



PS5 – Poster-19



Алгоритм автоматического распределенного отключения нагрузки для контроля перетоков активной мощности

Д.А. ПАНАСЕЦКИЙ, А.Б. ОСАК, Н.И. ВОРОПАЙ
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
Россия
panasetsky@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Развитие аварии, каскадное отключение линий, противоаварийное управление, мультиагентный подход, координация.

1 ВВЕДЕНИЕ

Предмет исследования

Анализ, выполненный в [1], указывает на то, что в процессе развития большинства системных аварий в Западных энергосистемах можно выделить ряд характерных фаз: предаварийное состояние, инициирующие события, каскадное развитие аварии, конечное состояние и восстановление. В свою очередь, каскадное развитие аварии можно разделить на фазы медленного развития аварии, фазу запускающих событий и фазу быстрого развития аварии, Рис.1.

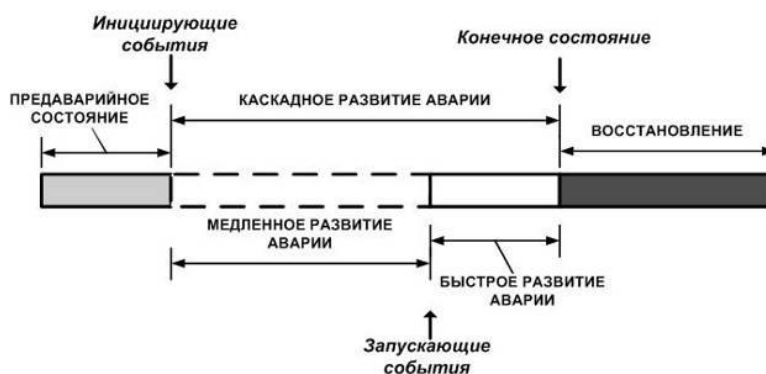


Рис. 1: Характерные фазы развития системной аварии

Критической точкой, после которой остановить переход штатной аварийной ситуации в крупную системную аварию было практически невозможно, являлась фаза возникновения запускающих событий. Иницирующие события либо являлись прямой причиной крупной аварии, либо приводили к ухудшению текущего режима. В качестве иницирующих событий обычно выступали: короткое замыкание, перегрузка оборудования, скрытый отказ систем защиты, потеря генератора и т.д.

Фаза каскадного развития аварии, запускаемая иницирующими событиями, сопровождалась колебаниями мощности и напряжения, что приводило к увеличению тока и снижению напряжения. Возрастание токов и снижение напряжений зачастую воспринимались

системами релейной защиты как повреждения и/или критическая перегрузка, что приводило к каскадному отключению линий и генераторов. Таким образом, *во время фазы медленного развития аварии ЭЭС в течение длительного времени сохраняла баланс между генерацией и потреблением, все процессы протекали достаточно медленно и основной проблемой на данном этапе являлась множественная перегрузка элементов сети.* На данном этапе развития аварии медленная скорость ухудшения ситуации предоставляла системному оператору возможность реализовать оперативные воздействия, которые могли бы предотвратить дальнейшую цепь каскадных событий.

Запускающее событие, как правило, приводит к быстрому каскадному отключению большого количества элементов, нарушению баланса между генерацией и потреблением и, как следствие, к коллапсу системы. В фазе быстрого развития аварии обычно было слишком поздно пытаться остановить развитие системной аварии. В Таблице 1 приведен анализ возникновения различных типов аварийных нарушений для 9 крупных системных аварий в Западных энергообъединениях.

Табл. 1: Возникновение различных типов аварийных нарушений при развитии некоторых системных аварий

Блэкаут, дата, страна	Тип аварийного нарушения			
	Лавина напряжения	Лавина частоты	Множественная перегрузка элементов сети	Потеря синхронизма
9.11.1965, США			X	
19.12.1978, Франция	X		X	
2.07.1996, США	X		X	
07.08.1996, США	X		X	
14.08.2003, Северо-восток США и Канада	X		X	
23.09.2003, Восток Дании и Юг Швеции	X		X	
28.09.2003, Италия		X	X	X
12.07.2004, Афины и Юг Греции	X			
14.03.2005, Юг Австралии				X

