
УДК 621.311:004.056

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

© 2020 г. Б. В. Папков¹, *, В. Л. Осокин¹, **

¹Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия

*e-mail: boris.papkov@gmail.com

**e-mail: osokinvl@mail.ru

Поступила в редакцию 04.02.2020 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 27.02.2020 г.

Развитие и эксплуатация современных систем электроснабжения потребителей, находящихся в составе систем распределенной генерации (РГ) с их связью с электроэнергетической системой (ЭЭС) и возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) требуют изменений в оценке показателей их надежности и эффективности на основе соответствующего математического аппарата. Сложность энергетической, технологической и организационной структуры систем распределенной генерации (РГ) не позволяет при оценке их надежности использовать классическое понятие “отказ”. Показано, что системы РГ относятся к структурам с несколькими перекрывающимися зонами действия, что определяет их особенности, которые представляются некоторой интегральной характеристикой — эффективностью функционирования, характеризующей степень целесообразности использования системы РГ в различных режимах. Предлагается подход, основанный на оценке эффективности функционирования подобных систем. Приведены примеры расчета относительно простых структур систем РГ, выполняющих одновременно несколько задач.

Ключевые слова: надежность, структура, эффективность, распределенная генерация, режим

DOI: 10.31857/S0002331020020090

ВВЕДЕНИЕ

Специфическая черта систем распределенной генерации (РГ) — сложность их энергетической, технологической и организационной структуры. Это позволяет, с одной стороны, решать комплекс задач обеспечения надежного и эффективного электроснабжения потребителей, а с другой — обеспечивать устойчивую работу при нарушении работоспособности отдельных генерирующих установок (ГУ) и даже их групп. Для подобных систем не существует общепринятого понятия “отказ”, поскольку изменения в структуре системы РГ из-за отказов отдельных ГУ и их связей приводят, как правило, лишь к снижению показателей ее функционирования, так как границы между исправным и неисправным, а также между работоспособным, частично работоспособным и неработоспособным состояниями размыты и часто условны [1]. Это связано с некоторой избыточностью структуры, наличием резерва ГУ (перекрывание зон действия), коммутационных возможностей и связей, особенностями работы устройств релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА), средств коррекции режимов (компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения), возможных ошибок оперативного персонала.

Поскольку системы РГ представляются структурами с несколькими перекрывающимися зонами действия, это определяет особенности их работы, которые можно оценить некоторой интегральной характеристикой – эффективностью функционирования – степенью целесообразности использования системы РГ в различных режимах. Однако вопросы, связанные с особенностями расчета эффективности функционирования систем с перекрывающимися зонами, исследованы недостаточно полно [2–5, 8, 9], что обуславливает актуальность темы и необходимость практической реализации метода перекрывающихся зон.

Даже формально находясь в состоянии полной работоспособности, система РГ может и не выполнить все требуемые от нее функции. Это происходит вследствие неблагоприятного стечения обстоятельств (неравномерность выдачи мощности возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), перегрузка при повышенном спросе потребителей, несанкционированные внешние воздействия (кибератаки)) [7].

Следует учесть, что поведение даже автономно работающих ГУ систем РГ существенно отличается от их поведения в составе системы. В последнем случае могут проявиться особенности построения иерархической структуры, режимов и коммутационных возможностей сети; взаимозависимость отказов отдельных элементов системы РГ; взаимозависимость (очередность) их восстановлений и т.п. Это приводит к необходимости учета того, что поведение отдельного k -го элемента x_k определяется предысторией части или даже всех остальных элементов [4]:

$$x_k(t + dt) = f_k[x_k(0, t), x_1(0, t), \dots, x_n(0, t)],$$

где f_k – функция, определяемая конкретными особенностями системы.

