



**Авторы:**

**к.т.н. М.И. Успенский,  
С.О. Смирнов,**

ИСЭиЭПС КНЦ УрО

РАН, Сыктывкар, Россия

M.I. Uspensky,

S.O. Smirnov

ISE&EPN KSC UD RAS,

Syktывkar, Russia

# ЗАЩИТА ОТ КРУПНЫХ АВАРИЙ В ЭЭС: УПРАВЛЯЕМОЕ ДЕЛЕНИЕ

## PROTECTION FROM LARGE-SCALE FAILURES IN POWER SYSTEMS: CONTROLLED SEPARATION

Аннотация: рассмотрены требования к управляемому делению электроэнергетических систем с целью предотвращения крупных аварий с возможным погашением; показаны существующие подходы к его реализации.

**Ключевые слова:**

предотвращение погашения, противоаварийная автоматика, управляемое деление, оценка динамической надёжности в реальном времени

Requirements to controlled separation of power systems for the purpose of prevention of major emergencies with possible blackout are considered; existing approaches to its realization are shown.

**Keywords:** blackout

prevention, emergency

control, controlled

separation, on-line dynamic

security assessment

Как отмечено в предыдущей статье [1], существующий высокий уровень развития релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА) не исключает вероятности возникновения крупных аварий в электроэнергетических системах (ЭЭС). Большинство масштабных погашений за последние полвека возникли по следующим причинам [2]: потеря динамической устойчивости (короткие замыкания, отключение сильно нагруженной линии), потеря статической устойчивости (лавина напряжения), массовое отключение оборудования при асинхронном режиме, массовое отключение генераторов из-за перегрузок при лавине напряжения, отключение нескольких линий (ошибочная реакция РЗ на снижение напряжения, провисание проводов), массовое отключение теплового оборудования электростанций при снижении частоты. Как правило, эти процессы приводили к развалу ЭЭС на несбалансированные по мощности части вследствие некорректных срабатываний локальных устройств РЗ и ПА. Современное развитие информационных и аппаратостроительных технологий даёт возможность поиска подходов к совершенствованию существующих способов противоаварийного управления с целью повышения живучести ЭЭС. Одним из таких способов является деление системы.

Деление энергосистемы (ДС) относится к средствам противоаварийного управления с воздействием коммутационного типа и осуществляется во время переходного процесса. Насколько известно, впервые ДС в СССР было применено на Волжской ГЭС, когда она соединила два энергообъединения [3]. Появилась необходимость передачи мощности в несвязанные друг с другом узлы. Опыт применения ДС оказался весьма успешным при повреждениях и перегрузке отходящих меж-

системных линий, так как размещение секционных выключателей 500 кВ на ГЭС приблизительно соответствовало балансу мощностей. Однако обеспечение надежного разделения генераторов требовало усложнения и удорожания схемы электрических соединений электростанций, что помешало дальнейшему развитию ДС. По цели различаются три вида деления: для предотвращения нарушения устойчивости (упреждающее), для прекращения асинхронного хода (автоматика ликвидации асинхронного режима), для предотвращения потери собственных нужд электрических станций при недопустимом снижении частоты в энергосистеме в результате развития аварии (частотная делительная автоматика) [4]. Упреждающее деление осуществляется по факту возникновения опасного аварийного возмущения или при существенном изменении параметров режима и имеет следующие преимущества: предотвращает асинхронный ход, повышает эффективность использования отключения генераторов и нагрузки. Такое деление получило сравнительно редкое применение вследствие сложности и снижения надежности его реализации с ростом контролируемых выключателей. На практике получили широкое развитие второй и третий вид ДС, реализуемые локальными устройствами. Однако при скоординированном воздействии на определённые выключатели с учётом дополнительных условий упреждающее деление может привести к существенному системному эффекту. Осуществляемое таким образом деление за рубежом получило название управляемого (controlled separation, islanding, partitioning; operated division и т.п.). Моделирование крупного погашения, произошедшего 14 августа 2003 года в США и Канаде, показало, что своевременно проведённое управляемое деление позволяло быстро ограничить развитие аварии и обеспечивало существенное снижение перетоков активной мощности в перегруженных сечениях, улучшение уровня напряжения и угловых характеристик генераторов

в образующихся изолированных подсистемах (островах) [5]. Эти преимущества создают хорошую основу для последующего быстрого восстановления нормального режима работы ЭЭС и минимизации ущерба от аварии. Успешное управляемого деления зависит от корректного определения: где и когда делить. Практическая реализация метода управляемого деления связана с решением целого ряда дополнительных вопросов. Ниже рассматриваются требования для их решения, а также существующие подходы к ним.