Данные, приведенные в Таблице 1 указывают на тот факт, что коллапс напряжений и множественная перегрузка оборудования, ведущая затем к каскадному отключению элементов сети, являлись основными типами аварийных нарушений, возникшими в ходе развития большинства блэкаутов в Западных энергообъединениях. *Таким образом, вероятно, что разработка эффективных мер противодействия лавине напряжения и каскадному отключению элементов сети, в большинстве случаев позволила бы остановить дальнейшее развитие аварийной ситуации.*

Московская системная авария 25 мая 2005 г. [2] показала, что системное проявление проблем устойчивости по напряжению и каскадного отключения линий становится актуальным и для ЕЭС России, поскольку в энергообъединении появляются существенно развитые сложносвязанные региональные электроэнергетические структуры, подобные системе электроснабжения такого мегаполиса, как Москва.

Развитие экономики России в условиях рынка способствует возникновению крупных промышленных и деловых центров, свойства электроэнергетической структуры которых схожи со структурой Западных энергообъединений. Это вызывает необходимость развития алгоритмов противоаварийного управления, призванных бороться с такими явлениями как каскадное отключение элементов сети и лавина напряжения.

Цель и новизна доклада

В настоящее время при реализации централизованного противоаварийного управления (ПАУ) энергообъединение разбивают на районы ПАУ. При этом нормируются перетоки по сечениям и частичным сечениям с учетом необходимых запасов. Обычно границы районов

ПАУ определяются как технологическими особенностями районов, так и возможностями организации надежной и быстро телепередачи необходимой информации о схемах и режимах контролируемой сети. Различные аварийные ситуации приводят к набросам мощности на линии сечения. С целью предотвращения нарушения устойчивости по этим сечениям противоаварийная автоматика производит разгрузку путем отключения нагрузки или путем изменения генерации отправной или приемной частей. Описанный подход в настоящее время успешно применяется при реализации ПАУ ЕЭС России.

Рост электропотребления и последующее сетевое строительство, а также сопутствующая реструктуризация электроэнергетики и переход к рынку оказывают существенное влияние на процесс функционирования энергосистемы. Дальнейшее усложнение структуры сети крупных энергорайонов, вероятнее всего, приведет к необходимости создания в данных районах систем ПАУ, которые будут контролировать не перетоки по отдельным сечениям, а работу всего энергорайона как единого объекта управления. *Создание централизованной системы ПАУ для целей противоаварийного управления крупным энергорайоном со сложной структурой является одним из возможных и эффективных путей решения данной проблемы. В качестве альтернативного пути можно рассматривать создание комплекса ПАУ с частичной децентрализацией алгоритмов управления.*

В настоящее время назрела необходимость создания децентрализованных адаптивных комплексов противоаварийной автоматики, алгоритмы которых смогли бы дополнить существующую идеологию и были способны координировать локальные устройства ПАУ, а также взять на себя реализацию части функций централизованных комплексов.

В статье предлагается алгоритм распределенного (децентрализованного) отключения нагрузки с функцией контроля перетоков активной мощности по элементам энергосистемы при их перегрузке. Алгоритм призван повысить надежность функционирования системы ПАУ путем использования современных информационных технологий, а также за счет повышения интеллектуального уровня быстродействующих устройств локальной автоматики, контролирующей загрузку внутрисистемных связей. Предполагается, что дальнейшая реализация алгоритма позволит предотвратить явление каскадного отключения элементов системы.

Обзор текущего уровня исследования вопроса

Децентрализация автоматики отключения нагрузки сама по себе не является новой идеей. В течение длительного времени в энергосистемах применяются различные виды локальной автоматики отключения нагрузки – АЧР, АОСН, АОПО и т.д. Однако данные автоматики, в большинстве случаев, работают на основании локальной информации о состоянии режима (частота, напряжение, ток и т.д.). В ряде случаев данные локальные автоматики могут работать по более сложному алгоритму, получая информацию с соседних подстанций по каналам связи, однако такой подход является скорее исключением, нежели правилом. В то же время, уровень развития информационных технологий и средств реализации автоматики позволяет повысить интеллектуальный уровень локальных устройств как за счет усложнения алгоритмов работы, так и за счет использования возможностей передачи данных между устройствами по информационным каналам связи. Основными целями повышения интеллектуального уровня локальной автоматики является, во-первых, повышение ее адаптивности, а во-вторых, минимизация управляющих воздействий (прежде всего, в виде отключения нагрузки и генерации). Таким образом, в отличие от классического подхода к реализации локальной автоматики ПАУ мы ведем речь о распределенных адаптивных системах ПАУ, так называемых, *мультиагентных системах*, которые, на наш взгляд, представляют собой нечто среднее между локальной и централизованной ПАА.

