

УДК 621.311.001.2

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

Ю. Н. РУДЕНКО, И. А. УШАКОВ

(Иркутск, Москва)

Предлагается подход к количественной оценке живучести сложных территориально распределенных электроэнергетических систем, основанный на сравнительном сопоставлении живучести различных вариантов исполнения системы с помощью минимаксных критериев. Рассматриваются случаи, соответствующие аддитивному и неаддитивному характеру показателей живучести, определяемых погашением нагрузки. Илл. 1, табл. 2. Стр. 14-20.

Введение. По мере создания все более сложных и все более ответственных систем, к числу которых, в частности, относятся и современные системы связи, транспорта и энергетики, все острее встает вопрос обеспечения их живучести. Интуитивно ясно, что, например, в электроэнергетике концентрация мощности электрических станций, создание энергокомплексов, с одной стороны, приводит к более эффективному использованию капиталовложений и снижению эксплуатационных расходов, но, с другой стороны, существенно снижает живучесть системы.

Последнее обстоятельство объясняется тем, что при существенной концентрации генерирующей мощности электроэнергетической системы (ЭС) даже единичное, но крупное нарушение работоспособности (в силу стихийных причин или иных внешних воздействий) в какой-либо одной точке может привести к существенному нарушению энергобаланса в большом регионе страны. Кроме того, часто отдельные нарушения, еще не представляющие сами по себе катастрофических событий и несущие, казалось бы, локальные последствия, вызывают каскадное развитие повреждений (например, в ЭС).

Все это приводит к необходимости разработки метода количественного учета живучести систем в процессе их проектирования и функционирования, позволяющего сравнивать между собой различные варианты еще и по этому весьма важному критерию.

Ниже предлагается подход к количественной оценке живучести, рассматриваемый на примере сложной территориально распределенной ЭС.

Под живучестью здесь понимается свойство системы противостоять крупным возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей. Сами эти возмущения или внешние воздействия, приводящие к нарушению живучести ЭС, являются, как правило, труднопредсказуемыми как по интенсивности и по месту возникновения, так и по времени возникновения, причем существенным является также и то, что эти возмущения могут происходить одновременно во многих местах.

Поэтому важным отличием задачи оценки живучести от других близких задач (например, от задачи оценки безотказности, устойчивости и других надежных свойств системы или их комбинаций) является то, что здесь оказывается невозможным использование понятия вероятности

возникновения тех или иных ситуаций, а потому неприемлемы и вероятностные критерии оценки. Более естественным, на наш взгляд, представляется использование минимаксных критериев.

Постановка задачи. Задачи оценки живучести должны решаться при проектировании и при эксплуатации ЭЭС. В первом случае речь идет о выборе структуры и размещения электростанций, структуры основной электрической сети, структуры системы управления и самих принципов управления с учетом анализа живучести ЭЭС. В условиях эксплуатации обеспечение живучести достигается выбором коммутации схемы системы, режимов работы системы, настройки системы управления.

Задача оценки живучести с учетом неопределенности исходных условий, включая и характер внешних воздействий, может быть сведена к сравнительному анализу вариантов по критерию живучести. Это приводит к необходимости введения количественных показателей для измерения живучести.

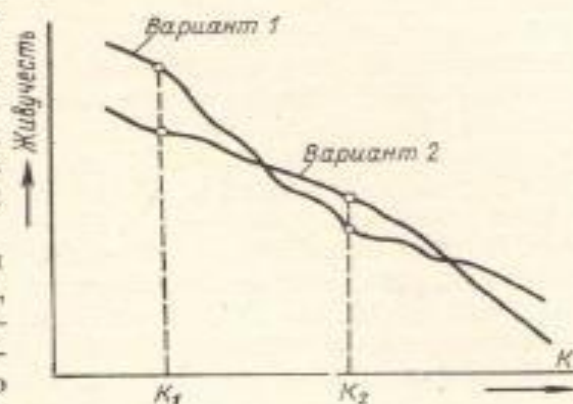
На наш взгляд, одним из естественных показателей для измерения живучести является величина погашенной нагрузки (C) при фиксированной совокупности воздействий. При этом нужно иметь в виду, что чем больше значение этого показателя, тем ниже живучесть. Может использоваться также относительная величина погашенной нагрузки (\bar{C}), лежащая в пределах от 0 до 1.

