

а так как приращения ΔQ_i , полученные в результате решения СЛУ, могут приводить к нарушению указанных границ, то реактивные мощности источников фиксируются на граничных значениях. На следующем итерационном шаге вычисленные модули напряжений могут не укладываться в допустимый диапазон. Как известно, в методе Зейделя подобные броски реактивной мощности ΔQ_i сглаживаются, и начальный процесс втягивания в область допустимых режимов проходит асимптотически. Поэтому создание единого комплекса программ, в котором расчеты могут проводиться вначале по методу Зейделя (СЕТЬ), а затем по методу Ньютона (РИТМ), позволило, во-первых, снизить время расчетов режимов в 2—4 раза, иногда и более по сравнению с ранее проводившимися расчетами методом Зейделя по программе СЕТЬ; во-вторых, повысить надежность решения с заданной точностью по небалансам узлов. Промышленная эксплуатация комплекса в течение полутора лет подтверждает эффективность совместной работы двух программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сравнительный анализ программ расчета на ЦВМ статической устойчивости энергосистемы/ С. А. Савалов и др. — В кн.: Доклады на III Всесоюзном научно-техническом совеща-

нии по устойчивости и надежности энергосистем СССР. — Л.: Энергия, Ленингр. отд.-ние, 1973.

2. Автоматизация управления энергообъединения/ Под ред. С. А. Савалова. — М.: Энергия, 1979.

3. Фазылов Х. Ф. Методы режимных расчетов электрических систем. — Ташкент: Наука, 1964.

4. Крумм Л. А. Применение метода Ньютона — Рафсона для расчета стационарного режима сложных электрических систем. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1965, № 5.

5. Идельчик В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. — М.: Энергия, 1977.

6. Тинней В., Уолкер И. Прямые решения квазиблочных уравнений цепей оптимально упорядоченным разложением матрицы на треугольные сомножители. — ТИИЭР, 1967, т. 55, № 11.

7. Van Ness J. E. Convergence of iterative load-flow studies. — Power Apparatus and Systems, 1960, № 46.

8. Van Ness J. E., Griffin J. H. Elimination methods for load-flow studies. — Power Apparatus and Systems, 1961, № 54.

9. Бартоломей П. И. Об учете коэффициентов трансформации при расчете режима электрической сети методом уравнений узловых напряжений. — Электричество, 1971, № 10.

10. Бартоломей П. И., Ерохин П. М., Окуловский С. К. Особенности решения линейных уравнений итерационными методами в задачах расчета нормальных и оптимальных режимов энергосистем. — В кн.: Применение математических методов и вычислительной техники в энергосистемах. — Свердловск: Изд. УПИ, 1977.

11. Бартоломей П. И., Виницкий А. Л., Окуловский С. К. Использование специального эквивалентирования электрической системы в итерационном расчете режима. — В кн.: Применение вычислительных средств в теплотехнических и энергетических расчетах. — Свердловск: Изд. УПИ, 1979.

[20.11.81]

УДК 621.316.1.019.34.001.24

Расчет надежности систем электроснабжения

ФОКИН Ю. А., канд. техн. наук, ХАРЧЕНКО А. М., инж.

Московский энергетический институт

Большинство методов, практически применяемых для оценки надежности электрических систем и систем электроснабжения, основаны на так называемом элементном подходе, т. е. предполагается, что система состоит из самостоятельных в смысле функционирования элементов без количественного учета особенностей режимов работы их по нагрузке и напряжению и влияния этих режимов на надежность системы. Не отрицая необходимости разработки более совершенных методов расчета надежности, которые учитывали бы взаимосвязь режимов работы отдельных элементов электрических систем, следует отметить, что использование существующих методов в промышленном проектировании осуществляется довольно редко. Одной из причин, на наш взгляд, является отсутствие простых и наглядных алгоритмов формирования условий работоспособности, в достаточной степени адекватно отражающих структуру и взаимосвязи функционирования элементов.

Предложения по формированию условий работоспособности, ориентированные на решение задачи — определение характеристик отказов системы прицепочечном развитии аварии электрических систем, изложенные, например, в [1] на основе алгебры логики, представляются весьма трудоемкой операцией для проектных расчетов надежности. Методика расчета надежности сложных электрических схем в [2] достаточно подробно отражает логику функционирования их. Однако в [2] задача расчета надежности сложных схем не разделяется на этапы: формирова-

ния условий работоспособности и определения показателей надежности с учетом двух основных видов отказов, характерных для электрических сетей, т. е. отказов типа «обрыв», когда передача электроэнергии по элементу нарушается вследствие отказа самого элемента, и отказов типа «короткое замыкание», когда передача электроэнергии по элементу нарушается лишь вследствие электрической связи его с другим или с другими отказавшими элементами.

