



PS2 – S8-01



Динамические сети и надежность защиты систем электропередачи

К.О. ХАЙДЕ, Р. КРЕБС
Siemens AG
Germany
chris.heyde@siemens.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Системные аварии (блэкаут), предотвращение аварий, оценка динамической надежности, DSA, энергосистема, надежность защиты, селективность, PSA, SIGUARD, устойчивость.

АННОТАЦИЯ

Повышение потребления электроэнергии за последние десятилетия приводило к расширению систем переменного тока, в том числе к расширению сетей по территории, а также к повышению уровня напряжения. В Европе, благодаря наличию технических и экономических преимуществ, граничные энергосистемы были соединены в объединенную энергосистему. Таким образом, была создана объединенная сеть переменного тока UCTE (энергетическое объединение европейских стран) с установленной мощностью генерации более 860 ГВт. В настоящее время, UCTE в качестве отдельной организации входит в ENTSO-E (европейская сеть системных операторов передачи электроэнергии) (www.entsoe.eu).

В ближайшее время к сети электропередачи ENTSO-E в так называемое «Средиземноморское кольцо» планируется присоединение сетей северной Африки, где планируется поддержка вставок постоянного тока высокого напряжения (HVDC). Такое объединение позволит внедрить основные проекты по солнечной энергетике, таких как DESERTEC, реализуемых в пустыне Сахара.

В ходе дерегулирования, приватизации и продажи электрической энергии, чрезвычайно повышаются перетоки мощности в особых областях сети. Это приводит к уменьшению пропускной способности и снижению надежности. Принимая во внимание тенденцию глобального потепления и крайнюю необходимость снижения выбросов CO₂, в мире произойдет переход к применению альтернативных и смешанных источников энергии. А так как существующие сети передачи и распределения электроэнергии разрабатывались в соответствии со структурами генерации и потребления прошлого, то в настоящее время необходимо проведение масштабных изменений сетей.

Системные аварии в США и Европе, при которых значительная территория оставалась без электроэнергии, подтвердили преимущества объединенной работы энергосистем, и с экономической, и функциональной точки зрения. Однако, в то же время повышаются риски возникновения неуправляемых каскадных аварий. Проблемы устойчивости и защиты сети могут возникнуть в отдельных областях сети, работающих на пределе их теплового состояния.

В данной работе описываются методы оценки динамической надежности сети с учетом установленных в настоящее время систем защит. Сейчас уже совместно с европейскими университетами и Европейским Объединением Системных Операторов Передачи Электроэнергии разрабатывается соответствующая онлайн-система. Целью системы является наблюдение за надежностью системы в целом, состоящей из первичной сети и вторичной сети защиты, включая связь.

Особую важность представляет оценка надежности установленной системы защиты с ее фактическими характеристиками и параметрами.

1 ВВЕДЕНИЕ

Повышение потребления электроэнергии за последние десятилетия приводило к расширению систем переменного тока, в том числе к расширению сетей по территории, а также к повышению уровня напряжения. В Европе, благодаря наличию технических и экономических преимуществ, граничные энергосистемы были соединены в объединенную энергосистему. Таким образом, была создана объединенная сеть переменного тока UCTE (энергообъединение европейских стран) с установленной мощностью генерации более 860 ГВт. В настоящее время, UCTE в качестве отдельной организации входит в ENTSO-E (европейская сеть системных операторов передачи электроэнергии) (www.entsoe.eu).

В ближайшее время к сети электропередачи ENTSO-E в так называемое «Средиземноморское кольцо» планируется присоединение сетей северной Африки, где планируется поддержка вставок постоянного тока высокого напряжения (HVDC). Такое объединение позволит применение основных проектов по солнечной энергии, таких как DESERTEC, реализуемых в пустыне Сахара.

В ходе дерегулирования, приватизации и продажи электрической энергии, чрезвычайно повышаются перетоки мощности в особых областях сети. Это приводит к уменьшению пропускной способности и снижению надежности. Принимая во внимание тенденцию глобального потепления и крайнюю необходимость снижения выбросов CO₂, в мире произойдет переход к применению альтернативных и смешанных источников энергии. А так как существующие сети передачи и распределения электроэнергии разрабатывались в соответствии со структурами генерации и потребления прошлого, то в настоящее время необходимо проведение масштабных изменений сетей.

Системные аварии в США и Европе, при которых значительная территория оставалась без электроэнергии, подтвердили преимущества объединенной работы энергосистем, и с экономической и функциональной точки зрения. Однако, в то же время повышаются риски возникновения неуправляемых каскадных аварий. Проблемы устойчивости и защиты сети могут возникнуть в отдельных областях сети, работающих на пределе их теплового состояния.

2 СЕТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ГЕРМАНИИ

Источники генерации в Германии претерпевают изменения, включающие следующие три основных направления (см. рис. 1):

1. Увеличение генерации от возобновляемых источников энергии, находящихся вблизи от потребителя, причем питание осуществляется непосредственно сетями распределения среднего и низкого уровня напряжения.
2. Увеличение централизованной генерации, ориентированной на прямые источники энергии, такие как ветряные электростанции, расположенные как на берегу, так и в открытом море, электростанции, использующие солнечную энергию и угольные электростанции. При этом осуществляется питание передающих сетей высокого напряжения.
3. Закрытие атомных электростанций, расположенных рядом с потребителями.