Следовательно, состояние системы определяется n -мерной случайной величиной

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)],$$

а траектория ее поведения в интервале времени $(t, t + \theta)$ n -мерной случайной функцией

$$X(t, \theta) = [x_1(t, \theta), x_2(t\theta), \dots, x_n(t\theta)].$$

Поэтому появляется необходимость в расширении понятия “надежность” [7] и переход к показателям эффективности функционирования системы с РГ при выполнении ею определенных задач в конкретных условиях [2–5]. Показатель эффективности – мера, количественно оценивающая качество выполняемых системой РГ функций, то есть, мера полезности функционирования системы РГ в определенной ситуации при обеспечении электроснабжения потребителей в конкретных режимах работы ГУ.

СИСТЕМА РГ С ПЕРЕКРЫВАЮЩИМИСЯ ЗОНАМИ ДЕЙСТВИЯ

Поскольку любая электроэнергетическая система (ЭЭС), включая РГ, относится к классу больших систем с несколькими уровнями функционирования, обладает сложной структурой, многофункциональностью, избыточностью она не может быть представлена единичными классическими показателями надежности. Отказы отдельных ее элементов (в данном случае ГУ и связей между ними) не приводят, как правило, к отказу системы, а только понижают эффективность ее функционирования.

В простейшем случае [8] эффективность – вероятность выполнения автономной ГУ задачи по бесперебойному электроснабжению потребителей. Коэффициент эффективности E при этом дополнительно приобретает смысл вероятности того, что выполнение этой задачи не будет сорвано из-за невозможности реализации некоторых режимов (отказов). Считаем, что N_Σ – множество всех возможных режимов работы ГУ, реализуемых для обеспечения электроснабжения потребителей; N – множество реально существующих режимов. Однако возможны некоторые дополнительно допустимые режимы, образующие вместе с N множество N_0 . Тогда $N \in N_0 \in N_\Sigma$ (рис. 1).

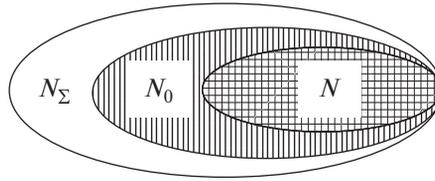


Рис. 1. Возможное соотношение режимов ГУ.

Эффективность здесь есть вероятность p того, что режим n принадлежит множеству N , то есть $E = p\{n \in N\}$. Аналогично $E_0 = p\{n \in N_0\}$. Вероятность того, что режим работы ГУ одновременно принадлежит двум множествам N и N_0 составит

$$p\{n \in N, n \in N_0\} = p\{n \in N\},$$

так как $N \subset N_0$ (рис. 1).

В соответствии с теоремой умножения вероятностей получим

$$p\{n \in N, n \in N_0\} = p\{n \in N_0\} p\{n \in N | n \in N_0\}.$$

Коэффициент эффективности при этом определится как

$$E = \frac{p\{n \in N\}}{p\{n \in N_0\}} = \frac{p\{n \in N, n \in N_0\}}{p\{n \in N_0\}} = p\{n \in N | n \in N_0\}. \quad (1)$$

Полученное выражение (1) есть вероятность того, что электроснабжение потребителей будет осуществлено практически в любом режиме работы ГУ.

Учитывая сложность получения оценок эффективности функционирования систем РГ, возникает необходимость разработки и совершенствования соответствующего математического аппарата. В общем виде эффективность системы РГ $E_{\text{сист}}(t)$ сводится к расчету по формуле, предложенной в [2]

$$E_{\text{сист}}(t) = \sum_{k=1}^{2^n} p_{X_k}(t) E_{X_k}, \quad (2)$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – состояния системы РГ; n – количество элементов системы, находящихся в двух состояниях ($x_i = 1$ – работоспособное, $x_i = 0$ – отказ); $p_{X_k}(t)$ – вероятность того, что система находится в состоянии X_k в момент времени t ; E_{X_k} – эффективность системы при условии, что она в состоянии X_k .