Разработка программного обеспечения для целей проверки работоспособности того или иного алгоритма распределенного адаптивного ПАУ (*мультиагентного алгоритма*) сама по себе является принципиально новой задачей. В данной статье мы не будем останавливаться на вопросах программной реализации, а дадим лишь общее описание алгоритма.

В настоящее время существует ряд работ, авторы которых, в том или ином виде, использовали мультиагентный подход для целей управления ЭЭС. В [3] мультиагентный подход был использован для создания агентов, работающих в соответствии с некоторой

системой правил. Данная система правил позволяла управлять режимом энергосистемы. Особо следует отметить работу [4], которая посвящена использованию мультиагентного подхода для борьбы с явлением каскадного отключения линий. Авторы используют мультиагентную парадигму для упрощения задачи контроля перетоков мощности путем разбиения ее на менее сложные, незначительно зависящие друг от друга подзадачи, которые могут быть решены независимо. Такой подход уменьшает сложность решаемой задачи, однако, в редких случаях отсутствие координации общего решения приводит к ухудшению ситуации.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В основной части доклада приводится описание предлагаемого алгоритма автоматического распределенного отключения нагрузки для контроля перетоков активной мощности.

Сущность алгоритма раскрыта на примере энергосистемы, схема которой приведена на Рис. 2.

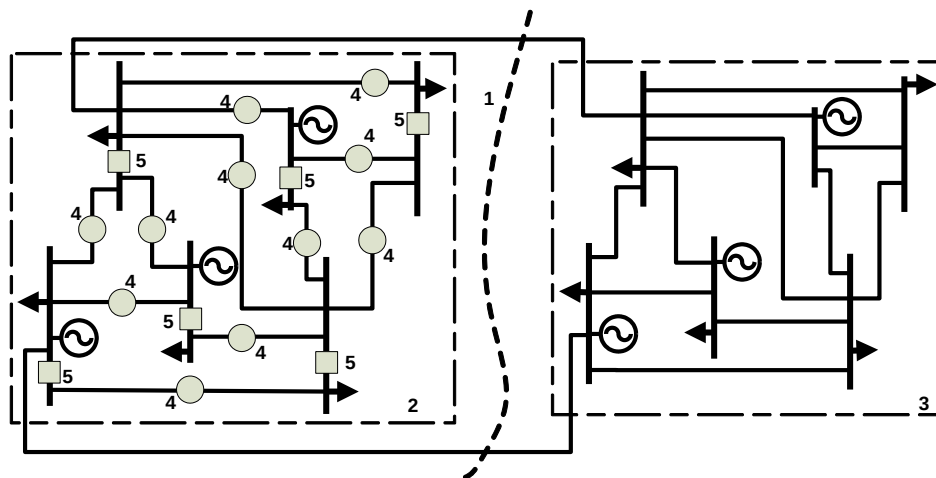


Рис. 2: Схема, на примере которой раскрывается суть предлагаемого алгоритма.

Перетоки мощности по межсистемному сечению 1 могут контролироваться с использованием известных методик. Однако с помощью известных методик сложно осуществить контроль загрузки элементов внутри подсистемы 2 и подсистемы 3. В данном конкретном случае предлагаемый алгоритм может быть направлен на решение задачи контроля загрузки элементов в подсистеме 2. Условия осуществления алгоритма включают следующий предварительный набор действий:

1. Создание компьютерной модели любого характерного режима рассматриваемой энергосистемы. Например, модель режима зимнего максимума нагрузок. Разработанная модель используется для расчета коэффициентов влияния для различных послеаварийных режимов (одиночные и двойные отключения связей, отключения генераторов и т.п.). Коэффициент влияния определяется как отношение изменения перетока активной мощности по некоторой линии при изменении нагрузки в некотором узле. Например, коэффициент влияния нагрузки в узле i на переток по некоторой линии j определится как:

$$k_{ij} = \frac{\Delta P_{line j}}{\Delta P_{load i}}$$

где $\Delta P_{line j}$ - изменение перетока по j -ой линии и соответствующее ему изменение нагрузки $\Delta P_{load i}$ в i -ом узле. Коэффициенты влияния слабо зависят от режима энергосистемы и остаются практически неизменными для заданной топологии системы. Если $k_{ij} > 0$, то отключение нагрузки в узле i приведет к снижению перетока по связи j ,

и наоборот, если $k_{ij} < 0$, то отключение нагрузки в узле i приведет к увеличению перетока по связи j .

2. Создание единой базы данных энергосистемы, содержащей информацию о коэффициентах влияния для каждой линии для различных типов аварийных возмущений. База данных также должна содержать информацию о максимально допустимых перетоках активной мощности для всех связей, входящих в подсистему.
3. На основании разработанной базы данных, путем анализа величин коэффициентов влияния, рассматриваемая энергосистема должна быть разбита на совокупность контролируемых и неконтролируемых подсистем, оказывающих минимальное взаимное влияние. Контролируемые подсистемы – это подсистемы, в которых будет реализовываться предлагаемый способ отключения нагрузки.
4. На основании принятого разбиения для каждой из подсистем формируется индивидуальная база данных коэффициентов чувствительности и максимально допустимых перетоков активной мощности.
5. Все линии и узлы нагрузки каждой из контролируемых подсистем, участвующие в работе автоматики, основанной на предлагаемом алгоритме, должны быть оснащены агентами. Агенты связей (4) и агенты нагрузки (5) – это интеллектуальные электронные устройства, каждое из которых имеет уникальный идентификационный номер (адрес агента). Используя единое информационное пространство, агенты способны передавать друг другу информационные сообщения.
6. Внутри каждой контролируемой подсистемы должна быть реализована информационная система, которая способна организовать передачу сообщений между агентами. Любой агент линии в любой момент времени должен получать информацию о текущей топологии сети, которая содержит информацию о факте отключения элемента в подсистеме. Кроме того, агент связи с определенной периодичностью, зависящей от уровня критической загрузки каналов связи, должен получать информацию о текущем состоянии узлов нагрузки, которые оказывают наибольшее влияние на загрузку связи, контролируемой данным агентом. Информация о текущем состоянии узлов нагрузки должна включать сведения о текущем количестве работающих присоединений, о загрузке данных присоединений, а также о цене, которую необходимо будет заплатить в случае отключения каждого из присоединений.
7. Все агенты связей в каждой из контролируемых подсистем получают соответствующую базу данных коэффициентов чувствительности и предельно допустимых перетоков активной мощности по связям контролируемой подсистемы.

Предлагаемый алгоритм ПАУ включает в себя следующую совокупность действий (пунктов), выполняемых циклически:

1. Исходя из информации о текущей топологии сети, агенты всех перегруженных связей выбирают соответствующую таблицу коэффициентов влияния. На основании таблицы коэффициентов влияния и информации о текущем состоянии узлов нагрузки, оказывающих существенное влияние на загрузку перегруженной связи, выполняется предварительный расчет оптимального объема отключаемой нагрузки. Для каждой j – ой перегруженной связи данный расчет заключается в решении следующей линейной задачи оптимизации:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in B \wedge k_{ij} \geq \alpha} C_i \Delta P_i \\ P_j^{\max} - P_j^{\text{current}} + \sum_{i \in B \wedge k_{ij} \geq \alpha} k_{ij} \Delta P_i & \geq 0 \\ \forall i \in B \text{ таких, что } k_{ij} & \geq \alpha \\ 0 \leq \Delta P_i & \leq P_i^{\text{current}} \end{aligned}$$

где B - множество узлов нагрузки в подсистеме, участвующих в работе автоматики; C_i и ΔP_i - соответственно стоимость и объем отключения i – ой нагрузки; $P_j^{\max}$ и