**Определение момента начала деления (когда).** Результат управляемого деления во многом зависит от времени его осуществления. Наиболее эффективно деление практически сразу (доли секунды) после возникновения триггерного события [1, 6]. Чем больше времени проходит после такого события до запуска деления, тем большее развитие получит авария, и как следствие, будет потеряно больше мощности. Определение момента деления в реальном времени представляет собой достаточно сложную задачу вследствие непредсказуемости и разнообразия возможных аварийных возмущений в крупной ЭЭС. Для решения задачи могут быть использованы активно развивающиеся методы оценки динамической надёжности (dynamic security assessment) [7, 8]. Традиционный подход к такой оценке заключается в проведении циклического моделирования переходного процесса путём решения множества дифференциальных уравнений. Большой набор возможных непредвиденных обстоятельств и параметров модели ЭЭС существенно увеличивает время получения оценки, что неприемлемо для целей управляемого деления. Системы на базе искусственного интеллекта и интеллектуального анализа данных имеют следующие преимущества перед традиционными: скорость выработки оценки (доли секунды), обучаемость, обнаружение в системе ранее неизвестных характеристик и отношений. В качестве пороговых значений при принятии решения о делении в реальном времени могут быть использованы параметры (например, фазные углы

напряжений) приводящего к развалу системы на части переходного процесса. Полученная в результате моделирования база знаний может быть дополнена информацией о крупных авариях, произошедших в системе ранее, и использована для обучения деревьев принятия решений или искусственных нейронных сетей. Использование данных инструментов искусственного интеллекта совместно с синхронизированными векторными измерителями (Synchronized Phasor Measurement Units, PMU) позволит в режиме реального времени автоматически принимать решение о запуске управляемого деления

**Поиск сечения деления (где).** В сложной ЭЭС всегда существует множество вариантов деления – сечений. Выбор среди них лучшего является достаточно сложной многофакторной задачей. В общем случае сечение представляет собой набор ряда линий электропередачи. Так для ЭЭС с  $n$  лини-

которые будут демонстрировать сходные колебания при возникновении крупных возмущений, основанные на параметрах предаварийного режима [13]. Такие генераторы можно назвать когерентными, и они могут быть сгруппированы. Причём связи между группами будут слабыми. На рис. 1 показаны углы роторов генераторов 118 узловых тестовой схемы IEEE при устранении трёхфазного короткого замыкания отключением линии через 0,17 с без действия ПА (а) и при осуществлении через 0,57 с управляемого деления (б) [14]. Таким образом, для обеспечения динамической устойчивости образующихся островов необходимо включать в один остров генераторы одной когерентной группы. Необходимо также учитывать, что одновременное отключение линий, передающих значительную мощность, приводит к возникновению переходных процессов из-за резкого перераспределения потоков мощности.

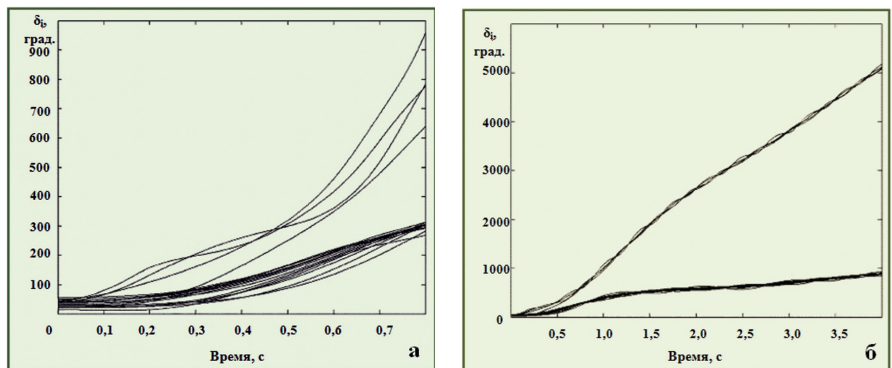


Рис. 1 Динамика движения генераторов без действия ПА (а) и при успешном управляемом делении (б)