Когда n велико, то расчет эффективности по (2) достаточно сложен. Поэтому рассмотрим подход, предложенный в [2, 3, 5]. Основа его заключается в том, что на некоторой территории размещено несколько объединенных в систему ГУ, обеспечивающих электроснабжение потребителей не только непосредственно присоединенных к “своей” ГУ, но и (при достаточном резерве мощности и пропускной способности сети) других, территориально близких и находящихся в зонах перекрытия смежными ГУ.

Если в системе из n элементов i -й элемент с вероятностью p_i находится в исправном состоянии, то результаты его функционирования распространяются на зону S_i . Зоны действия двух, трех и т.д. элементов могут пересекаться, образуя области $S_{i,j}, S_{i,j,k}, \dots, S_{i,j,k,\dots,n}$ с соответствующими элементами влияния. В общем случае таких зон может быть 2^n . Область действия всей системы представляется объединением всех зон действия элементов $S = \bigcup_{i=1}^n S_i$ [2].

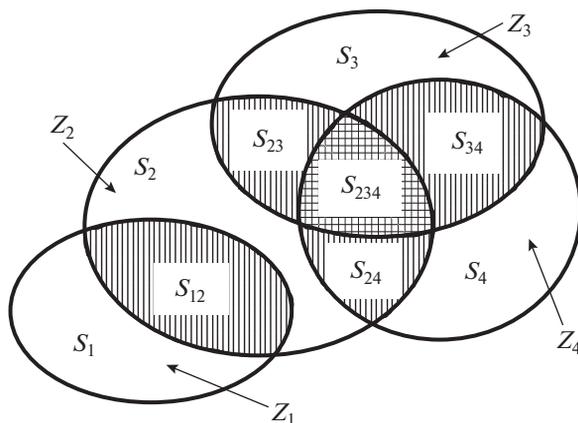


Рис. 2. Зоны работы ГУ системы РГ.

Предположим, что условный энергорайон, представляющий систему РГ, состоит из четырех ГУ (электростанций), каждая из которых обеспечивает работу потребителей электроэнергии “своей” зоны, $\Omega = \bigcup_{i=1}^4 Z_i$. В каждой зоне выделяются области, пересекающиеся с соседними двумя или более зонами. Следовательно, образуется система из перекрывающимися зонами действия.

Часть зоны, не пересекающаяся с другими, обозначается как S_i , ($i = \overline{1,4}$), а области пересечения — $S_{i,j}$, $S_{i,j,k}$ ($i = j = k = \overline{1,4}$). Все выделенные зоны не пересекаются и определяют район S действия ГУ исследуемой системы РГ (рис. 2).

Коэффициенты эффективности выделенных областей обозначим через E с соответствующими индексами. Если, например, отказывает ГУ, основные потребители которой расположены в зоне Z_2 , коэффициенты эффективности областей, покрываемых этой зоной, изменятся. Вместо E_{12} , E_{23} , E_{24} , E_{234} получаем E_1 , E_3 , E_4 , E_{34} . Естественно, что в каждой практической задаче коэффициенты эффективности для областей пересечения определяются индивидуально.

Подобное разбиение энергорайона функционирования системы РГ, состоящего из n ГУ, может существенно сократить число выделенных областей относительно величины 2^n , то есть, упрощает вычисление коэффициента эффективности системы РГ.

Расчет его сводится к вычислению коэффициентов эффективности каждой из областей и их взвешенному суммированию с учетом

- мощности, выдаваемой генерирующими агрегатами;
- коммутационных возможностей схем электроснабжения;
- режимных сетевых параметров;
- состава, особенностей работы и уставок систем РЗ и ПА;
- потребляемой мощности и технологических особенностей потребителей, находящихся в соответствующей зоне;
- других показателей, характеризующих переход системы РГ в режим ограничений.

