

УДК 621.311.1.018.3

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; В. О. Комар, к. т. н.; К. И. Кравцов, к. т. н.

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

В статье проводится анализ свойств, которые должны учитываться в критерии качества функционирования распределительных сетей. Предлагается метод его определения, который основывается на объединении теории марковских процессов и критериального метода.

Ключевые слова: качество функционирования, распределительные сети, надежность, экономичность, безопасность.

Введение

Стабильное, качественное снабжение электроэнергией населения и промышленности является определяющим условием экономического развития страны. Сегодня технико-экономические проблемы электроэнергетики состоят в прогрессирующем процессе старения оборудования. Состояние электроэнергетики после длительного периода недостаточного инвестирования характеризуется серьезным износом как генерирующего, так и сетевого оборудования. Так, в результате эксплуатации распределительных сетей за последние 15 лет, когда развитие, восстановление и модернизация отстали от процесса физического старения и коэффициент дефектности распределительных электросетей Украины достиг 13 %, сравнительно надежное снабжение электроэнергией может стать ненадежным и неудовлетворительным относительно качества электроэнергии [1].

Из-за ограниченности ресурсов электроснабжающих компаний возникает задача рационального распределения средств с целью выбора приоритетных участков реконструкции и модернизации оборудования. Принятие решений относительно финансируемых мероприятий должно базироваться на данных о качестве функционирования электросетевого хозяйства. То есть оценке проведения мероприятий, – на сколько улучшилось функционирование распределительных сетей.

Целью статьи является анализ характеристик распределительных сетей для решения задачи определения критерия оценки качества функционирования.

Характеристика объекта исследования

Электрическая сеть представляет собой комплекс электрооборудования и устройств, предназначенных для передачи и распределения электрической энергии. Современные электрические сети по своей структуре, организации эксплуатации и принципам управления относятся к сложным техническим комплексам (системам). При принятии решений о управлении такой системой важной является оценка ее функциональной готовности или качества функционирования.

Распределительная сеть – "сложный" объект, состоящий из различных элементов – трансформаторных подстанций, кабельных и воздушных линий электропередач и т. д. Качество функционирования такого "сложного" объекта зависит от надежности каждого элемента сети и структурных связей между ними.

Под качеством функционирования сложной системы понимают множество свойств, которые определяют способность системы выполнять задачи, поставленные при ее изготовлении [2, 3]. Основной задачей распределительных сетей является обеспечение надежного снабжения качественной электрической энергией присоединенных к ней потребителей.

Определенное функциональное излишество в структуре распределительных сетей

приводит к тому, что появление отказов отдельных элементов или незначительное изменение тех или иных рабочих параметров могут привести не к полному отказу системы электроснабжения, а только к некоторому ухудшению качества функционирования и понижению эффективности её в целом. Поэтому для оценки качества функционирования распределительной сети целесообразным является введение количественного показателя, который бы учитывал влияние таких отказов.

Очевидно, что выбор соответственного показателя качества функционирования в каждом конкретном случае определяется типом системы, ее назначением, видом выполняемой задачи, характером различных внешних факторов [4]. Для распределительной сети показатель качества должен учитывать надежность электроснабжения потребителей энергией соответствующего качества. Другим важным свойством является экономичность, характеризующаяся показателями использования средств, которые вкладываются в электрическую сеть [3].

В последнее время большое значение приобретает свойство безопасности системы. В проблеме безопасности сложных технических комплексов нужно выделить два направления. Первое из них относится к их нормальной эксплуатации. Неотвратимые техногенные влияния на человека и окружающую среду. Второе направление связано с технологическими нарушениями, то есть промышленная безопасность. Под промышленной безопасностью технического объекта понимают его способность обеспечить защиту человека, окружающей среды и собственности от опасных влияний, возникающих во время аварий и инцидентов на этом объекте [3].

Во время исследования промышленной безопасности определяются причинно-следственные связи возникновения аварий и других нарушений с их последствиями (социальными, экологическими, экономическими). Показателями промышленной безопасности является риски последствий аварий и инцидентов, которые показывают меру безопасности последствий от нарушений за определенный период времени.

Оценка надежности, экономичности и безопасности дает достаточно полное представление о качестве функционирования системы в нормальных условиях (рисунок 1).