- $P_j^{current}$ - соответственно максимально допустимый и текущий переток активной мощности по j – ой перегруженной связи; k_{ij} - коэффициент влияния, определяющий величину воздействия изменения i – ой нагрузки на переток по j – ой связи; α - минимально допустимое значение коэффициента влияния, $\alpha \geq 0$; $P_i^{current}$ - текущее значение величины i – ой нагрузки. В результате решения задачи оптимизации должен быть получен вектор управляющих воздействий (УВ), содержащий оптимальный объем отключения для узлов нагрузки в контролируемой подсистеме. Если задача оптимизации не имеет решения, работа алгоритма завершается.
2. Каждый агент перегруженной связи на основании текущего вектора УВ формирует список уникальных связей с отрицательными коэффициентами влияния. Формирование данного списка происходит следующим образом – если отключение нагрузки в некотором узле $n \in \Gamma$ приводит к увеличению перетока по некоторой связи $m \in L$ (здесь Γ - множество узлов нагрузки, входящих в текущий вектор УВ; L - множество контролируемых связей в подсистеме), то данная связь должна быть единожды включена в список уникальных связей с отрицательными коэффициентами влияния.
 3. Агент перегруженной связи запрашивает информацию о текущем перетоке активной мощности по связям, входящим в список уникальных связей с отрицательными коэффициентами влияния. Обычно данный список содержит не слишком большое количество связей, так как, как правило, отключение нагрузки приводит к снижению загрузки большинства элементов в контролируемой подсистеме.
 4. После получения информации о текущих перетоках активной мощности по связям из списка уникальных связей с отрицательными коэффициентами влияния, агент каждой j -ой перегруженной связи выполняет повторный расчет оптимального объема отключаемой нагрузки. При этом учитывается воздействие отключения нагрузки на связи с отрицательными коэффициентами влияния:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in B \wedge k_{ij} \geq \alpha} C_i \Delta P_i \\ P_j^{\max} - P_j^{current} + \sum_{i \in B \wedge k_{ij} \geq \alpha} k_{ij} \Delta P_i & \geq 0 \\ \forall i \in B \text{ таких, что } k_{ij} & \geq \alpha \\ 0 \leq \Delta P_i & \leq P_i^{current} \\ \forall n \in \Gamma \wedge \forall m \in T \text{ таких, что } k_{nm} & \leq -\beta \\ \text{если } P_m^{current} > P_m^{\max}, \text{ то } \Delta P_n & = 0, \\ \text{иначе } P_m^{\max} - P_m^{current} + \sum_{n \in \Gamma \wedge k_{nm} \leq -\beta} k_{nm} \Delta P_n & \geq 0 \end{aligned}$$

где B - множество узлов нагрузки в подсистеме, участвующих в работе автоматики; Γ - множество узлов нагрузки входящих в текущий вектор УВ, $\Gamma \subset B$; T - множество связей, входящих в список уникальных связей; C_i и ΔP_i - соответственно стоимость и объем отключения i – ой нагрузки; $P_j^{\max}$ и $P_j^{current}$ - соответственно максимально допустимый и текущий переток активной мощности по j – ой перегруженной связи; $P_m^{\max}$ и $P_m^{current}$ - соответственно максимально допустимый и текущий переток активной мощности по m – ой связи, $m \in T$; k_{ij} - коэффициент влияния, определяющий величину воздействия изменения i – ой нагрузки на переток по j – ой связи; α и β - минимально допустимые значения коэффициентов влияния, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$; $P_i^{current}$ - текущее значение величины i – ой нагрузки. В результате решения задачи оптимизации должен быть получен вектор управляющих воздействий (УВ), содержащий оптимальный объем отключения нагрузки в контролируемой

подсистеме с учетом воздействия на связи с отрицательными коэффициентами влияния. Элементы вектора управляющих воздействий (УВ), полученные в результате решения задачи оптимизации, округляются, исходя из предварительно полученной информации о загрузке присоединений нагрузочных узлов.