ями теоретическое количество возможных вариантов деления составляет  $2^n$ . Но поскольку результат поиска должен обеспечить выполнение ряда ограничений, то количество допустимых вариантов существенно снижается. К таким ограничениям относятся:

**Динамическая устойчивость.** Очевидно, что все генераторы в пределах острова должны быть синхронны. Реакция генераторов ЭЭС на крупные возмущения различна и зависит от их динамических характеристик и структурных особенностей системы. Существует ряд подходов к определению генераторов,

**Обеспечение допустимых уровней частоты и напряжения.** В каждом образующемся острове основные режимные параметры: частота и напряжение, должны находиться в заданных пределах. Для этого следует свести к минимуму дисбаланс «генерация-потребление» по активной и реактивной мощности. В противном случае развал островов на меньшие части, и их последующее погашение может продолжиться. Для учёта этого требования при поиске оптимального сечения, как правило, используется граф ЭЭС: вершинами являются узлы, а рёбрами – линии и трансформаторы. В ряде подходов на-



правление ребер и вес графа соответствуют абсолютному значению и направлению перетока активной мощности [9]; в других используется ненаправленный граф, где вес вершины представляет собой разность генерации и потребления активной мощности в узле [10]. В работе [11] рёбра графа имеют два значения весов – величины активного и реактивного перетоков, что отличает этот подход от других, предоставляющих решение проблемы обеспечения баланса реактивной мощности автоматическим локальным устройствам ее компенсации. Для повышения вычислительной эффективности поиска сечения, приемлемого с точки зрения обеспечения баланса мощности острова, исходный граф сокращают, применяя: эквивалентирование параллельных линий, удаление нагрузочных тупиковых узлов (узлы первой степени), транзитных узлов без нагрузки (узлы второй степени), исключение повышающих трансформаторов, замещение тупиковых «колец» одним узлом [9]. С помощью библиотек, реализующих многоуровневые методы разбиения графа, разделение системы с 22000 узлами (даже без сокращения графа) обеспечивается за время, меньшее секунды [11]. Однако для больших графов (более 5000 узлов и ветвей) расчёт может выдать больше желаемого количества островов [9]. Это приводит к необходимости дополнительных вычислений по их объединению. Использование упорядоченных бинарных разрешающих диаграмм (Ordered Binary Decision Diagrams, OBDD) [10], угловой модуляции метода роя частиц (Angle Modulated Particle Swarm Optimization, AMPSO) [12] также позволяет существенно ускорить поиск минимального сечения в крупной ЭЭС. Общим недостатком данных методов является ввод поправочных коэффициентов, определяемых в значительной степени результатами экспертных оценок. Несмотря на существование ряда эффективных подходов к поиску сечения с наименьшим суммарным перетоком мощности (минимальное сечение) вопрос о выборе лучшего из них является открытым. Сравнение нескольких алгоритмов применительно к определенной ЭЭС, насколько нам известно, не проводилось. Стоит отметить, что практически все упо-

мянутые здесь способы поиска минимального сечения предлагаются к реализации вне реального времени до аварии.

**Допустимость послеаварийных режимов по загрузке оборудования.** В образовавшихся островах необходимо обеспечить соблюдение пределов по статической устойчивости. Возможная перегрузка оборудования (по пропускной способности линий, загрузке трансформаторов, по условиям теплового нагрева) приведет к его отключению и дальнейшему развитию аварии. Таким образом, необходимо оценить приемлемость послеаварийного режима в каждом острове для проверки предлагаемой схемы деления.

**Минимизация количества образуемых островов и коммутлируемых элементов.** Еще одним критерием выбора приемлемого сечения (сечений) деления является количество образующихся островов. Снижение количества островов упрощает как процесс управляемого деления, так и последующее восстановление нормального режима работы

в процесс деления, тем выше вероятность возникновения отказов их работы. Отказ выключателя при делении резервируется в соответствии с общими принципами резервирования таких событий.