Совокупность воздействий может характеризоваться, как уже отмечалось, числом, интенсивностью и местом возникновения возмущений. Для предлагаемого минимаксного критерия сравнения вариантов целесообразно считать, что при равном числе возмущений допустим, при одинаковой интенсивности всех возмущений) они прикладываются к таким объектам системы, выход из строя которых приводит к наихудшим последствиям.

Понятно, что вариант системы, более живучий при числе K_1 одновременных внешних воздействий (вариант 1 на рисунке, где по оси ординат откладывается значение $1-\bar{C}$), может оказаться менее живучим по отношению к некоторому другому варианту (вариант 2 на рисунке) при числе K_2 одновременных внешних воздействий. Аналогичным образом живучесть вариантов системы может зависеть и от интенсивности, и от места возникновения совокупности возмущений.

Эти обстоятельства однозначно приводят к необходимости экспертного выбора окончательного варианта системы с учетом всех предполагаемых совокупностей воздействий, включая анализ последствий выбора данного варианта на перспективу развития ЭЭС. Варианты предполагаемых совокупностей воздействий определяются различными значениями их числа и интенсивности. С учетом сделанного выше замечания места приложения воздействий однозначно определяются предварительным ранжированием объектов по величине погашенной нагрузки при их выходе из строя.

Следует иметь в виду, что повышение живучести, как правило, требует увеличения затрат. Однако, учитывая отмеченную выше труднопредсказуемость характеристик возможных внешних воздействий, задачу выбора решений по критерию живучести вряд ли можно формулировать в целом как оптимизационную, хотя очевидна целесообразность, например, поиска вариантов, отвечающих минимуму приведенных затрат при некоторых (заданных) характеристиках внешних воздействий, или вариантов, обес-



Зависимость живучести различных вариантов системы от числа одновременных внешних воздействий K

печивающих максимально возможную живучесть при заданных приведенных затратах.

Ниже излагается метод количественной оценки живучести, который может быть использован для сравнения вариантов системы. В Приложении приводится пример расчета.

Рассмотрим систему, состоящую из n объектов и однократно испытывающую K одинаковых по интенсивности (мощности) одновременных внешних воздействий. Предположим, что один объект системы может испытывать лишь одно внешнее воздействие из множества K (это условие всегда может быть удовлетворено соответствующей дифференциацией системы), т. е. $K \leq n$. Пусть воздействие на i -й объект приводит к погашению нагрузки величиной C_i . Следует заметить, что при воздействии на i -й объект погашение нагрузки может быть как у данного, так и у иных объектов системы. Понятно, что в результате одновременного воздействия на некоторую совокупность объектов системы суммарная мощность погашенной нагрузки может быть больше, чем сумма одиночных значений погашенной нагрузки. Это может иметь место и в случае, когда совокупность воздействий на систему приводит к развитию аварии. Такой неаддитивности показателя живучести соответствует неравенство

$$C_{1,2,\dots,n} \geq \sum_{i=1}^K C_i \quad (1)$$

В принципе возможно и условие

$$C_{1,2,\dots,n} \leq \sum_{i=1}^K C_i \quad (2)$$

однако при рассмотрении ЭЭС этот случай практически не имеет места.

Простейшим является случай, когда погашение нагрузки от некоторой совокупности воздействий равно сумме погашенной нагрузки от отдельных воздействий (случай строгой аддитивности показателя живучести):

$$C_{1,2,\dots,n} = \sum_{i=1}^K C_i \quad (3)$$

Возможны два эквивалентных способа сравнения вариантов систем: 1) при заданном числе воздействий K выбирается тот вариант, который при наиболее неблагоприятном размещении воздействий заданной и одинаковой интенсивности приводит к минимальной величине погашенной нагрузки; 2) при тех же условиях выбирается вариант, который при фиксированной величине погашенной нагрузки A допускает возможность большего числа воздействий. Ниже будет детально рассмотрен лишь второй способ сравнения вариантов.

