

УДК 621.311.21

И. З. ШАХМАЕВ

О СПОСОБАХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Рассмотрены вопросы формирования режимов работы энергосистем для обеспечения их надежности при возникновении каскадных процессов. Приведен более подробно механизм возникновения каскадных аварий на упрощенном примере расчета развития этого процесса в крупном энергоузле реальной энергосистемы. Предложены формальные признаки условий, необходимых для развития каскадных аварий на основании анализа свойств сети. Обсуждается вопрос применения критерия $N-1$, $N-2$ или более с учетом неоднородности сети на этапе краткосрочного планирования для отстройки режимов от каскадной аварии. *Живучесть; надежность работы энергосистемы; формирование режимов; отказ элемента; каскадный процесс; неоднородность сети; топологические свойства сети; отстройка от каскадной аварии*

Современные электроэнергетические сети должны обеспечивать бесперебойное энергоснабжение промышленности и населения, которое иногда нарушается по тем или иным причинам. К наиболее длительным и тяжелым последствиям могут привести аварии в результате каскадных процессов, при которых происходит последовательное отключение элементов энергосистемы, влекущее за собой отключение одного или нескольких элементов схемы. Для предотвращения этих процессов на стадии формирования режимов работы энергосистем используются математические модели и методы расчетов, позволяющие с необходимой степенью точности определить все необходимые параметры функционирования энергосистем [1].

Одним из наиболее известных способов определения надежности формирующегося режима является статистический метод, позволяющий вычислить вероятный ущерб как функцию вероятности отказа элемента энергосистемы [2]. Такой способ, предполагающий серию расчетов для перебираемых вариантов ремонтных режимов энергосистемы с наложением различных вариантов отказов ее элементов, достаточно трудоемок и сегодня реально может применяться лишь на стадии проектирования сети или рассмотрения долгосрочных проектов. Кроме того, в расчете существенную роль играет правильная оценка вероятности отказа того или иного элемента на основании имеющейся статистики, что также необходимо учитывать при проведении расчетов.

При изменении условий существования ре-

жимов энергосистем изменяется и вероятность возникновения различного типа аварийных ситуаций. В то же время отмечается существенное возрастание вероятности развития особого класса процессов – каскадного типа.

Один из факторов роста аварий, в которых составной частью являются каскадные процессы, связан с тем, что существенно изменяются режимы работы энергосистем. В первую очередь происходит изменение топологии энергосистем, вызывающее усиление неоднородности сети. На изменение неоднородности сети оказывает существенное влияние как в суточном, сезонном, так и в долгосрочном периоде нарушение соотношений генерации и потребления. Изменение этих величин приводит к перераспределению перетоков в сетях. Например, снижение генерации ТЭЦ при менее значительном снижении потребления, что характерно в летнее время, приводит к росту вероятности возникновения каскадных аварий.

Механизм возникновения каскадных процессов можно рассмотреть на упрощенном примере его развития в крупном энергоузле реальной энергосистемы (рис. 1). Для рассмотрения принят летний режим работы энергоузла и исключена работа противоаварийной автоматики.

Исходными для анализа являются следующие условия:

- ТЭЦ несут максимально возможную нагрузку при сниженном сезонном потреблении тепла,
- ГЭС несет максимальную нагрузку,
- превышение длительно допустимых нагрузок на элементах сети приводит к их повреждению.

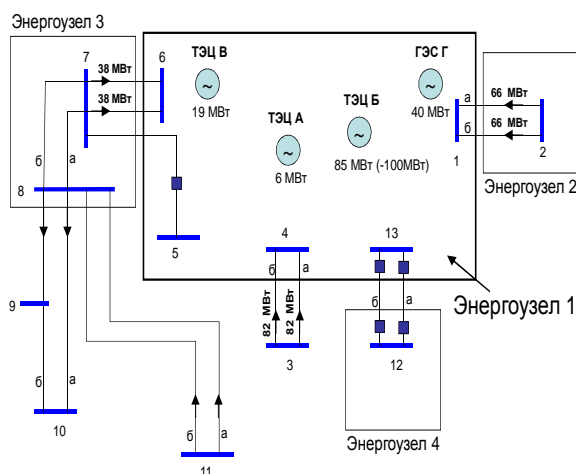


Рис. 1. Схема энергосистемы

На рис. 1 представлен исходный режим энергоузла I после отключения на ТЭЦ Б генерации 100 МВт. После отключения в узле продолжают работать четыре электростанции с суммарной мощностью 150 МВт и при потреблении узла 523 МВт дефицит в энергоузле покрывается за счет перетоков мощности из соседних энергоузлов по шести ВЛ-110 кВ с общей пропускной способностью около 600 МВт.