Поиск сечения деления, определяемый балансом мощностей в той или иной форме и подтверждаемый выполнением остальных перечисленных условий, представляет собой задачу оптимизации. Результаты её решения, как отмечалось выше, необходимы в течение первой секунды протекания аварии. Возникает вопрос приемлемого соотношения скорости расчета и его точности. В этой связи поиск сечения деления, по-видимому, следует осуществлять вне реального времени, уделяя при этом максимальное внимание точности результата. Неправильно выбранное сечение деления может привести к снижению эффекта от его проведения или даже к развитию аварии. Примерная структура системы управляемого деления приведена на рис. 2

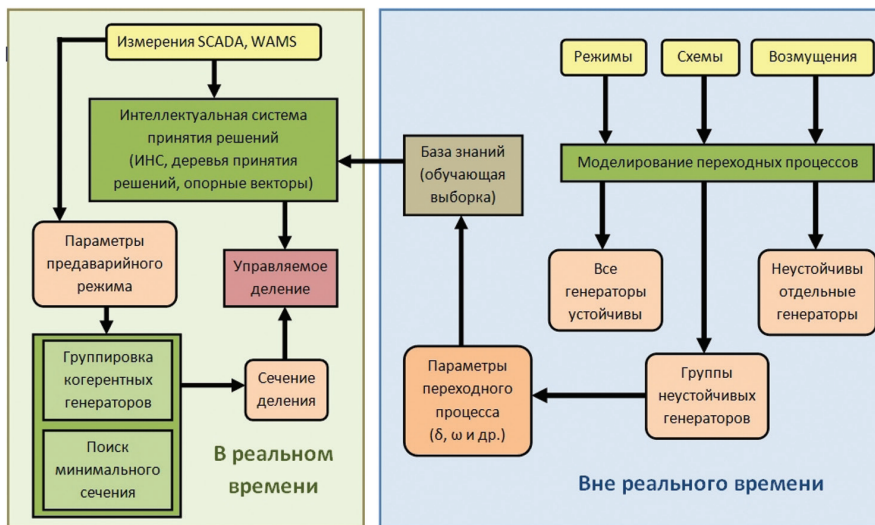


Рис. 2. Примерная структура системы управляемого деления

энергосистемы. В целях минимизации потерянных перетоков мощности следует отдавать предпочтение вариантам деления, предполагающим отключение меньшего количества линий. Кроме того необходимо стремиться к уменьшению количества коммутлируемых выключателей. Чем больше выключателей вовлека-

**Дополнительные вопросы. Форма реализации.** Скоротечность развития серьезной аварии (зачастую секунды) не оставляет диспетчеру времени на экспертное рассмотрение различных вариантов. Кроме того существует вероятность принятия человеком ошибочного решения в условиях стрессовой



**Успенский Михаил Игоревич,**

родился 09.04.1943. В 1971 г. окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института с квалификацией инженер-электрик. В 1984 г. там же защитил кандидатскую диссертацию на тему «Защита генератора от внутренних коротких замыканий на базе микроЭВМ». Работал в Пермском наладочном участке Свердловского ПНУ, на Согринской ТЭЦ «Алтайэнерго», доцентом кафедры «Электрификация и автоматизация с/х» СЛИ – филиала ГОУ ВПО «СПбГЛТА им. С. М. Кирова». В настоящее время ведущий научный сотрудник ИСЭнЭПС КНЦ УрО РАН.



**Смирнов Сергей Олегович,**

родился 26.10.1985. Окончил в 2008 г. Сыктывкарский лесной институт – филиал ГОУ ВПО «Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова» по кафедре «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства». Аспирант ИСЭнЭПС КНЦ УрО РАН.

ситуации. Всё это указывает на необходимость проектирования автоматической схемы. В этой связи алгоритм управляемого деления может быть реализован в рамках управляющего вычислительного программно-аппаратного комплекса централизованной системы противоаварийного управления (ЦСПА), располагающегося в диспетчерском центре. При достаточной обеспеченности коммутационной аппаратуры телеуправлением физические устройства деления не требуются. В противном случае такие устройства должны быть установлены в заранее определённых местах. Тогда для предотвращения погашения часть устройств должна срабатывать одновременно, остальные блокироваться [15]. Однако традиционно используемые устройства защиты от асинхронного режима не адаптированы для координации на системном уровне, что требует разработки специальных локальных устройств деления. Кроме того серьёзное внимание следует уделить вопросам координации работы системы управляемого деления с установленными в ЭЭС локальными устройствами РЗ и ПА.