В [3] применительно к расчетам на ЦВМ рассматриваются методы формализации получения расчетных схем по надежности с учетом логики функционирования электрической схемы. В настоящей статье изложено дальнейшее развитие этого подхода. Его особенностью является разделение задачи на формализацию процесса получения расчетных схем по надежности в простой и наглядной форме и расчет показателей надежности, причем в качестве исходной информации используется принципиальная электрическая схема. Так как при формализации условий работоспособности возникает необходимость отражения процессов восстановления отказавших элементов, оперативных переключений, а также отказов автоматической коммутационной аппаратуры при локализации аварий, то создается возможность количественно оценить влияние на уровень надежности таких факторов, как организация аварийных ремонтов в системе, оперативность управления переключениями, гибкость схемы, надежность локализации аварийных ситуаций автоматическими коммутационными аппаратами.

Осуществление автоматизированного расчета показателей надежности для проектирования систем электроснабжения произвольной конфигурации, возможно на основе методов структурного анализа [4 и 5]. Расчеты показателей надежности выполняются относительно расчетных узлов потребления мощности (узлов нагрузки) без учета в количественной форме ограничений пропускной способности элементов системы.

Для решения этой задачи можно рассмотреть два способа расчета показателей надежности, с различной степенью точности учитывающих логику функционирования схем систем электроснабжения: уточненный и приближенный.

Уточненный способ формализации процесса составления расчетных схем по надежности. Предположим, что для электрической системы, надежность которой относительно узлов нагрузки необходимо определить, задана схема ее электрических соединений со всеми элементами, влияющими на работоспособность системы. Под элементами электрической системы будем понимать генераторы, трансформаторы, линии электропередач, выключатели, разъединители, отделители и т. д., т. е. части электрической схемы, отличающиеся по конструктивным и функциональным признакам¹. Схема электрических соединений системы состоит из совокупности ветвей и узлов.

В данном случае под узлами схем понимаются физические пункты системы, которые непосредственно связаны не менее чем с тремя направлениями передачи энергии, т. е. обычно это сборные шины или секции сборных шин распределительных устройств, трехобмоточные трансформаторы, пункты ответвлений ВЛ и т. д. Для формализации составления расчетных схем целесообразно представлять узел в виде одного элемента. Совокупности последовательно соединенных элементов, связывающих узлы, образуют ветви. Ветви схемы могут состоять из одного или нескольких элементов. Предположение об одном элементе узла всегда может быть выполнено, так как если узел и состоит из двух физических элементов, то они обязательно соединены между собой, т. е. это соединение можно представить в виде ветви. В частном случае как узел, так и ветвь вообще, может не содержать ни одного физического элемента системы, если в расчетах надежности они считаются абсолютно надежными. Пара узлов в общем случае может быть связана несколькими параллельными ветвями. Подразделение системы на узлы и ветви зависит от поставленной задачи, и однозначные определения, по-видимому, нецелесообразны.

Особенность структуры и взаимосвязи элементов электрических систем таковы, что отказ одного из элементов, даже при взаимной независимости отказов, может лишать работоспособности соединенные с ним элементы, которые сами по себе работоспособны. Таким образом, отказ элемента электрической системы, как правило, не локализуется в нем самом. Рассмотрим эту особенность подробно.

Ветвь, один из элементов которой отказал, теряет свою работоспособность на время восстановления $T_{\text{в}}$

¹ Здесь не рассматриваются методы формализации процесса составления расчетных схем по надежности крупных объединенных электрических систем, когда под элементом системы для расчетов надежности в ряде случаев целесообразно понимать целиком электростанцию, подстанцию, отдельные системы и т. д.

этого элемента. Аналогично теряет работоспособность и узел, если его элемент отказал. Отказ узла приводит к потере работоспособности всех инцидентных ему ветвей, а отказ ветви (ее элемента) может по-разному влиять на работоспособность инцидентных ей узлов. Если предположить, что отказ ветви не влияет на работоспособность граничных ей узлов, то расчетная схема по надежности сложной системы совпадает с электрической схемой системы. В противном случае расчетная схема отличается от электрической схемы и зависит также от того, относительно какого узла нагрузки определяется надежность схемы. Поскольку состояние узла (отказ или рабочее состояние) однозначно определяет состояние инцидентных ему ветвей, то удобно анализировать влияние отказов элементов электрических систем приведением этих отказов к узлам схемы.