Рассмотрение задачи об оценке живучести ЭЭС начнем с простейшего случая, соответствующего аддитивному характеру показателя живучести.

Случай аддитивности показателя живучести. Сравним живучесть N вариантов системы. Пусть s -й вариант системы состоит из n объектов и пусть известна величина погашенной нагрузки C_i^s , к которой приводит повреждение одного отдельно взятого i -го объекта в s -м варианте системы. Величина погашенной нагрузки может зависеть от текущего состояния системы (состав работающего оборудования, его загрузка, время года и суток и т. п.), однако с точки зрения поставленной задачи можно рассматривать одно состояние системы (например, соответствующее полному составу работающего оборудования) и один расчетный режим, отвечающий периоду годового максимума нагрузки системы. Естественно считать наиболее живучей ту систему s^* , для которой выполняется условие

$$K_{s^*}^A = \max_{1 \leq s \leq N} K_s^A,$$

где K_s^A — минимальное число воздействий, при котором в s -м варианте системы мощность погашенной нагрузки впервые превышает величину A .

Решение таким образом сформулированной задачи сводится к следующему. Для каждого s -го варианта системы нумеруем объекты в порядке убывания величины нагрузки, которая будет погашена в случае их повреждения:

$$C_1^s > C_2^s > \dots > C_{n_s}^s, \quad s = \overline{1, N} \quad (4)$$

(процедура оценки C_i^s выходит за рамки данной работы).

Затем находим для s -го варианта системы значение K_s^A из условия

$$\sum_{i=1}^{K_s^A-1} C_i^s < A \leq \sum_{i=1}^{K_s^A} C_i^s. \quad (5)$$

Сравнение величин K_s^A ($s = \overline{1, N}$) и дает ответ о степени живучести рассматриваемых вариантов системы по уровню A . Та из систем будет считаться более живучей, для которой значение K_s^A оказывается наибольшим.

Случай неаддитивности показателя живучести. В этом случае процедура определения живучести зависит от того, как ведет себя функция показателя живучести системы с ростом числа поврежденных ее объектов (для наихудшей комбинации).

В общем случае задача сводится к прямому перебору всех возможных состояний системы. Поскольку, однако, при больших n , перебор состояний представляет трудоемкую задачу, целесообразно рассмотреть возможность построения конструктивного алгоритма оценки.

Пусть опять C_i^s — величина погашенной нагрузки в s -м варианте системы при повреждении i -го объекта, C_{ij}^s — величина погашенной нагрузки при повреждении пары i и j объектов и т. д. Если объекты i и j в s -м варианте не связаны (территориально или функционально), то результирующее погашение нагрузки в такой ситуации можно считать аддитивным, т. е. $C_{ij} = C_i + C_j$. То же касается и случая большего числа несвязанных объектов.

Для монотонных функций возможны две следующие общие ситуации: а) функция показателя живучести системы выпукла, т. е. $C_{\alpha\beta} \geq C_\alpha + C_\beta$, где α, β — произвольные непересекающиеся подмножества объектов из множества n ; б) функция показателя живучести системы вогнута, т. е. $C_{\alpha\beta} \leq C_\alpha + C_\beta$.

Ситуация, когда функция показателя живучести системы является вогнутой, на наш взгляд, не представляет практического интереса.

Рассмотрим два важных частных случая:

- 1) $C_\alpha + C_\beta \leq C_{\alpha\beta} \leq C_\alpha + C_\beta + \min \{C_\alpha, C_\beta\}$,
- 2) $C_\alpha + C_\beta \leq C_{\alpha\beta} \leq C_\alpha + C_\beta + \max \{C_\alpha, C_\beta\}$,

где $\min \{C_\alpha, C_\beta\}$ и $\max \{C_\alpha, C_\beta\}$ обозначают соответственно, что из двух величин — C_α и C_β — выбирается меньшая или большая.