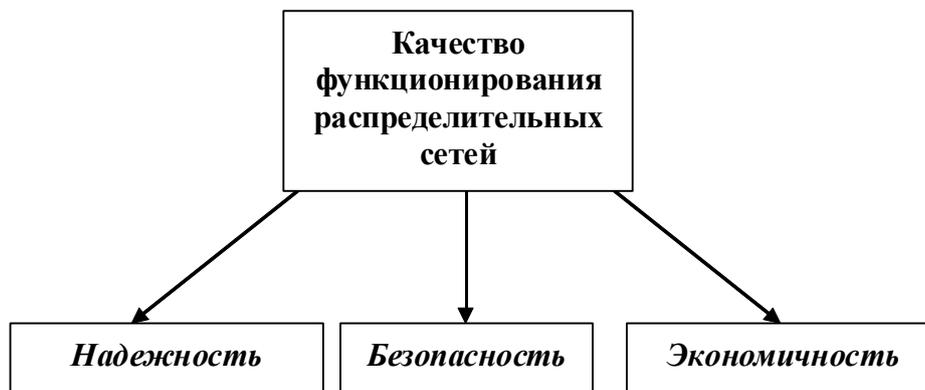


Рис. 1. Свойства, которые являются определяющими для качества функционирования распределительной сети

Концентрирование внимания, например, только на показателях экономичности не гарантирует удерживание допустимых уровней социальной и экологической безопасности или выполнение договорных обязательств по надежности электроснабжения потребителей. В свою очередь, надежная электрическая сеть в части выполнения необходимых функций может быть не экономической и не соответствовать требованиям безопасности.

Показатель качества функционирования сложной системы

Со временем сложная система переходит из состояния в состояние путем изменения состояния элементов, из которых она состоит, (отказы элементов, их возобновления, разные внешние влияния и т. д.). Каждое конкретное состояние системы может быть охарактеризовано некоторым условным показателем качества функционирования. Этот показатель характеризует результат выполнения функций системой, находящейся именно в этом состоянии.

Если обозначить через p_i вероятность того, что система в момент времени t находится в i -м состоянии, а через Φ_i – коэффициент данного состояния (условный показатель качества функционирования системы в i -м состоянии), тогда показатель качества функционирования системы может быть определен по формуле [4]

$$E(t) = \sum_{i=1}^m p_i(t) \Phi_i, \quad (1)$$

где сложение выполняется по всем состояниями системы.

Наиболее трудоемким и принципиально сложным вопросом во время оценки эффективности систем есть определение коэффициентов эффективности конкретных состояний системы. К основным методам получения необходимых коэффициентов относятся [4]:

1. Аналитический метод. В ряде случаев коэффициенты можно определить аналитическим путем. Например, коэффициент может быть явной функцией количества работающих элементов некоторого типа. Определенные сложности возникают с определением коэффициентов для траектории. Однако и здесь иногда возможны относительно простые выражения.

2. Метод моделирования. Для определения коэффициентов может быть использованный метод физического и математического моделирования состояний и траекторий. Этот метод может иметь самостоятельное значение во время исследования принципов функционирования систем, а также использоваться для уточнения и корректирования коэффициентов качества, которые получены приближено аналитическим методом.

Для определения коэффициентов качества (особенно для классов траекторий) может быть использован и метод статистического моделирования.

3. Метод непосредственного эксперимента с использованием опытного образца. Этот метод по сути является физическим моделированием на реальном объекте. Состояния и траектории системы имитируются отключением в соответствующие моменты времени определенных элементов. Этот метод обычно используется для проверки качества системы.

Коэффициент эффективности состояния может иметь какое-то физическое содержание, например, условная вероятность, абсолютная или относительная погрешность, убыток, мощность и т. д.

Использование ненормированного коэффициента эффективности позволяет сравнить по среднему значению выходного эффекта даже разные системы.

Показатель качества функционирования распределительной сети

Во время оценки качества функционирования распределительной сети можно использовать все подходы, изложенные выше, как для сложной системы.

Для описания процесса функционирования распределительной сети можно использовать теорию марковских процессов. Принципиальное допущение, сделанное при моделировании – это экспоненциальный закон распределения возникновения происшествий, связанных с отказами и обновлениями элементов системы электроснабжения. Есть сведения [5, 6], свидетельствующие о более сложном характере закона распределения времени

возникновения отказов и времени возобновлений, чем экспоненциальный, однако использование именно экспоненциального распределения во время расчета вероятности безотказной работы этих элементов можно считать общепринятым. Объяснить это можно тем, что:

- пока нет единственного взгляда относительно действительного закона распределения времени отказов и возобновлений;

- применение экспоненциального закона распределения времени между отказами приводит к погрешности в сторону некоторого снижения расчетной вероятности безотказной работы сравнительно с фактической, то есть не может быть причиной создания ненадежной системы;

- есть работы, например [7], в которых рассмотрены системы, имеющие элементы, время отказов и возобновлений которых являются комбинацией экспоненциального, вейбуловского и нормально-логарифмического распределения, и показано, что на достаточно значительном промежутке времени эти системы ведут себе так, если бы все их элементы имели экспоненциальное распределение времени отказов и возобновлений.