Отказ любого из элементов электрической системы приведет к отказу узла i на время восстановления данного элемента $T_{\text{в}}$, если в схеме нет коммутационного аппарата, с помощью которого можно отсоединить отказавший элемент от узла i , или отказавший элемент сам является узлом i . Узел i потеряет работоспособность на время неавтоматических оперативных переключений $T_{\text{п}}$, если между ним и отказавшим элементом отсутствует коммутационный аппарат, который может автоматически разорвать связь между узлом i и отказавшим элементом вследствие действия на него релейной защиты или автоматики, но есть коммутационный аппарат, который может быть отключен оперативным персоналом. Если же между узлом i и отказавшим элементом находится коммутационный аппарат, снабженный релейной защитой или автоматикой, то отказавший элемент будет автоматически отсоединен от узла, а узел i потеряет свою работоспособность лишь в случае отказа коммутационного аппарата. Предположим пока, что такой переход аварии через коммутационный аппарат маловероятен, т. е. не будем его учитывать.

Оформим теперь приведенные рассуждения математически с целью реализации их на ЦВМ. Обозначим через \mathbf{B} матрицу, в i -й строке которой в произвольном порядке записаны все номера элементов электрической системы, которые не отделены от узла с номером i никакими коммутационными аппаратами, т. е. такие элементы, отказ которых приводит к отказу узла i на время его восстановления $T_{\text{в}}$. Аналогично обозначим через $\mathbf{\Pi}$ матрицу, в i -й строке которой в произвольном порядке записаны элементы электрической системы, отделенные от i -го узла коммутационными аппаратами с неавтоматической коммутацией, но не отделенные от этого узла коммутационными аппаратами, снабженными релейной защитой и автоматикой, т. е. элементы, отказ которых приводит к отказу узла i на время $T_{\text{п}}$. На рис. 1 представлен участок электрической схемы системы, а в таблице соответствующие ему элементы матрицы \mathbf{B} и $\mathbf{\Pi}$.

Формирование описанных матриц достаточно просто реализуется на ЦВМ. Для этого поочередно для каждого узла осуществляется анализ элементов, расположенных на всех возможных от него ответвлениях до тех пор, пока на каждом ответвлении не будет встречен коммутационный аппарат, снабженный релейной защитой или автоматикой. При этом производится запись элементов каждого ответвления (ответвлений) в матрицу \mathbf{B} , если еще не был пройден ни

Номер строки матрицы узла (схемы)	Содержимое строк матриц		
	В	П	А
1	49, 55, 56, 81	45, 53, 63, 64	41, 37, 33, 29, 82, 2, 50, 46, 57, 65, 58, 66, 71, 72, 79
2	50, 57, 58, 82	46, 65, 66, 53	42, 38, 34, 30, 74, 73, 80, 81, 1, 49, 45, 55, 63, 56, 64
3*			79, 72, 64, 80, 73, 65
4	51, 59, 60, 83	47, 43, 39, 35, 31, 67, 68, 54	27, 20, 7, 17, 12, 25, 29, 28, 26, 24, 22, 75, 76
5	52, 61, 62, 84	48, 44, 40, 36, 32, 69, 70, 54	21, 6, 23, 22, 15, 13, 14, 16, 19, 18, 30, 77, 78
6	14, 15, 16, 18, 19, 21, 23	13, 22, 30, 32	9, 11, 36, 40, 44, 48, 52, 5, 84, 61, 69, 62, 54, 70, 34, 38, 42, 46, 24, 7, 17, 12, 25, 28, 26, 29, 27, 20, 31
7	17, 20, 25, 26, 27, 28, 24	12, 22, 29, 31	8, 10, 33, 37, 41, 45, 35, 39, 43, 47, 51, 4, 59, 67, 60, 68, 83, 54, 23, 6, 13, 14, 15, 16, 19, 21, 32, 18, 30

* — узел 3 — абстрактный узел нагрузки.