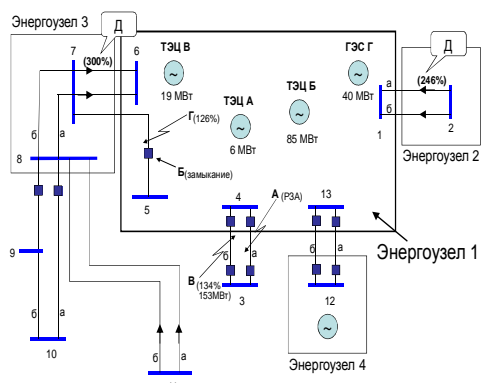


Рис. 2. Схема энергосистемы при нарушении устойчивости напряжению в энергоузле 1

На рис. 2 показан дальнейший ряд отключений, происходящий в результате неравномерной загрузки линий электропередач (ВЛ-110) выше длительно допустимых значений из-за электрической неоднородности энергоузла.

Началом запуска каскадного процесса является отключение по какой-либо внешней причине ВЛ-110 (3–4)а (А на рис. 2). Диспетчерский персонал замыкает транзит (7–5) (Б на рис. 2), но перегруз ВЛ-110 (3–4)б сохраняется выше длительно допустимого, что приводит к ее повреждению с последующим отключением (В на рис. 2). Это приводит к набросу мощности на ВЛ-110 (7–5) так же выше длительно допустимого, приводит к ее повреждению и

отключению (Г на рис. 2).

На рис. 2 приведен результат отключения ВЛ-110 (7–5): оставшиеся четыре питающие узел линии загружены выше длительно-допустимых значений по току (Д на рис. 2), что при невозможности загрузки электростанций и при дефиците времени для организации отключения потребителей, приводит к нарушению статической устойчивости по напряжению.

При определенных условиях при возникновении каскадной аварии в энергоузле I возможно распространение каскадного процесса на дефицитный энергоузел 2 и избыточный энергоузел 3.

Формализовать условия, необходимые для развития каскадных аварий, можно на основании анализа топологических свойств сети «классического» дефицитного узла на рис. 1.

На загрузку сечения S_1 оказывает влияние:

- рост потребления в узле,
- снижение генерации,
- шунтирующие перетоки,
- размыкания связей по условиям снижения токов короткого замыкания или потерь,
- колебания нагрузок в узле и т. д.

Рассмотрению живучести и устойчивости подобных узлов посвящено множество работ [например, 3–5].

Возможность каскадного развития аварии здесь предлагается рассмотреть с позиции неоднородности энергосистемы.

В доаварийном режиме каждому элементу S_{1i} сечения S_1 рис. 3 соответствует «своя» токовая нагрузка:

$$S_{1i} \leftrightarrow I_{1i} < I_{\text{доп}1i};$$

Если в рассматриваемом узле происходит отключение элемента сечения S_1 или генерирующей мощности, элементу S_{1i} сечения S_1 соответствует

$$S_{1i} \leftrightarrow I_{1i} + \Delta I_{1i};$$

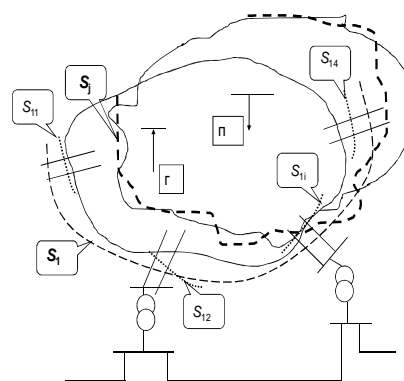


Рис. 3. Схема формирования каскадного сечения

Необходимым условием существования каскадного процесса, если считать, что токовая нагрузка элемента S_i выше допустимой приводит к его разрушению (отключению), является неравенство

$$I_i + \Delta I_i > I_{\text{доп}i}; \quad (1)$$

которое должно выполняться на каждом следующем шаге процесса. Невыполнение неравенства приводит к останову каскадного процесса в данном сечении вне зависимости от развития в узле других энергетических процессов.

Аналогично развивается каскадный процесс для «классического» избыточного узла (рис. 3).

На нагрузку сечения S_1 оказывает влияние:

- снижение потребления в узле,
- рост генерации,
- шунтирующие перетоки,
- размыкания связей по условиям снижения токов короткого замыкания или потерь,
- колебания нагрузок в узле и т. д.

Более общей является ситуация, когда сечение связывает два независимых узла. В этом случае переток мощности по сечению зависит от изменения условий и в дефицитном, и в избыточном узлах. Процесс каскадной аварии для такой схемы развивается также при исполнении условия [1].