В будущем это приведет к территориальному разделению областей генерации и потребления в сетях электропередачи Германии. Что, в свою очередь, приведет к удлинению линий электропередачи, не предназначенной для этого. Предполагается, что уменьшение пропускной способности в статическом режиме, динамические колебания проблемы защиты, возникшие в ходе эксплуатации, будут обнаруживаться заблаговременно. При этом соответствующие меры противодействия будут приниматься и проверяться в режиме онлайн [1].

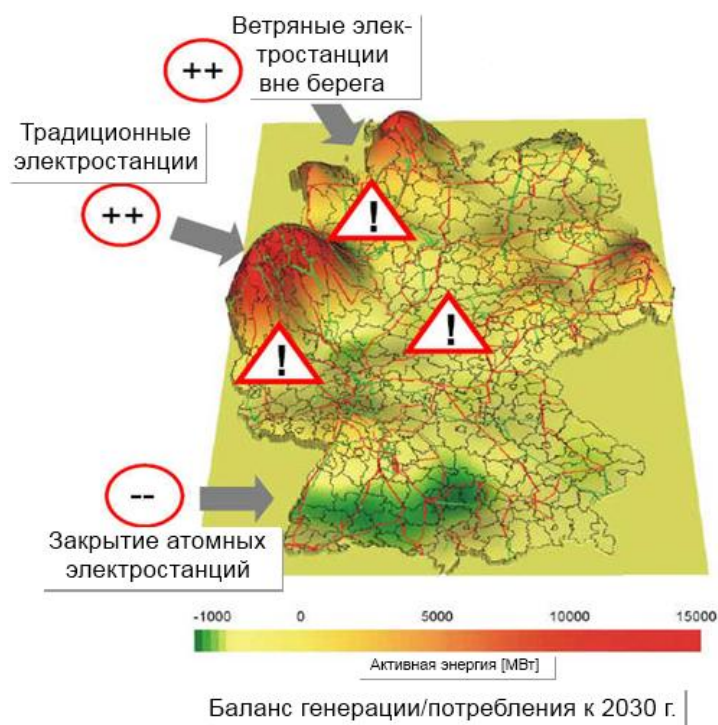


Рис. 1: Региональный баланс нагрузки Германии к 2030 году.
Источник: CIGRE SC2 C2, RWE, 10 ноября 2008 г.

3 АНАЛИЗ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ SIGUARD®

Меры по анализу и повышению надежности сети можно разделить на три периода времени, см. Рисунок 2:

Прошлое:

Анализ возникших ненормальных режимов на основе аварийных осциллограмм и записей аварийных процессов позволяет нам определить «слабые» места, а также неверные принципы выполнения защит и заданных уставок и их исправление в будущем. Для этого на рынке имеется большое количество программных средств.

Недостатком всего указанного является то, что для определения слабых мест аварийный режим должен возникнуть хотя бы один раз.

Настоящее:

В настоящее время доступны так называемые модули измерения параметров векторов (PMU), которые выполняют синхронизированные и маркированные по времени с помощью системы GPS измерения параметров векторов тока и напряжения в диапазоне от 20 до 100 мс. Передаваемые векторы собираются и архивируются в специальных обрабатывающих контроллерах. Эти данные затем доступны для проведения онлайн-мониторинга поведения энергосистемы. Такие системы сбора известны под названием “Wide Area Monitoring”. Система обработки векторов компании Siemens - SIGUARD®-PDP способна выполнять анализ полученных измерений параметров векторов.

На основе высокой наблюдательной способности имеется возможность разработки в будущем «Системы защиты и управления крупных регионов» (“Wide Area Protection and Control System”), при условии наличия быстродействующего силового электронного оборудования (FACTS и HVDC).

Будущее:

Производительность современных компьютеров позволяет с достаточной скоростью выполнять динамическое моделирование и анализ электрических сетей большой территории. В качестве исходных данных используются результаты оценки фактического состояния системы, фактические положения аппаратов и устройство релейной защиты.

Таким образом, появляется возможность получения предварительных данных анализа

устойчивости сети при возникновении аномального режима или другого возмущения до появления самого аномального режима. Это также позволяет нам выработать и проверить меры противодействия и предложить их оператору. Все это – первые шаги к созданию «Автопилотируемой» работы энергосистемы.