Составляющая коэффициента эффективности e_i в результирующей сумме для области S_i без перекрытия S с другими зонами определяется как

$$e_i = S_i E_i p_i,$$

где p_i — вероятность отказа ГУ в области Z_i с нарушением электроснабжения потребителей в зоне S_i .

Составляющая для области перекрытия зон Z_i и Z_j равна

$$e_{ij} = S_{ij} (E_{ij} p_i p_j + E_i p_i q_j + E_j q_i p_j).$$

Составляющая, образованная перекрытием трех зон Z_i , Z_j и Z_k ,

$$e_{ijk} = S_{ijk} (E_{ijk} p_i p_j p_k + E_{ij} p_i p_j q_k + E_{ik} p_i q_j p_k + E_{jk} q_i p_j p_k + E_i p_i q_j q_k + E_j q_i p_j q_k + E_k q_i q_j p_k).$$

Оценка коэффициентов эффективности каждой из областей при наличии большего числа зон производится аналогично.

Отметим, что коэффициент эффективности определяет средний уровень качества функционирования системы, обусловленный надежностью входящих в нее элементов. Он может быть как безразмерным (вероятность выполнения требований потребителя), так и иметь размерность (величина генерируемой мощности, объем электропотребления, прибыль, ущерб и др.). При отказе ГУ в зоне Z_i потери (ущерб) определяются последствиями от нарушения электроснабжения потребителей, расположенных в области S_i . В остальных областях перекрытия с другими зонами будет (или может) наблюдаться некоторое снижение эффективности функционирования потребителей (снижение производительности, изменение параметров технологического процесса и (или) качества выпускаемой продукции), находящихся в этих зонах [1]. При этом ущерб Y_i в зоне S_i можно оценить по выражению

$$Y_i = S_i E_i + S_{ij} (E_{ij} - E_i) + S_{ijk} (E_{ijk} - E_i) + \dots$$

Приближенная оценка величины суммарного ущерба Y_Σ с учетом вероятности p_i отказов ГУ в различных зонах систем РГ составит

$$Y_\Sigma = \sum_{i=1}^n p_i Y_i.$$

ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ РГ С ПЕРЕКРЫВАЮЩИМИСЯ ЗОНАМИ ДЕЙСТВИЯ

Рассмотрим систему РГ, состоящую из двух одинаковых ГУ, каждая из которых может работать в двух режимах: x_1 и x_2 .

Если возможны оба режима $x_1 \cup x_2$, то эффективность функционирования системы РГ $- E = S_2$; если $\bar{x}_1 \cup x_2$ или $x_1 \cup \bar{x}_2$, то $E = S_1$, (при \bar{x}_i , $i = 1, 2$ режим не выполняется) и $S_1 < S_2$; если $\bar{x}_1 \cup \bar{x}_2$, то $E = 0$ [9].

Состояние системы РГ характеризуется вектором с компонентами

$$\{x_1^{(1)} x_2^{(1)} x_1^{(2)} x_2^{(2)}\}, \quad (3)$$

где верхние индексы – номер ГУ, нижние – соответствующий режим.

Каждая компонента (3) принимает два значения: x_i^j – режим электроснабжения потребителей осуществляется; \bar{x}_i^j – режим неосуществим.

Когда $E = 0$ имеем:

$$\{\bar{x}_1^{(1)} \bar{x}_2^{(1)} \bar{x}_1^{(2)} \bar{x}_2^{(2)}\}.$$

Когда $E = S_1$ могут быть два режима: а) произвольная, но только одна компонента вектора (3) принимает значение x_i^j , а остальные – \bar{x}_i^j ; б) состояние системы РГ характеризуется одним из векторов

$$\{\bar{x}_1^{(1)} \bar{x}_2^{(1)} \bar{x}_1^{(2)} \bar{x}_2^{(2)}\}, \{x_1^{(1)} \bar{x}_2^{(1)} \bar{x}_1^{(2)} \bar{x}_2^{(2)}\}. \quad (4)$$