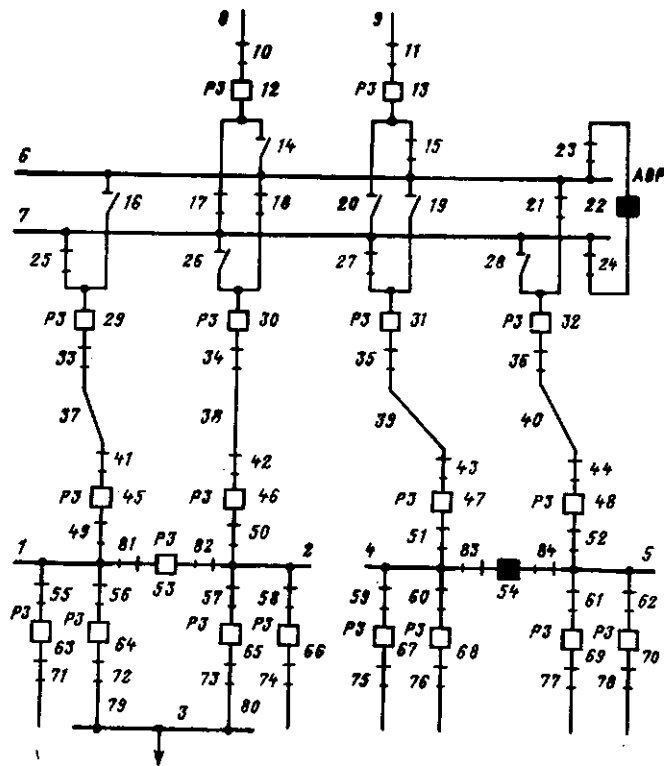


Рис. 1

один коммутационный аппарат с неавтоматической коммутацией, и в матрицу П — в противном случае. Например, для ответвления 49, 45 от узла 1 (рис. 1) элемент 49 записывается в 1-ю строку матрицы В, а элемент 45 — в 1-ю строку матрицы П. Полученные таким способом матрицы В и П являются исходной информацией для получения расчетных схем по надежности электрической системы.

По графу электрической схемы производится построение минимальных путей методом ветвления. От рассматриваемого узла нагрузки к узлу источников питания формируется первый минимальный путь, содержащий наименьшее число элементов графа схемы. От первого (со стороны источника питания) неиспользованного ответвления полученного пути образуется новый путь, и так до тех пор, пока не будут использованы все ответвления на всех возможных путях. Затем после целенаправленных логических преобразований матрицы минимальных путей, способствующих значительному сокращению времени счета, формируются минимальные сечения. Эти сечения состоят лишь из тех элементов электрической системы, по которым непосредственно передается энергия от источников питания к рассматриваемому узлу нагрузки, т. е. эти сечения отражают отказы типа «обрыв». При отказе элементов любого сечения узел нагрузки теряет питание на время восстановления по крайней мере одного из элементов сечения. Все элементы в таких минимальных сечениях учитываются в расчетах показателей надежности с временем восстановления $T_{в}$. Назовем эти сечения основными.

Расчеты надежности электрических систем с использованием только основных сечений не могут учесть всех состояний системы, поскольку существует значительное количество элементов, отказ которых может вызвать перерыв питания рассматриваемого узла нагрузки несмотря на то, что передача мощности

к нему через эти элементы не осуществляется (например, элемент 22 на рис. 1 для узла нагрузки 1). На базе основных сечений и информации, заключенной в матрицах В и П можно построить сечения, отражающие указанные состояния системы. Назовем эти сечения дополнительными, в них будут отражены отказы типа «короткое замыкание».

Из каждого основного сечения, содержащего хотя бы один узел, дополнительные сечения формируются заменой каждого узла на элементы из строк матриц В и П, соответствующих этому узлу. Например, из основного сечения (8, 6) на рис. 1 относительно узла 1 формируются дополнительные сечения (8, 21), (8, 23), (8, 32), (8, 14), (8, 16) и (8, 19).

При этом необходимо осуществлять ряд проверок. Во-первых, нужно проверить, не являются ли сечения, образованные с помощью матриц В и П, основными (например, сечение (8, 18) относительно узла 1). Во-вторых, необходимо проверить, не включен ли какой-либо элемент в дополнительное сечение более одного раза. Например, из основного сечения (6, 7) относительно узла 1 может быть образовано дополнительное сечение (22, 22). В таких случаях порядок сечения должен соответственно уменьшаться (в предыдущем примере надо сформировать одноэлементное сечение 22). Описанное формирование дополнительных сечений легко реализуется на ЦВМ. Таким образом, хотя минимальные сечения формируются на основе электрической схемы системы, фактически это происходит на основе расчетной схемы по надежности.

Расчет показателей надежности выполняется на основе сформированных минимальных сечений. Например, вероятность отказа основного сечения (38, 37) относительно узла 1

$$q_{37, 38} = \lambda_{37} T_{37} \lambda_{38} T_{38} \quad (1)$$

где λ_i — параметр потока отказа элемента i .