Процесс функционирования можно изобразить в виде графа (рис. 2), за которым можно сложить систему дифференциальных уравнений Колмогорова [8]. Приняв во внимание допущение о неучитывании динамики переходных процессов между отдельными состояниями ($\frac{dp_i}{dt} = 0$), система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m v_{ji} p_i &= 0, \quad j = \overline{2, n} \\ \sum_{i=1}^m p_i &= 1, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где p_i – вектор вероятностей состояний исследуемой системы; v_{ij} – элементы матрицы v , является матрицей интенсивностей переходов из одного состояния в другое; m – количество возможных состояний исследуемой системы; n – количество направлений изменения состояний, выходящих из рабочего состояния 1 (см. рисунок 2).

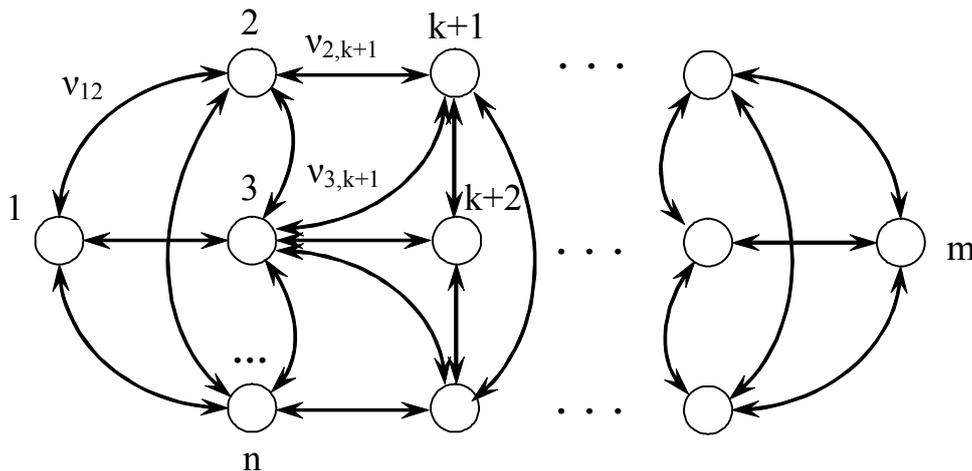


Рис. 2. Граф изменения состояний системы

Для определения вероятностей рабочих состояний и оценки качества функционирования исследуемой системы необходимо решить алгебраическую систему уравнений (2), которая в более общем виде записывается

$$v \cdot p = b \quad (3)$$

В критериальном программировании систему уравнений ортогональности и нормирования можно записать [9]

$$\mathbf{a} \cdot \boldsymbol{\pi} = \mathbf{b}, \quad (4)$$

где \mathbf{a} – матрица показателей; $\boldsymbol{\pi}$ – вектор критериев подобия.

Проанализировав системы уравнений (3) и (4), можно отметить, что матрица коэффициентов \mathbf{v} системы уравнений (3) аналогична матрице размерностей \mathbf{a} системы уравнений (4), что применяется в теории подобия [8, 9, 10], а вектор \mathbf{p} , компоненты которого являются по сути весовыми коэффициентами состояний исследуемого процесса, по своему содержанию соответствует вектору критериев подобия $\boldsymbol{\pi}$, элементы которого являются безразмерными соотношениями параметров системы и в том случае, когда они определяются методом интегральных аналогов, также являются весовыми коэффициентами составляющих целевой функции (пронормированы к единице) [9]. Тогда можно провести аналогию между системой уравнений (3) та (4).

Для подтверждения аналогии (одного из видов подобия) между системой уравнений ортогональности и системой уравнений Колмогорова используем теоремы теории подобия. Для этого построим многочлены от матриц \mathbf{a} и \mathbf{v} .

