсюда следует, что если рыночная цена на электроэнергию выше себестоимости ее производства на УРГ, оптимальным является режим работы с максимальной мощностью. Нужно отметить, что вследствие достаточно большой пологости кривой удельных затрат вблизи точки минимума (см. рисунок) небольшое отклонение мощности УРГ от оптимальной практически не влияет на экономичность режима.

Как было отмечено, если рыночная цена на электроэнергию ниже себестоимости ее производства на УРГ, устройство должно быть отключено. В результате формируется экономический диапазон ($P_{min}, P_{ЭК}$) мощности генератора (выделенная область на рисунке).

Минимальная (по критерию экономичности) нагрузка определяется из условия $u_i^{ЭЭ} \geq u_T b(P_i^Э)$. Тогда

$$b(P_i^Э) \leq u_i^{ЭЭ} / u_T. \quad (11)$$

Режим когенерации. Энергоснабжение от когенерационной установки позволяет снизить ежегодные расходы на электро- и теплоснабжение по сравнению с централизованным энергоснабжением примерно на \$100 за каждый киловатт номинальной электрической мощности когенерационной электростанции в том случае, когда рассматриваемая установка работает в базовом режиме генерации энергии (круглогодично при 100 %-ной нагрузке) [8]. Такое возможно, если эта установка питает нагрузку в непрерывном цикле работы или работает параллельно с сетью с возможностью выдачи в нее неограниченного объема энергии.

Тепловая мощность УРГ, как правило, пропорциональна электрической: $P_T = \mu P_{ЭЛ}$. Поскольку электрическая мощность для УРГ первична по отношению к тепловой, удельные затраты определяются ею, и основной вывод об экономичности максимальной нагрузки распространяется в том числе и на режим когенерации. Некоторая специфика свойственна зоне минимальной (по критерию экономичности) нагрузки.

Для режима когенерации формула (8) принимает вид:

$$\begin{aligned} \Pi &= \sum_{t=1}^{24} \Pi_t = \sum_{t=1}^{24} [u_i^{ЭЭ} P_t^Э + u_i^{ТЭ} P_t^Т - u_T B(P_t^Э)] = \\ &= \sum_{t=1}^{24} [(u_i^{ЭЭ} + u_i^{ТЭ} \mu) P_t^Э - u_T B(P_t^Э)]. \end{aligned}$$

Из нее получаем следующее условие экономической необходимости отключения УРГ: $u_i^{ЭЭ} + u_i^{ТЭ} \mu \geq u_T b(P_i^Э)$. Тогда

$$b(P_i^Э) \leq \frac{u_i^{ЭЭ} + u_i^{ТЭ} \mu}{u_T}. \quad (12)$$

Как видно, экономический диапазон мощности генератора в режиме когенерации расширяется по сравнению с диапазоном, определяемым из условия (11). Это объясня-

ется снижением удельных затрат в режиме когенерации (см. нижнюю пунктирную кривую на рисунке).

Выводы

1. Конфигурация графиков нагрузки и генерации энергии и их корреляция с суточным графиком цены существенно влияют на экономический эффект при оценке эффективности сооружения РГ.

2. При относительно малом колебании суточной цены оптимальной стратегией является работа УРГ в базовом режиме с максимальной загрузкой, в то время как при достаточно большой дисперсии цены — работа УРГ по графику цены (мощность УРГ пропорциональна цене).

3. Работа УРГ в режиме когенерации расширяет диапазон экономичности включенного состояния.

4. Режим максимальной генерируемой мощности УРГ наиболее эффективен.

Список литературы

1. **Воропай Н. И.** Распределенная генерация в электроэнергетических системах (Материалы междунар. науч.-практич. конф. “Малая энергетика — 2005”). — М.: ИСЭМ, 2005.
2. **Дьяков А. Ф.** Малая энергетика в России. Проблемы и перспективы. — М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2003.
3. **Ackermann Th., Andersson G., Soder L.** Distributed Generation: A Definition. — Electric Power System Research, 2001, vol. 57, № 4.
4. **Научно-техническое** направление “Проблемы подключения и эксплуатации малой генерации при параллельной работе с ЕЭС России” / П. М. Ерохин, А. В. Паздерин, Л. А. Кеткин и др. (Науч. труды IV междунар. науч.-технич. конф. 14–18 октября 2013 г. Т. 1). — Новочеркасск, 2013.
5. **Научные** проблемы распределенной генерации / С. А. Ерошенко, А. А. Карпенко, С. Е. Кокин, А. В. Паздерин. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2010, № 11–12.
6. **Обоскалов В. П., Померанец Д. И.** Оценка эффективности применения устройств распределенной генерации с учетом динамики цен на энергоносители. — Промышленная энергетика, 2013, № 9.
7. **Использование** вероятностных методов для определения расчетных нагрузок в системе электроснабжения промышленных предприятий / И. Л. Кирпикова, В. П. Обоскалов, Е. П. Шалина, Н. В. Машенина. — В кн.: Проблемы и достижения в промышленной энергетике (Сб. докладов VI науч.-практич. конф. с междунар. участием в рамках выставки “Энергетика и электротехника. Светотехника”). Екатеринбург: Уральские выставки, 2006.
8. **Распределенная** энергетика России 2010–2015. Рынок газотурбинных установок для электростанций малой и средней мощности: Отраслевой обзор (www.infoline.spb.ru).