Вероятности отказов дополнительных сечений (8, 32) и (31, 32)

$$q_{8,32} = \lambda_8 \bar{T}_{в8} \lambda_{32} \bar{T}_{п}; \quad (2)$$

$$q_{31,32} = \lambda_{31} \bar{T}_{п} \lambda_{32} \bar{T}_{п}. \quad (3)$$

Описанный метод позволяет учесть и возможность перехода аварии за любое конечное число коммутационных аппаратов. Однако на практике считается, что вероятность перехода аварии более, чем за один коммутационный аппарат, пренебрежимо мала. Тогда достаточно сформировать матрицу A , аналогичную B и Π , в i -й строке которой в произвольном порядке записаны элементы системы, отделенные от узла i одним и не более, чем одним коммутационным аппаратом с релейной защитой. Для рис. 1 матрица A представлена в таблице. С помощью матрицы A из основных сечений формируются дополнительные. Вероятность отказа, например, сечения (8, 36) относительно узла 1

$$q_{8,36} = q_A \lambda_8 \bar{T}_{в8} \lambda_{36} \bar{T}_{п},$$

где q_A — вероятность перехода аварии за коммутационный аппарат (в данном случае за 32).

При необходимости учета вероятности перехода аварии за два и более коммутационных аппарата зоны отказов значительно расширяются, хотя вероятности отказов вновь полученных дополнительных сечений (при условии, если защита последующих коммутационных аппаратов резервирует предыдущие) уменьшается. В частности, если учитывается возможность перехода аварии за два автоматических коммутационных аппарата, то аналогично матрице A формируется еще одна матрица A_1 , где в i -й строке записываются элементы системы, отделенные от узла i двумя и не более, чем двумя коммутационными аппаратами, снабженными релейной защитой. С помощью матрицы A_1 также формируются дополнительные сечения, например, сечение (8, 78) относительно узла 1; вероятность отказа его

$$q_{8,78} = q_{A_1} q_{A_2} \lambda_8 \bar{T}_{в8} \lambda_{78} \bar{T}_{п},$$

где q_{A_1}, q_{A_2} — вероятность перехода за первый и второй автоматические аппараты.

Рассмотрим ряд особенностей функционирования электрических систем применительно к описанному методу формирования условий работоспособности.

1. Состояние коммутационного аппарата может быть различным (включен, отключен) в нормальном режиме работы системы. Если аппарат включен, то через него возможен переход аварии, и его следует учитывать при анализе во время формирования матрицы A . В противном случае (если на аппарат не воздействует устройство АВР) переход аварии невозможен, и элементы, отделенные от узла i этим аппаратом, не могут влиять на узел i . При наличии устройства АВР на отключенном аппарате вероятность его безотказной работы следует принимать равной произведению соответствующих вероятностей безотказной работы аппарата и АВР и считать возможным переход аварии через него. Если АВР одностороннего действия, то ветвь, содержащая коммутационный аппарат с АВР, задается направленной. Если АВР двухстороннего действия, то направленными задаются ветви, отключаемые при срабатывании АВР.

При расчетах показателей надежности по минимальным сечениям, содержащим коммутационные аппараты с АВР, учитываются два вида отказов. Отказ аппарата в статическом состоянии, ликвидируемый за время $\bar{T}_в$, и отказ АВР или коммутационного аппарата при заявке на срабатывание, ликвидируемый за время $\bar{T}_п$. К этим видам отказа с точки зрения расчета можно привести выделенные в [6] ложные срабатывания и излишние срабатывания коммутационных аппаратов. Ложные отключения аппаратов просто учитываются в виде составляющей отказов в статическом состоянии со временем восстановления, равным $\bar{T}_п$. Ложные включения нормально отключенных коммутационных аппаратов могут быть опасными с точки зрения распространения аварии. Промежутки времени, в течение которого данная авария не отключена защитой, составляет доли секунды или несколько секунд, поэтому вероятность наложения на него ложного включения практически равна нулю. К тому же такие коммутационные аппараты обычно должны включаться устройством АВР при возникновении отказа, т. е. в данном случае ложное срабатывание может предварить требуемое срабатывание аппарата.

Излишние (неселективные) отключения коммутационных аппаратов можно привести к отказам в срабатывании тех аппаратов, вместо которых происходят соответствующие излишние срабатывания. Например, если коммутационный аппарат j находится между аппаратом k и узлом i , и аварийные возмущения, на которые должен реагировать аппарат j , могут вызвать излишние срабатывания аппарата k , то показатели излишних срабатываний аппарата k прибавляются к соответствующим показателям отказов в срабатывании аппарата j относительно узла i . Здесь следует подчеркнуть, что в качестве автоматических аппаратов при формировании i -х строк матриц B , Π и A рассматриваются лишь те аппараты, зона чувствительности защит которых определяется по направлению от узла i . Излишние включения могут происходить лишь у коммутационных аппаратов, вводящих резерв на более высоком уровне, чем это требуется в данной аварийной ситуации. С точки зрения резервирования это не имеет принципиального значения, а другие возможные последствия учитываются в виде отказов в срабатывании соответствующих устройств АВР, коммутационных аппаратов и релейной защиты. Таким образом, отдельный учет излишних включений также не требуется.