Если использовать интерполяционный многочлен [11], то матрицу \mathbf{a} системы уравнений ортогональности (3) критериального программирования и матрицу переходов \mathbf{v} системы уравнений (4) можно привести к матричному многочлену. Используем для этого экспоненциальную функцию $f(z) = e^{zt}$. Если минимальный многочлен (в данном случае это характеристический многочлен $\Delta(z)$) состоит только из линейных множителей $(z - z_k)$, то достаточно определить функцию $f(z)$ в характеристических точках z_1, z_2, \dots, z_m . При этом система уравнений для коэффициентов интерполяционного многочлена имеет вид:

$$f(z_k) = a_0 + a_1 z_k + \dots + a_{m-1} z_k^{m-1}, \quad (5)$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} f(z_1) \\ f(z_2) \\ \dots \\ f(z_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & z_1^2 & \dots & z_1^{m-1} \\ 1 & z_2 & z_2^2 & \dots & z_2^{m-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_m & z_m^2 & \dots & z_m^{m-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_{m-1} \end{bmatrix}.$$

Решив эту систему относительно a_0, a_1, \dots, a_{m-1} , получим

$$f(A) = \sum_{i=0}^{m-1} a_i A^i.$$

Тогда в общем виде матрица \mathbf{a} будет иметь многочлен вида:

$$f(\mathbf{a}) = \sum_{i=0}^{m-1} a_i \mathbf{a}^i. \quad (6)$$

А матрица \mathbf{v} :

$$f(\mathbf{v}) = \sum_{i=0}^{m-1} a_i \mathbf{v}^i. \quad (7)$$

Сделав такое превращение, можно использовать все свойства скалярных многочленов, в том числе и последствия теорем теории подобия.

Известно [12], что для установления подобия между оригиналом и моделью вместо

условий

$$\pi_i = \frac{a_i \prod_{j=1}^n u_j^{\alpha_{ji}}}{f} = \text{idem} \quad (8)$$

могут использоваться равнозначные им выражения

$$\mu_i = \frac{\mu_{a_i} \prod_{j=1}^n \mu_{u_j}^{\alpha_{ji}}}{\mu_f} = 1, \quad (9)$$

где π_i – критерии подобия, определенные способом интегральных аналогов; μ_i – индикаторы подобия, которые определяются масштабами соответствующих коэффициентов и параметров модели.

Используя эти условия, можно доказать подобие матричных многочленов и соответствующих им матриц.

Для матричных многочленов (6) и (7) условие (9) можно записать:

$$\frac{\mu_{a_1}}{\mu_f} = 1; \quad \frac{\mu_{a_2} \mu_{\alpha/v}}{\mu_f} = 1; \quad \frac{\mu_{a_3} \mu_{\alpha/v}}{\mu_f} = 1 \text{ и т. д.,}$$

$$\text{где } \mu_{a_i} = \frac{a_{i\alpha}}{a_{i\nu}}; \quad \mu_{\alpha/v} = \alpha \cdot v^{-1}; \quad \mu_f = \frac{e^{|\alpha|t}}{e^{|\nu|t}}.$$

В теории матриц есть раздел матричных превращений [11], согласно которому эквивалентное превращение можно рассматривать как переходы к новым координатным базисам для вектора \mathbf{x} и \mathbf{y} , тогда $\mathbf{x}' = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{x}$ и $\mathbf{y}' = \mathbf{P}\mathbf{y}$. Тогда превращение $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{Q}$ соответствует независимым превращениям координат, которые определяются матрицами \mathbf{Q}^{-1} и \mathbf{P} (неособенные квадратные матрицы).

Если векторы \mathbf{x} и \mathbf{y} превращаются к одному координатному базису, то можно записать $\mathbf{P} = \mathbf{Q}^{-1}$. Тогда переходим к превращению подобия $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{Q}$. Важным свойством превращения подобия является то, что определитель матрицы инвариантен относительно этого превращения:

$$\det \tilde{\mathbf{A}} = \det \mathbf{A}.$$

Тогда такое превращения не изменяет собственных значений матрицы, поэтому можно записать

$$\det[\mathbf{z}\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{A}}] = \det[\mathbf{z}\mathbf{E} - \mathbf{A}].$$

Результат решения системы уравнений (5) для матриц $\tilde{\mathbf{A}}$ и \mathbf{A} будет одинаковым.

Роль превращаемой матрицы \mathbf{Q} играет модальная матрица \mathbf{H} [11], тогда $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{H}$. Она может быть определена как совокупность столбцов $\mathbf{h}^{(i)}$, которые есть решением однородных уравнений:

$$(\mathbf{z}_i\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{h}^{(i)} = 0 \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

где n – ранг матрицы \mathbf{A} .