В зависимости от свойств топологии данной сети или от возникающих в процессе развития аварии изменений потоков мощности, сечение каскада может сдвигаться («сползает») [6], например, как на рис. 3. Этот процесс может осуществляться при наличии соседних электрически неоднородных областей, с электросвязями, для которых не выполняется условие [1], в то же время набросы мощности на элементы в сечении S_j за первоначальным сечением S_1 как раз удовлетворяют этим условиям.

Тогда необходимым и достаточным условием развития каскадной аварии будет неравенство

$$I_{ji} + \Delta I_{ji} > I_{\text{доп}ji}; \quad (2)$$

которое так же, как и условие [1] должно выполняться на каждом следующем шаге аварийного отключения.

Для отстройки от такого процесса применяется критерий $N-1$ [7], для ряда стран $N-X$ [8], где критерий надежности « $N-X$ » – способность энергосистемы (энергорайона из N элементов) сохранять нагрузку элементов сети в допустимых пределах и устойчивость при потере любых X сетевых элементов или генерирующих источников. Выполнение таких критериев увеличивает эксплуатационные расходы, ухудшая экономику энергорынка, в том числе изменяя

оптимальную нагрузку генерирующих мощностей и увеличивая – в общем случае – потери в сети. В то же время неприменение критерия может привести к погашению энергоузла с известными последствиями.

Учитывая неоднородность сети, можно уменьшить такие расходы, предпринимая конкретные меры по изменению топологии сети, генерации и даже потреблению на этапе краткосрочного планирования. Расчет базовых режимов позволяет смоделировать возможные сценарии развития каскадных аварий на длительные промежутки времени, определяемые незначительным изменением балансов узлов энергосистемы. Это позволит спрогнозировать возможные величины вероятных ущербов, и оценить необходимость и возможность применения конкретных действий по предотвращению каскадных аварий.

Важным моментом при отстройке от каскадной аварии является обеспечение, как минимум, критерия $N-1$ на первом шаге итерации («спусковой крючок» процесса). Для исключения первого шага каскадной аварии необходимо отстраивать режим от превышения допустимых значений пропускной способности элементов. При сильной неоднородности сети необходимо рассматривать увеличение допустимых значений на определенную величину для обеспечения запаса по пропускной способности. При возможности получения большого финансового ущерба в результате каскадной аварии необходимо рассматривать формирование режима работы энергосистемы по критерию $N-2$ или более, и учитывать фактическое техническое состояние оборудования при формировании допустимых значений элементов.

ВЫВОДЫ

Для предотвращения каскадных аварий на этапе краткосрочного планирования необходимо:

- формировать режимы работы энергосистемы так, чтобы не допускать первого шага каскадного процесса. Для этого существенно важным является рассмотрение не балансов узлов, а нагрузки элементов сечений в которых возможно существование каскадных аварий.

- при проектировании энергосистем, а также принятии различных решений, влияющих на функционирование энергосистем и изменяющих неоднородность сети, необходимо учитывать не только возможность развития нарушений различного вида устойчивости, но и возможность развития каскадных аварий.

- для мегаполисов и крупных промышлен-

ных узлов необходимо рассматривать возможность применения для недопущения первого шага каскадного процесса критерия $N-2$, а также учитывать фактическое техническое состояние оборудования при формировании области допустимых значений загрузки элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баринов В. А., Мамиконянц Л. Г., Строев В. А.** Развитие математических моделей и методов для решения задач управления режимами работы и развития энергосистем // *Электричество*. 2005. № 7. С. 8–21.
2. **Китушин В. Г.** Надежность энергетических систем. М: Высшая школа, 1984, 256 с.
3. Проблема обеспечения надежности работы энергосистем // *Мат. конф.: Сб. науч. тр. НИИПТ*, 1981, Л., Энергоиздат, Ленинградск. отделение. С. 3–84.
4. **Баринов В. А., Совалов С. А.** Режимы энергосистем: методы анализа и управления. М.: Энергоатомиздат, 1990. 439 с.
5. **Мисриханов М. Ш., Седунов В. Н., Шунтов**

А. В. Основы резервирования в системах генерации и транспорта электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 2002. 128 с.

6. *Помежуточный отчет УСТЕ. Авария в энергосистеме 4 ноября 2006 г. Бельгия, Брюссель, 2006.* С. 18–39.

7. **Бондаренко А. Ф., Герих В. П.** О трактовке критерия надежности $N-1$ // *Электрические станции*. 2002. № 6. С. 40–43.

8. **Балаков Ю. Н., Мисриханов М. Ш., Шунтов А. В.** Схемы выдачи мощности электростанций. М.: Энергоатомиздат, 2002. 286 с.



ОБ АВТОРЕ

Шахмаев Ильдар Зуфарович, дир. фил. ОАО «СО ЕЭС» Башкирск. РДУ. Дипл. инженер-электрик (Московск. энерг. ин-т, 1982). Иссл. в обл. надежности работы энергосистем.