Когда $E = S_2$ также возможны два режима: а) не менее трех компонент вектора (3) принимают значение x_i^j (одна ГУ полностью исправна); б) состояние системы РГ характеризуется одним из векторов

$$\{\bar{x}_1^{(1)} \bar{x}_2^{(1)} \bar{x}_1^{(2)} \bar{x}_2^{(2)}\}, \{x_1^{(1)} \bar{x}_2^{(1)} \bar{x}_1^{(2)} \bar{x}_2^{(2)}\}. \quad (5)$$

Сравнение выражений (4) и (5) показывает, что в обоих случаях система состоит из двух ГУ, работающих в одном из возможных режимов; число невозможных режимов также одинаково, но показатели эффективности различны. Отличие определяется характером выполнения условий по электроснабжению потребителей. В соответствии с (4) за счет двух частично работоспособных ГУ система РГ оказывается полностью работоспособной.

Оценка эффективности систем РГ должна, прежде всего, основываться на фундаментальных знаниях об их конструктивных, технологических и организационных особенностях, принципах работы основных и элементов управления, систем релейной защиты и автоматики, входящих в их состав [10, 11]. Порядок даже предварительной оценки эффективности систем РГ определяется следующей последовательностью:

- получение информации об основных схемно-режимных характеристиках и технико-экономических показателях работы системы РГ;
- выяснение возможных задач функционирования системы РГ;
- выяснение условий работы системы РГ параллельно с ЭЭС, автономно и в комбинированном режиме;
- оценка ожидаемой частоты повторений задач и режимов функционирования системы РГ;
- составление функциональной схемы системы;
- разбиение системы РГ на отдельные элементы (зоны, области);
- выбор приемлемой для данной системы РГ количественной меры качества функционирования;
- вычисление показателей надежности элементов, характеризующих вероятность состояния каждого элемента в различные моменты времени;
- на основании вероятностей состояний отдельных элементов вычисление вероятностей средних (при необходимости допустимых и (или) предельных) состояний системы РГ;
- оценка показателей эффективности возможных состояний системы РГ.

Если для каждого состояния системы РГ возможно оценить “мгновенное” значение ее эффективности функционирования (выходного эффекта), то коэффициент эффективности определяется как среднее значение выходного эффекта по всем состояниям системы [2].

ПРИМЕРЫ ОРИЕНТИРОВОЧНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ РГ

Проиллюстрируем методику расчета коэффициента эффективности системы РГ на простых примерах, в которых традиционный расчет показателей надежности оказывается достаточно сложным.

1) *Непересекающиеся зоны действия ГУ в системе РГ.* Каждая из двух одинаковых ГУ в системе РГ обеспечивает электроснабжение потребителей в своей зоне с вероятно-

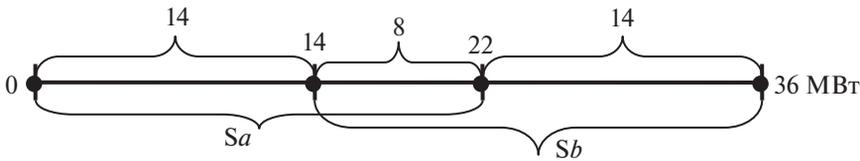


Рис. 3. Зоны выдачи мощности ГУ.

стью $p = 0.9$. Коэффициент готовности каждой ГУ примем $K_r = 0.95$. Для того, чтобы система была работоспособна не только в любой требуемый момент времени, но и была бы в состоянии безотказно проработать в течение требуемого интервала $t + t_0$ вводится коэффициент интервальной готовности

$$K_r^*(t, t + t_0).$$

В общем случае $p^*(t) \neq p$, поскольку p – вероятность безотказной работы, начиная с состояния полной работоспособности, а $p^*(t)$ – вероятность безотказной работы, начиная с одного из возможных промежуточных состояний работоспособности. В целях упрощения допустим, что $t \rightarrow \infty$ и $p^*(t) = p = 0.9$. Тогда