По построению матриц \mathbf{a} и \mathbf{v} можно найти такую матрицу \mathbf{H} , которая б удовлетворяла

системе однородных уравнений (10). Тогда, $\mu_{a_i} = \frac{a_{i\alpha}}{a_{i\nu}} = 1$; $\mu_{a/\nu} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}^{-1} = 1$; $\mu_f = \frac{e^{|\mathbf{a}^t|}}{e^{|\mathbf{v}^t|}} = 1$, а

поэтому выполняются условия (9), которые подтверждают подобие матриц ортогональности критериального программирования и переходов системы уравнений Колмогорова.

Подобие моделирования марковских процессов и критериального моделирования позволяет применить к системе уравнений (3) принципы критериального программирования [9].

В результате можно получить функцию, по которой можно оценивать качество функционирования распределительной сети. В критериальной форме она будет иметь вид [9]:

$$f(x_*) = \sum_{i=1}^m P_i \prod_{j=1}^n x_{*j}^{v_{ij}}, \quad (11)$$

где P_i – критерий подобия, который в данном случае является вероятностью пребывания системы в состоянии i ; $\prod_{j=1}^n x_{*j}^{v_{ij}}$ – показатель качества функционирования состояния i ; x_{*j} – независимые параметры, характеризующие основные свойства системы в соответственных состояниях.

За базисное значение принято качество функционирования "идеальной" распределительной сети, коэффициент готовности которой равен единице [7]. Полученный таким путем критерий позволяет оценивать изменение качества функционирования распределительной сети и на его основе обосновывать капитальные вложения.

Выводы

В статье определены основные свойства распределительной сети, которые непосредственно влияющие на качество ее функционирования. Предложено метод определения критерия оценки качества функционирования распределительной сети, который обосновывается на объединении теории марковских процессов и критериального метода. Используя такой подход можно решать следующие задачи:

1. Определять стратегию повышения качества функционирования системы к заданному уровню в условиях природного старения элементов и ограничений на ресурсы.
2. Оценивать необходимость и определять очередность мероприятий с модернизации элементов.
3. Оценивать необходимость и определять состав мероприятий для реконструкции системы по критерию качества функционирования.
4. Оценивать необходимость и определять очередность мероприятий для продолжения срока службы элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надійне та безпечне електропостачання, розвиток електромереж - під контролем Держенергонагляду [Електронний ресурс] 12 липня 2007. Режим доступу: http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/article?art_id=54905&cat_id=35981
2. Оценка надежности работы электрической сети (Трактат) [Електронний ресурс] / В. А. Скопинцев, В. И. Чемоданов, М. И. Чичинский // М.: – 2004. – 37 с. Режим доступу: www.oaoesp.ru/file/b2b72409/pub4.doc
3. Аналіз якості функціонування складних систем за допомогою критеріальних моделей [Електронний ресурс] / Комар В. О., Тептя В. В. // Наукові праці ВНТУ. – 2007. – №1. Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/ukr/07kvoocm.pdf>

4. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
5. Мокін Б. І., Юхимчук С. В. Математичні моделі робастної стійкості та чутливості нелінійних систем. Монографія 1999. – 122 с.
6. Р. Биллinton, Р. Аллан. Оценка надежности электроэнергетических систем / Пер. с англ. В. А. Туфанова, под. ред. Ю. А. Фокина.: Энергоатомиздат. М. 1988. – 287 с.
7. Фокин Ю. А., Туфанов В. А. Оценка надёжности систем электроснабжения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.
8. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений. – М.: Наука, 1977. - 176 с.
9. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение критериального метода в электроэнергетике. – К.: УМК ВО, 1989. – 137 с.
10. Лежнюк П.Д., Комар В.О. Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 108 с.
11. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. - К.: Техніка, 1977. - 768 с.
12. Лежнюк П.Д., Собчук Н.В. Параметрична подібність в задачах оптимізації електричних систем. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 100 с.

Лежнюк Петр Демьянович – д. т. н., профессор заведующий кафедрой электрических станций и систем.

Комар Вячеслав Александрович – к. т. н., доцент кафедры электрических станций и систем.
Винницкий национальный технический университет

Кравцов Константин Иванович – к. т. н., начальник отдела разработки электронных узлов ООО "Екстрем-Україна"