**Быстродействие.** Стремительный характер развития каскадных аварий предъявляет особые требования к времени управляющего воздействия. Скорость осуществления деления во многом зависит от коммутационной аппаратуры и устройств связи. Различное быстродействие выключателей обуславливается их типом и техническим состоянием. Кроме того для обеспечения возможности управляемого деления в режиме реального времени существует настоятельная необходимость в улучшении инфраструктуры ЭЭС (массовое применение синхронных векторных измерителей, широкополосных телекоммуникаций).

**Учёт перенапряжений при коммутации.** В ЭЭС с длинными линиями для коммутационных режимов должны быть определены и приняты меры против возникновения перенапряжений и самовозбуждения слабо нагруженных генераторов правильным выбором реактивных компенсирующих устройств и отпаек трансформаторов.

### Заключение

Управляемое деление является перспективным методом защиты ЭЭС от крупных аварий, приводящих к погашению. Разработка управляемого деления стала возможной с привлечением информационных технологий и появлением интеллектуальных сетей (smart grid). Данному виду противоаварийного управления уделяется большое внимание за рубежом. Однако для возможности его практической реализации необхо-

димо дальнейшее совершенствование подходов к определению времени и места деления. Кроме того требуют решения вопросы координации с уже установленными в системе устройствами РЗ и ПА. Существенна проблема обеспечения управляемого деления необходимым объёмом быстродействующих измерений и средств дистанционного управления. И, конечно же, очень важны не затронутые здесь вопросы надёжности функционирования такой защиты, охватывающей практически все системообразующие элементы ЭЭС. Тем не менее, управляемое деление имеет серьёзный потенциал для проектирования системы автоматического восстановления ЭЭС, практически незаметного для потребителя.

### Литература:

1. Успенский М. И., Смирнов С. О. Крупные аварии в ЭЭС: причины и меры противодействия им // Релейная защита и автоматизация. 2011, №01(02). – С.32-34.
2. Barkans J., Zalostiba D. Protection against Blackouts and Self-Restoration of Power Systems. – Riga: RTU Publishing House. 2009. – 142 p.
3. Иофьев Б. И. Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистем. – М.: Энергия, 1974. – 416 с.
4. Кощеев Л. А. Автоматическое противоаварийное управление в электроэнергетических системах. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 140 с.
5. Yang B., Vittal V., Heydt G. T. Slow-coherency-based controlled islanding – a demonstration of the approach on the august 14, 2003 Blackout Scenario // IEEE Trans. on PS. 2006. Vol. 21. №4. – P.1840-1847.
6. Воропай Н. И., Ефимов Д. Н., Решетов В. И. Анализ механизмов развития системных аварий в электроэнергетических системах // Электричество. – 2008. №10. – С.12-24.
7. Review of on-line dynamic security assessment tools and techniques. – CIGRE, 2007. – 272 p.
8. Шумилова Г. П., Готман Н. Э., Старцева Т. Б. Оценивание границы динамической надёжности электроэнергетической системы // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2010, №1. – С.80-86.
9. Xu G., Vittal V. Slow coherency based cutest determination algorithm for large power systems // IEEE Trans. on PS. 2010. Vol. 25. №2. – P.877-884.
10. Sun K., Hur K., Zhang P. A new unified scheme for controlled power system separation using synchronized phasor measurements // IEEE Trans. on PS. [Early Access]. – 2011.
11. Li J., Liu C. C., Schneider K. P. Controlled partitioning of a power network considering real and reactive power balance // IEEE Trans. on Smart Grid. – 2010. Vol. 1. №3. – P.261-269.
12. Liu L., Liu W., Cartes D. A., Chung I. Y. Slow coherency and angle modulated particle swarm optimization based islanding of large-scale power systems // Advanced Engineering Informatics. – 2009. Vol. 23. №1. – P.45-56.
13. Абраменкова Н. А., Воропай Н. И., Заславская Т. Б. Структурный анализ электроэнергетических систем (в задачах моделирования и синтеза). – Новосибирск: Наука, 1990. – 224 с.
14. Sun K., Zheng D. Z., Lu Q. A Simulation Study of OBDD-Based Proper Splitting Strategies for Power Systems Under Consideration of Transient Stability // IEEE Trans. on PS. 2005. Vol. 20. №1. – P.389-399.
15. Adibi M. M., Kafka R. J., Maram S., Mili L. M. On power system controlled separation // IEEE Trans. on PS. 2006. Vol. 21. № 4. – P.1894-1902.