2. Наличие устройств АПВ на линиях (или других элементах). При включении элементов в сечения из матрицы A , подсчет показателей надежности следует производить по вероятности возникновения неустойчивых повреждений, поскольку любое повреждение может «перейти» через коммутационный аппарат, осуществляющий АПВ, и стать устойчивым. Ветви, содержащие АПВ, задаются направленными в соответствие с направлением передачи энергии. Зона действия АПВ определяется как множество элементов, расположенных между коммутационным аппаратом с АПВ и последующими коммутационными аппаратами, снабженными релейной защитой. При включении этих элементов в сечения, образованные с использованием матриц B и Π , или в основные сечения, подсчет показателей надежности производится по вероятности возникновения устойчивых отказов. Вероят-

ность отказа коммутационного аппарата, снабженно-го устройством АПВ, при заявке на срабатывание принимается равной произведению вероятности отказа коммутационного аппарата без АПВ на двойную кратность АПВ, так как число срабатываний аппарата с АПВ увеличивается в соответствующее число раз. Аналогично определяются (с учетом кратности АПВ) другие показатели надежности.

3. Осуществление присоединений к секциям шин через развилку разъединителей; например, присоединение линии 37 к системе шин 6, 7. Поскольку в большинстве случаев на секционных выключателях устанавливаются устройства АВР, то наличие развилки разъединителей сказывается только при отказе секций шин, к которым они присоединены, и секционных выключателей, соединяющих эти секции, а отказ, например, линии 8 резервируется АВР без участия разъединителей. При отказе секции 6 линии 38, 40 потеряют работоспособность не на время восстановления, а на время переключения T_n . Однако, если этот эффект справедлив для сечения (6, 37), то он несправедлив для сечения (6, 8). Поэтому приближенно наличие развилки разъединителей можно учесть, полагая время восстановления соответствующих секций шин

$$T'_в = \frac{T'_в + \bar{T}_n}{2}, \quad (4)$$

где $T'_в$ — действительное время восстановления секций шин.

Следует отметить, что такого рода операции по определению эквивалентного $T'_в$ для соединения из развилки разъединителей можно и не выполнять, но тогда значительно увеличивается число путей, по которым затем определяются сечения.

4. Наличие пар элементов системы, имеющих зависимые отказы (например, цепи двухцепной ВЛ на одних опорах). Такие пары целесообразно представлять в виде одного расчетного элемента с эквивалентными показателями надежности.

5. Наличие в схеме абстрактных потребителей. Описываемый метод основывается на реальной схеме электрических соединений системы. Однако иногда узлы нагрузки задаются абстрактно, т. е. они не являются элементами системы, а лишь некоторыми расчетными точками схемы, относительно которых необходимо определить надежность системы (например, узел 3 на рис. 1). В этом случае через такой узел не может произойти переход аварии, например, с линии 79 на линию 80, и узел 3 не потеряет работоспособность при отказе линии 79.

Поэтому при формировании на ЦВМ матриц В, П и А такие узлы нужно учитывать обособленно от секций шин.

Приближенный способ формализации процесса составления расчетных схем по надежности. В этом методе можно приближенно определить показатели надежности узлов, а затем в качестве основы для расчетов использовать электрическую схему сети. При таком подходе вероятность отказа i -го узла схемы

$$q_i = q'_i + \sum_{\{j\}} \lambda_j \bar{T}_{nj} + \sum_{\{k\}} \lambda_k \bar{T}_n + \sum_{\{l\}} q_{\Delta} \lambda_l \bar{T}_n, \quad (5)$$

где q'_i — вероятность отказа элемента системы, являющегося собственно i -м узлом, а $\{j\}$, $\{k\}$ и $\{l\}$ — сово-

купности элементов, записанных в i -й строке матриц В, П и А соответственно.

При относительно небольших значениях q_{Δ} последним слагаемым в практических расчетах надежности систем электроснабжения можно пренебречь. Погрешности при приближенном способе составления расчетных схем зависят от конкретных схем систем электроснабжения, но как правило, не превышают 20%.