5. Для каждого элемента из вектора УВ формируется список связей, которые ранее не входили в список уникальных связей с отрицательными коэффициентами влияния. Список связей, которые ранее не входили в список уникальных связей с отрицательными коэффициентами формируется следующим образом. Если отключение нагрузки в некотором узле $i \in B$, входящим в вектор УВ, приводит к увеличению перетока по некоторой связи $m \in L$ (здесь L - множество контролируемых связей в подсистеме) и если связь m ранее не входила в список уникальных связей с отрицательными коэффициентами влияния, то данная связь должна быть включена в список связей с отрицательными коэффициентами влияния. Если сформированный таким образом список связей оказался пуст, то выполняется переход к шагу 6, иначе выполняется переход к шагу 2.
6. Каждый элемент вектора УВ, полученного на шаге 5, включается в информационное сообщение-запрос и передается соответствующему агенту нагрузки. Агент нагрузки обрабатывает запросы, поступающие от агентов связей, и реализуют запрашиваемые УВ. Если агент нагрузки не в состоянии выполнить отключение запрашиваемого присоединения, либо если объем нагрузки на присоединении существенно меньше запрашиваемого, то он отправляет агенту связи информационное сообщение о невозможности выполнения отключения запрашиваемого присоединения. Данное сообщение должно содержать информацию о текущем состоянии агента нагрузки: количество присоединений, находящихся в работе, а также объем нагрузки на каждом присоединении. Если агенту нагрузки удастся реализовать запрашиваемое УВ, то он отправляет агенту связи сообщение об успешной реализации запрашиваемого УВ.
7. Если после реализации УВ переток активной мощности хотя бы по одной из контролируемых связей в подсистеме превышает предельно допустимый, то, учитывая данные изменения, переходим к шагу 1. В противном случае заканчиваем выполнение алгоритма.

На любом шаге алгоритма агент связи завершает выполнение алгоритма при условии, что переток активной мощности по связи, контролируемой данным агентом, меньше предельно допустимого. На любом шаге алгоритма работоспособный агент связи должен отвечать на запросы других агентов связи о текущем перетоке активной мощности по связи, контролируемой данным агентом.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен алгоритм, который может быть использован для создания распределенной автоматической системы, выполняющей функции отключения нагрузки потребителей для целей снижения перетоков активной мощности по элементам энергосистемы при их перегрузке. При этом сложная сеть энергообъединения должна быть разбита на подсистемы, оказывающие минимальное взаимное влияние. Автоматика каждой подсистемы контролирует текущий режим в подсистеме и предотвращает критическую перегрузку элементов путем выдачи управляющих воздействий (УВ) на отключение нагрузки потребителей.

Предлагаемый алгоритм обладает высокой адаптивностью и использует для своей работы локальную информацию о состоянии режима и минимальный объем информации, получаемый от близлежащих устройств измерения. Минимизация объема информации для управления загрузкой элементов сети позволит повысить надежность системы ПАУ, так как, например, при выходе из строя каналов связи, передающих информацию в централизованный комплекс ПАУ, автоматика, работающая в соответствии с предложенным алгоритмом, останется в работе. Кроме того, предлагаемый алгоритм реализует оптимальные или субоптимальные УВ, что позволит минимизировать объем отключаемой нагрузки.

Отметим, что возможная реализация предлагаемого алгоритма не призывает к отказу от существующей системы централизованного ПАУ, эффективность которой была проверена временем. Предлагаемый способ автоматического распределенного отключения нагрузки призван повысить интеллектуальный уровень быстродействующих устройств локальной автоматики, контролирующей загрузку внутрисистемных связей. Локальные же устройства ПАУ всегда работали совместно с централизованными комплексами. Таким образом, возможное внедрение предлагаемого алгоритма направлено на повышение уровня надежности системы ПАУ в целом.

Дальнейшая работа направлена на разработку программного обеспечения для целей проверки работоспособности предложенного алгоритма распределенного адаптивного ПАУ

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lu W., Besanger Y., Zama E / Blackouts: Description, Analysis and Classification // Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems (22-24 September 2006).
- [2] Коган Ф.Л. О причинах развития известной аварии в Московской энергосистеме // Электричество. 2008. №5.
- [3] L. Z. Varga, N. R. Jennings, D. Cockburn / Integrating intelligent systems into a cooperating community for electricity distribution management // Int. Journal of Expert Systems with Applications. 1994. № 7.
- [4] P. Hines, S. Talukdar / Controlling cascading failures with cooperative autonomous agents // In International Journal of Critical Infrastructures. 2007. Volume 5.