$$K_r^*(t) = K_r p^*(t).$$

При отказе одной из ГУ система РГ распадается на две независимые подсистемы, каждая из которых может обеспечить лишь половину нагрузки потребителей. Коэффициент эффективности одной ГУ при этом определяется как

$$e_{гy}(t) = 0.5K_r p = 0.5 \times 0.95 \times 0.9 = 0.4275.$$

Следовательно, рассматриваемая система РГ обеспечивает коэффициент эффективности равный $E_{\Sigma} = 2e_{гy} = 0.855$.

2) **Точечная оценка эффективности функционирования системы РГ в случае простейших ГУ.** Система электроснабжения (РГ) состоит из двух одинаковых электростанций (ГУ): S_a и S_b , обеспечивающих питание потребителей максимально потребляемой мощностью $P_{\Sigma} = 36$ МВт. Станция S_a работает в режиме выдачи мощности в пределах от $P = 0$ до $P = 22$ МВт, а станция S_b – от $P = 14$ до $P = 36$ МВт. Зоны выдачи мощности этими станциями показаны на рис. 3.

Требуется найти вероятность обеспечения появляющейся в любой момент времени нагрузки потребителей в диапазоне $0 \leq P \leq 36$ МВт, если надежность обеспечения необходимой мощностью этими станциями в этот момент: $R_a = R_b = 0.95$. При этом вероятность надежного электроснабжения потребителей, находящихся в зоне действия каждой из ГУ – $R_1 = R_2 = 0.9$, а в зоне одновременного действия обеих станций (в зоне перекрытия)

$$\mathcal{P} = 1 - (1 - R_1)^2 = 0.99.$$

Предположим, что нагрузка потребителей в данный момент времени составляет P_0 МВт. Вероятность того, что система РГ в этот момент времени будет в состоянии ее обеспечить

$$\mathcal{P}_0 = R_a R_b = 0.95 \times 0.95 \approx 0.9.$$

и $P = 14$ до $P = 22$ МВт (зона перекрытия – $P_n = 8$ МВт) нагрузку потребителя обеспечивают обе станции, а в пределах зон (от $P = 0$ до $P = 14$ и от $P = 22$ до $P = 36$ МВт) – по одной ГУ.

Показатель эффективности E_0 состояния системы РГ при заданной нагрузке P_0 МВт определяется средневзвешенной величиной

$$E_0 = \frac{P_{S_a \cap S_b}}{P_\Sigma} \mathcal{P} + \frac{P_{S_a - (S_a \cap S_b)} + P_{S_b - (S_a \cap S_b)}}{P_\Sigma} \mathcal{P}_0 = \frac{8}{36} \times 0.99 + \frac{14 + 14}{36} \times 0.9 = 0.92.$$

Отметим, что “вес” здесь имеют состояния системы РГ, а не отдельные ее элементы (ГУ). В одной и той же системе РГ “вес” элемента существенно зависит от того, для какого состояния он рассматривается. Если при всех работоспособных элементах произошел отказ i -го элемента, то очевидно, что он сопровождается последствиями, отличающимися от случая, когда этот i -й элемент отказал после того, как перед этим событием произошел отказ одного j ($i \neq j$) или нескольких элементов этой системы. Однако для систем РГ во многих случаях элемент, более важный, по сравнению с другим, в одном состоянии системы, оказывается более важным и в другом ее состоянии.