Расчеты показателей надежности проводятся с учетом вероятностей нахождения элементов в преднамеренном отключении. Для учета невозможности преднамеренного отключения одного из элементов минимального сечения во время аварийного ремонта другого элемента этого же сечения вводится понижающий коэффициент

$$\gamma = \frac{\bar{\tau}_n}{\bar{\tau}_n + \bar{T}_в}, \quad (6)$$

где $\bar{\tau}_n$ — время преднамеренного отключения элемента.

Описанные методы расчета позволяют определить ущерб от перерыва электроснабжения, вычисленного для каждого минимального сечения, т. е. создается возможность учета нелинейной зависимости ущерба от времени перерыва.

Изложенное формирование условий работоспособности сложных электрических схем с выделением отдельно отказов типа «обрыв», количественно отражающихся в совокупности основных сечений, а также отказов типа «короткое замыкание», отражающихся в дополнительных сечениях (использование матриц В, П и А), позволяет дифференцированно выявить вклад в результирующие показатели надежности таких факторов, как продолжительность времени восстановления элементов (организации аварийных ремонтов в системе), времени оперативных переключений (т. е. оперативной гибкости схемы и организации управления в системе), а также ненадежности автоматических коммутационных аппаратов. Это позволяет обоснованно наметить пути повышения надежности схем систем электроснабжения.

Метод оценки показателей надежности систем электроснабжения относительно узлов нагрузки реализован на ЦВМ, позволяет дифференцированно учитывать характерные особенности функционирования систем электроснабжения и обеспечивает полную автоматизацию процесса расчета.

Пример. Для иллюстрации возможности применения первого метода формирования условий работоспособности при расчетах на ЦВМ ниже приведены результаты расчета показателей надежности схемы, представленной на рис. 2, относительно узлов нагрузки 1—13.

Расчеты проводились по программе, реализующей изложенные алгоритмы и написанной на алгоритмическом языке ФОРТРАН-4. Время расчета на ЦВМ ЕС—1022—10 минут.

Номер узла нагрузки	1	2	3	4	5	6	
Параметр потока от-казов схемы, 1/год	0,13	0,053	0,13	0,12	0,044	0,12	
Время восстановления, ч	2,4	3,8	2,4	1,9	4	1,9	
Номер узла нагрузки	7	8	9	10	11	12	13
Параметр потока от-казов схемы, 1/год	0,049	0,044	0,22	0,22	0,046	0,042	0,068
Время восстановления, ч	3,2	3,6	1,7	1,7	3,4	3,8	3,7