Дать общие оценки, когда на практике оказывается более справедливым первое соотношение, а когда второе, не представляется возможным. Однако подобные ограничения на приращения величины погашенной нагрузки кажутся достаточно правдоподобными. В первом случае имеет место относительно слабый эффект взаимного влияния двух энергообъектов, а во втором — достаточно сильный. По-видимому, второе соотношение является в некотором смысле экстремальным, так как при этом ограничении допускается, что в случае сравнительно близких значений C_α и C_β суммарная мощность погашенной нагрузки оказывается в 1,5 раза больше суммы одиночных значений погашенной нагрузки, а при сильно различаю-

щихся значениях C_a и C_b суммарная мощность может приближаться к удвоенной величине суммы одиночных значений погашенной нагрузки.

Для рассматриваемых случаев удается сделать простые и достаточно хорошие оценки числа разрушающих воздействий.

Пронумеруем объекты системы в порядке убывания величины C_i , т. е. $C_i \geq C_{i+1}$, и рассмотрим последовательно оба случая.

Пусть A — максимально допустимая мощность погашенной нагрузки системы; K^A — минимальное число разрушающих воздействий, при котором мощность погашенной нагрузки больше или равна A . Будем отыскивать верхнюю и нижнюю оценки величины K^A , т. е.

$$\underline{K} \leq K^A \leq \bar{K}.$$

В первом случае \bar{K} определяется из условия

$$\sum_{i=1}^{\bar{K}-1} C_i < A \leq \sum_{i=1}^{\bar{K}} C_i, \quad (6)$$

а \underline{K} — из условия

$$\sum_{i=1}^{\underline{K}-1} C_i < A \leq \sum_{i=1}^{\underline{K}} i C_i. \quad (7)$$

Оценка \underline{K} может быть улучшена, если учесть, что для некоторых объектов функция показателя живучести строго аддитивна. В этом случае, если через n_i обозначить число объектов с индексами $j < i$, для которых $C_{ij} > C_i + C_j$, то \underline{K}^* следует определять из условия

$$\sum_{i=1}^{\underline{K}^*-1} C_i < A \leq \sum_{i=1}^{\underline{K}^*} n_i C_i. \quad (8)$$

Поскольку $n_i \leq i$, то $\underline{K}^* \geq \underline{K}$.

Выражения (6) — (8) полезны в том смысле, что позволяют не только оценить количество разрушающих воздействий, но и характеризуют трудоемкость перебора при отыскании точного значения K^A .

Во втором случае \bar{K} определяется из условия (6), а \underline{K} — из условия

$$\sum_{i=1}^{\underline{K}-1} (\underline{K} - i + 1) C_i < A \leq \sum_{i=1}^{\underline{K}} (\underline{K} - i + 1) C_i. \quad (9)$$

И в этом случае оценка \underline{K} может быть улучшена, если учесть строгую аддитивность показателя живучести для некоторых пар объектов. При этом получаем

$$\sum_{i=1}^{\underline{K}^*-1} C_i (\underline{K}^* - i + 1 - n_i') < A \leq \sum_{i=1}^{\underline{K}^*} C_i (\underline{K}^* - i + 1 - n_i'),$$

где n_i' — число объектов с индексами, принадлежащими интервалу $[i+1, \underline{K}^*]$, для каждого из которых показатель живучести строго аддитивен. Поскольку $n_i' \geq 0$, то $\underline{K}^* \geq \underline{K}$.