Вероятность состояния системы, когда в пределах нагрузки $0 < P_a < 22$ МВт действует одна станция S_a , а в интервале $22 < P < 36$ МВт – ни одной,

$$\mathcal{P}_a = R_a(1 - R_a) = (0.95 \times 0.05) \approx 0.05.$$

Показатель эффективности E_a состояния системы РГ при нагрузке P_a МВт определяется как

$$E_a = \frac{22}{36} \times 0.9 + \frac{14}{36} \times 0 = 0.55.$$

Поскольку в условиях рассматриваемого примера состояния S_a и S_b абсолютно идентичны, в результате получаем результирующую эффективность работы анализируемой системы РГ:

$$E_\Sigma = \mathcal{P}_0 E_0 + 2\mathcal{P}_a E_a = 0.9 \times 0.92 + 2 \times 0.05 \times 0.55 = 0.883.$$

3) Оценка технической эффективности функционирования системы РГ на определенном интервале времени. Система электроснабжения (РГ) состоит из двух одинаковых электростанций (ГУ). В случае работоспособности обеих станций обеспечиваемая ими нагрузка составляет P МВт. В случае отказа одной из них величина обеспечиваемой нагрузки снижается до значения $0.3P$. При отказе двух станций электроснабжение потребителей нарушается полностью. Отказы ГУ – независимые события. Вероятность безотказной работы каждой ГУ подчиняется экспоненциальному закону распределения

$$p(t) = e^{-\frac{t}{T}} = e^{-\lambda t}.$$

Рассматривая системы РГ подобного типа необходимо учитывать, что ГУ не будут выдавать требуемую потребителям мощность при останове в результате профилактических работ, а также воздействию каких-либо внешних факторов (погодные условия, если в состав ГУ определяется ВИЭ). Однако в целях упрощения задачи примем, что закон распределения при этом остается экспоненциальным.

Если принять длительность расчетного периода $\tau = t$ равной среднему времени безотказной работы каждой ГУ $t = T = 1$ год, то вероятность безотказной работы ГУ составит

$$p = e^{-\frac{t}{T}} = e^{-1} = 0.368.$$

Показатели технической эффективности состояний системы РГ определяются произведением передаваемой мощности на время функционирования:

1) техническая эффективность функционирования системы РГ, когда обе станции работоспособны в течение расчетного периода τ

$$E_0 = P\tau;$$

2) техническая эффективность функционирования системы РГ, когда в момент t_i отказала одна из ГУ

$$E_i(t_i) = 0.3P\tau + 0.7Pt_i \quad t_i < \tau, \quad i = a, b;$$

3) техническая эффективность функционирования системы РГ, когда одна ГУ отказала в момент t_i , а вторая – в момент t_j

$$E_{ij}(t_i, t_j) = 0.3Pt_j + 0.7Pt_i \quad t_i < t_j < \tau, \quad i, j = a, b.$$

Результирующая оценка эффективности анализируемой системы РГ в соответствии с теорией, изложенной в [4, 5] получена по формуле

$$\begin{aligned} E &= p^2 P\tau + 2p\{0.3P\tau(1-p) + 0.7P\tau[1-p(1+\lambda\tau)]\} + \\ &+ 2\{0.3P\tau[0.75 - p(1+\lambda\tau) + 0.25p^2(1+2\lambda\tau)] + 0.7P\tau[0.25 - p + (0.75 + 0.5\lambda\tau)p^2]\} = \\ &= 0.368^2 P\tau + 2 \times 0.368\{0.3P\tau(1 - 0.368) + 0.7P\tau[1 - 0.368(1 + 1)]\} + \\ &+ 2\{0.3P\tau[0.75 - 0.368(1 + 1) + 0.25 \times 0.368^2(1 + 2)]\} + \\ &+ 0.7P\tau[0.25 - 0.368 + (0.75 + 0.5)0.368^2] = (0.135 + 0.28 + 0.138)P\tau = 0.553P\tau. \end{aligned}$$