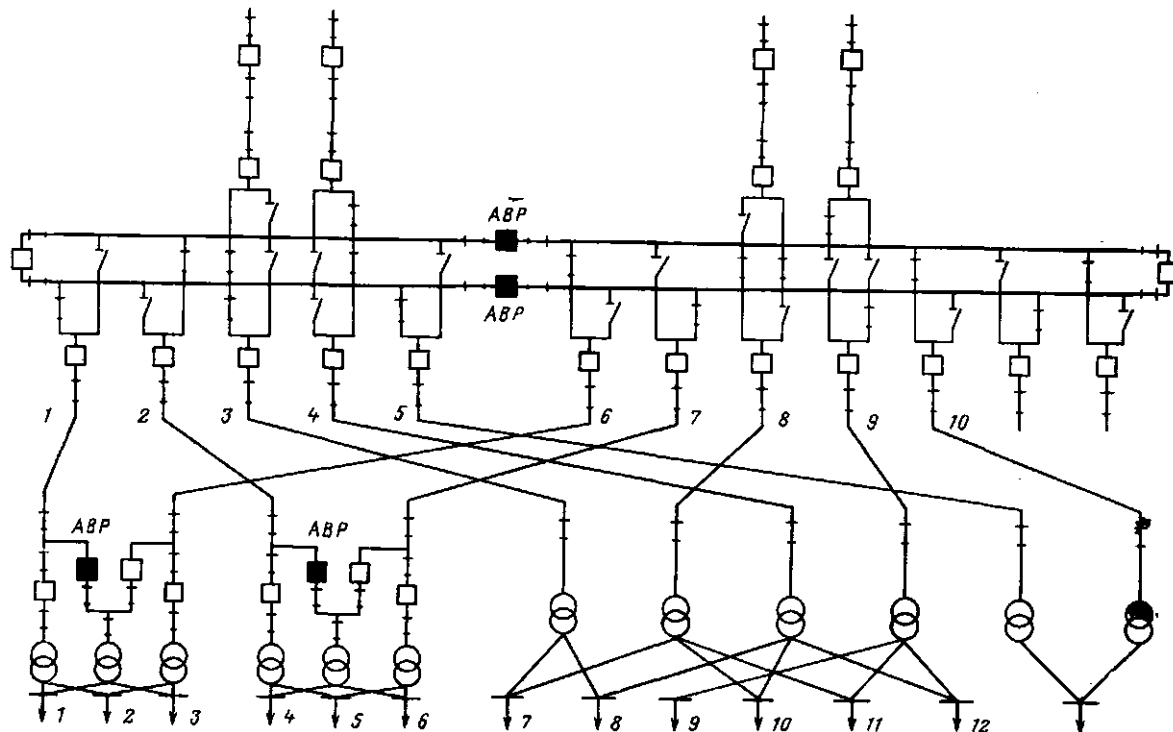


Рис. 2

Исходные данные для расчета: λ — параметр потока отказов, 1/год; T_B — время восстановления, ч; \bar{t}_n — периодичность преднамеренных отключений (ремонт, профилактика и т. д.), год; τ_n — длительность преднамеренных отключений, ч. Для выключателей: $\lambda=0,06$ 1/год (линейных); $\lambda=0,03$ 1/год (прочих); $T_B=19$ ч, $\bar{t}_n=3,5$ года; $\tau_n=200$ ч; для трансформаторов $\lambda=0,01$ 1/год, $T_B=175$ ч (для трансформаторов и подстанций с узлами нагрузки 1—3 $T_B=480$ ч) $\bar{t}_n=5$ лет; $\tau_n=330$ ч; для разъединителей $\lambda=0,008$ 1/год; $T_B=15$ ч; $\bar{t}_n=3$ года; $\tau_n=30$ ч; для секции шин $\lambda=0,01$ 1/год, $T_B=2,2$ ч; $\bar{t}_n=6$ лет; $\tau_n=10$ ч; для линий $\lambda=0,012$ 1/год (на 1 км длины); $T_B=8$ ч; $\bar{t}_n=4,5$ года; $\tau_n=125$ ч.

Длина линий в км в соответствии с нумерацией рис. 2: $l_1=l_6=0,5$; $l_2=l_7=1,37$; $l_3=l_4=l_8=l_9=0,92$; $l_5=l_{10}=0,85$.

Время неавтоматических оперативных переключений $T_n=0,5$ ч. Вероятность перехода аварии через коммутационный аппарат $q_d=0,01$.

Ветви схемы, соединяющие трансформаторы с узлами нагрузки, приняты в расчете абсолютно надежными. Они введены для учета того факта, что уже отказ двух любых трансформаторов на каждой из понижающих подстанций приводит к полному перерыву питания ее потребителей. С этой же целью узел нагрузки трех из четырех понижающих подстанций разделен на

несколько узлов. Вероятность погашения потребителей каждой из указанных подстанций равна сумме вероятностей отказа схемы относительно узлов нагрузки этих подстанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Китушин В. Г. Определение характеристик отказов системы при цепочечном развитии аварии. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1977, № 3.
2. Синьчугов Ф. И. Расчет надежности схем электрических соединений. М.: Энергия, 1971.
3. Фокин Ю. А., Харченко А. М. Метод построения расчетной схемы и расчета показателей надежности сложных систем с большим числом элементов. — Изв. вузов. Энергетика, 1978, № 8.
4. Фокин Ю. А., Чан-динь-Лонг. Структурный анализ и методы оценки надежности сложных схем электроснабжения. — Электричество, 1973, № 5.
5. Фокин Ю. А., Чан-динь-Лонг. Оценка надежности электроснабжения узлов нагрузки сложных схем. — Электричество, 1976, № 8.
6. Надежность систем энергетики. Терминология. М.: Наука, 1980, вып. 95.

[26.06.80]

УДК 621.316.1.014.001.24

Расчет токораспределения в электрической сети

ЛЕЖНЮК П. Д., ЯРНЫХ Л. В., кандидаты техн. наук
Винницкий политехнический институт

По известным составляющим токов в ветвях схемы замещения электрической сети могут быть определены напряжения в ее узлах, мощности в начале и конце каждой ветви, а также потери активной и реактивной мощности, имеющие место при транспорте электроэнергии. Если при этом токи в ветвях определены из условий минимума потерь активной мощности в сети, то рассчитанный таким образом режим будет оптимальным.

Так как на все узловые напряжения и мощности генерирующих узлов обычно накладываются ограничения, то в рассчитанном по известному токораспределению режиме некоторые из них могут быть нарушены. В этом случае требуется соответствующая коррекция исходного оптимального токораспределения, процесс расчета становится итерационным. Итерационным он является и потому, что, как правило, состояние сети по потреблению и генерации опреде-