Заметим, что наибольшую трудность вызывают именно оценки самих значений C_i , C_{ij} и т. д. Обычно в подобных случаях используются экспертные методы оценивания, поскольку при формальном оценивании величины нагрузки, которая будет погашена при воздействии на тот или иной объект энергетика или их совокупность, не всегда удается учесть массу различных неформализуемых факторов (например, моральный ущерб, косвенное влияние перерывов в функционировании одних промышленных потреби-

щихся значениях C_a и C_b , суммарная мощность может приближаться к удвоенной величине суммы одиночных значений погашенной нагрузки.

Для рассматриваемых случаев удастся сделать простые и достаточно хорошие оценки числа разрушающих воздействий.

Пронумеруем объекты системы в порядке убывания величины C_i , т. е. $C_i \geq C_{i+1}$, и рассмотрим последовательно оба случая.

Пусть A — максимально допустимая мощность погашенной нагрузки системы; K^A — минимальное число разрушающих воздействий, при котором мощность погашенной нагрузки больше или равна A . Будем отыскивать верхнюю и нижнюю оценки величины K^A , т. е.

$$K \leq K^A \leq \bar{K}.$$

В первом случае \bar{K} определяется из условия

$$\sum_{i=1}^{\bar{K}-1} C_i < A \leq \sum_{i=1}^{\bar{K}} C_i, \quad (6)$$

а K — из условия

$$\sum_{i=1}^{K-1} C_i < A \leq \sum_{i=1}^K i C_i. \quad (7)$$

Оценка K может быть улучшена, если учесть, что для некоторых объектов функция показателя живучести строго аддитивна. В этом случае, если через n_i обозначить число объектов с индексами $j < i$, для которых $C_j > C_i + C_j$, то K^* следует определять из условия

$$\sum_{i=1}^{K^*-1} C_i < A \leq \sum_{i=1}^{K^*} n_i C_i. \quad (8)$$

Поскольку $n_i \leq i$, то $K^* \geq K$.

Выражения (6) — (8) полезны в том смысле, что позволяют не только оценить количество разрушающих воздействий, но и характеризуют трудоемкость перебора при отыскании точного значения K^A .

Во втором случае \bar{K} определяется из условия (6), а K — из условия

$$\sum_{i=1}^{K-1} (K-i+1) C_i < A \leq \sum_{i=1}^K (K-i+1) C_i. \quad (9)$$

И в этом случае оценка K может быть улучшена, если учесть строгую аддитивность показателя живучести для некоторых пар объектов. При этом получаем

$$\sum_{i=1}^{K^*-1} C_i (K^* - i + 1 - n_i') < A \leq \sum_{i=1}^{K^*} C_i (K^* - i + 1 - n_i'),$$

где n_i' — число объектов с индексами, принадлежащими интервалу $[i+1, K^*]$, для каждого из которых показатель живучести строго аддитивен. Поскольку $n_i' \geq 0$, то $K^* \geq K$.

Заметим, что наибольшую трудность вызывают именно оценки самих значений C_i , C_j и т. д. Обычно в подобных случаях используются экспертные методы оценивания, поскольку при формальном оценивании величины нагрузки, которая будет погашена при воздействии на тот или иной объект энергетики или их совокупность, не всегда удастся учесть массу различных неформализуемых факторов (например, моральный ущерб, косвенное влияние перерывов в функционировании одних промышленных потреби-

Значения C_i^* в табл. 1 определены на условии

$$C_i^* = \begin{cases} \Delta N, & \text{если } N_{\text{гт} i}^* \geq \Delta N, \\ N_{\text{гт} i}^*, & \text{если } N_{\text{гт} i}^* < \Delta N, \end{cases}$$

где ΔN — мощность единичного внешнего воздействия, заданная равной 60.

Живучесть оценивается значением K^A , при котором суммарная величина погашенной нагрузки впервые превышает величину $A=150$ (50% от $N_{\text{гт} i}^*$). Результаты расчетов приводятся в табл. 2.

Большие значения K^A соответствуют большей живучести системы. С помощью этого примера легко показать, что тем более мощным является единичное воздействие, тем больше отличия в степени живучести сравниваемых вариантов.

Поступило
22 XII 1977