Анализируемая система РГ может рассматриваться как система с аддитивными показателями технической эффективности [4, 5], поскольку каждая ГУ этой системы вносит свою независимую долю c_k в общий выходной эффект. Тогда эффективность системы определится в соответствии со следующими выражениями

$$E_0 = P\tau\mathcal{P}_0 = P\tau[1 - (1-p)^2] = P\tau[1 - (1 - 0.368)^2] = 0.6P\tau;$$

$$E_i(t_i) = 0.3P\tau\mathcal{P}_0 + 0.7Pt_i\left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau}}\right);$$

$$E_{ij}(t_i, t_j) = 0.3Pt_j\left(1 - e^{-\frac{t_j}{\tau}}\right) + 0.7Pt_i\left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau}}\right);$$

$$E(t) = \sum_{k=1}^n E_k c_k = E_0 c_0 + E_i(t_i) c_i + E_{i,j}(t_{i,j}) c_{i,j}, \quad \sum_{k=1}^n c_k = 1,$$

где c_k – коэффициент долевого участия каждой ГУ, работающей в системе РГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие систем РГ выдвигает требования по обеспечению их надежности, которые отличаются от классических оценок. Несмотря на то, что надежность элементов растет, темп этого роста отстает от скорости увеличения сложности системы. Характер функций, выполняемых системой РГ, требует ее высокой надежности, но большое количество элементов, их связей и режимов работы может отрицательно сказаться на эффективности системы в целом. Поэтому данное направление исследований исключительно актуально.

Отсутствие практических методов оценки эффективности функционирования систем РГ, характеризующихся переменной структурой, которая может изменяться случайным

образом и пересекающимися зонами действия ГУ требует решения данных проблем, удовлетворяя требования конкурентоспособности российского и мирового рынка.

Эффективность функционирования системы РГ должен оценивать специалист, знакомый с системой в целом, знающий требования, предъявляемые к ней, ее структуру, режимы, способы и средства управления и защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Папков Б.В., Куликов А.Л. Теория систем и системный анализ для элетроэнергетиков. М.: Издательство Юрайт, 2016.
2. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем. М.: Дрофа, 2008.
3. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988.
4. Ушаков И.А. Эффективность функционирования сложных систем // В сб. "О надежности сложных технических систем". М.: "Советское радио", 1966. С. 26–56.
5. Ушаков И.А. Методы исследования эффективности функционирования технических систем. М.: Изд-во "Знание" 1976.
6. Куликов А.Л., Осокин В.Л., Папков Б.В. Проблемы и особенности распределенной электроэнергетики // Вестник НГЭИ 2018. № 11(90). С. 123–136.
7. Папков Б.В. Уязвимость и стойкость объектов электроэнергетики // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 68. Исследование и обеспечение надежности систем энергетики. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2017. С. 441–452.
8. Дзиркал Э.В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий. М. Радио и связь, 1981. 176 с.
9. Плямоватый В.В. К теории "выживания" сложных систем // В сб. тр. семинара научного совета по проблемам надежности отделения механики и процессов управления АН СССР "Основные вопросы теории и практики надежности". М.: Советское радио, 1980. С. 283–292.
10. Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. 280 с.
11. Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с.

Features of the Assessment of Structural Reliability of Systems with Objects of Distributed Generation

B. V. Papkov^{a,*} and V. L. Osokin^{a,}**

^a*Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russia*

**e-mail: boris.papkov@gmail.com*

***e-mail: osokinvl@mail.ru*

The development and operation of modern power supply systems for consumers, which are part of distributed generation systems (RG) with their connection to the electric power system (EES) and renewable energy sources (RES), require changes in the assessment of their reliability and efficiency based on the corresponding mathematical apparatus. The complexity of the energy, technological and organizational structure of distributed generation (RG) systems does not allow the classical concept of "failure" to be used to evaluate their reliability. It is shown that the RG systems belong to structures with several overlapping zones of action, which determines their features, which are represented by some integral characteristic - the efficiency of operation, which characterizes the degree of expediency of using the RG system in various modes. An approach based on evaluating the effectiveness of the functioning of such systems is proposed. Examples of calculation of relatively simple structures of RG systems that perform several tasks simultaneously are given.

Keywords: reliability, structure, efficiency, distributed generation, mode