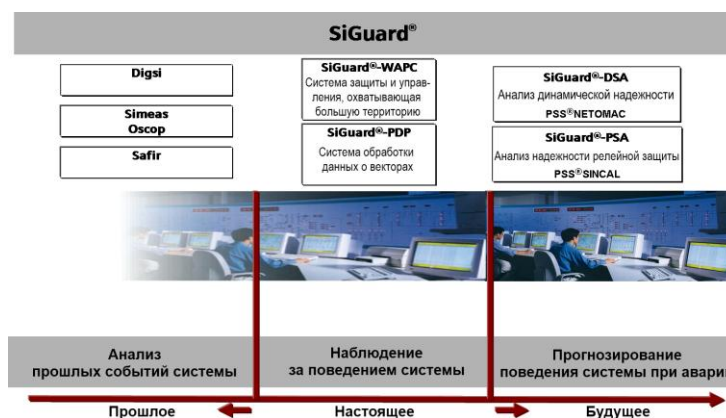


Рис. 2: Меры по анализу и повышению устойчивости системы

3.1 Анализ динамической надежности с помощью SIGUARD®-DSA

Аномальные режимы энергосистемы, такие как короткие замыкания, сбои генераторов и оборудования, а также изменения конфигурации сети, вызванные переключениями, приводят к появлению электромеханических переходных процессов [4, 5]. Необходимо провести предварительный анализ с помощью, так называемой системы «анализ динамической надежности» (“Dynamic Security Assessment, DSA”) на возможность угрозы устойчивости в статическом режиме и в переходном режиме. Для этого выполняется симуляция всего пассивного (провода, кабели, трансформаторы и т.п.), активного и коммутационного или управляемого оборудования (генераторы, батареи конденсаторов, устройства FACTS и т.п.), включая их контроллеры.

Для учета влияния и ограничений системы защиты, например, в случае перегрузок или качаний мощности, программное обеспечение динамической симуляции (моделирования) должно быть способно моделировать устройства защиты различных производителей, включая их характеристики и обмен данными. Также должны быть рассмотрены реле защиты от асинхронного хода и от изменения параметров вектора. Учет этого очень важен, так как реле защиты напрямую воздействуют на коммутационные аппараты, положение которых определяет состояние схемы энергосистемы. Это единственный способ идентификации начала развития системных аварий, приводящих к обесточиванию больших территорий. Система DSA, например, SIGUARD®-DSA компании Siemens, должна быть способна не только оценивать динамическое состояние системы, но также определять, оценивать и отображать границы критических состояний системы [3]. Для этого важно иметь подключение к существующей системе управления для получения постоянных снимков фактических, квази-устойчивых состояний системы в качестве основы для анализа динамической надежности.

Если при моделировании системных аварий найдены возможные критические условия нарушения динамической устойчивости, то система DSA должна выработать меры и решения по сохранению устойчивости или по возвращению системы в устойчивое и безопасное состояние. Вот несколько примеров таких мер:

- Блокировка приводов переключателей отпаяк трансформаторов (РПН)
- Подключение доступных источников реактивной мощности
- Деление сети
- Автоматическая разгрузка сети
- Отключение генераторов

В системе SIGUARD®-DSA компании Siemens для моделирования используется программное обеспечение PSS®NETOMAC [2]. Использование PSS®NETOMAC позволяет выполнять моделирование динамических системных аварий с большей производительностью,

чем это позволяют системы реального времени на базе стандартных ПК.

На примере проекта национальной сети электропередачи в северной Африке [11,12], где используется DSA-система от компании Сименс, может быть показано, что во время двух последовательных снимков EMS-системы (15 минут) возможно проведение более 2000 режимов моделирования динамических переходных процессов с интервалом в 20 мс с использованием группы из 10 ПК. Это означает, что для анализа системы, при необходимости, могут быть смоделированы аварии всего оборудования сети электропередачи.

Результаты анализа прошлых системных аварий показали, что между первой серьезной аварией системы и последующими каскадными отключениями всегда имеется промежуток времени, равный 20-30 минутам. Таким образом, типового времени шага снимков, равного 15 минутам или менее, абсолютно достаточно для идентификации критических условий сети и предложения мер противодействия, позволяющих предотвратить системную аварию.

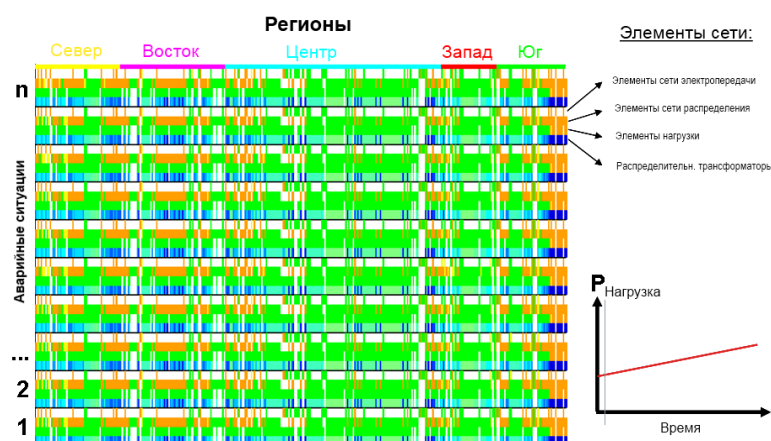


Рис. 3а: Обзор индекса устойчивости узлов системы при различных аварийных ситуациях и специальный профиль нагрузки

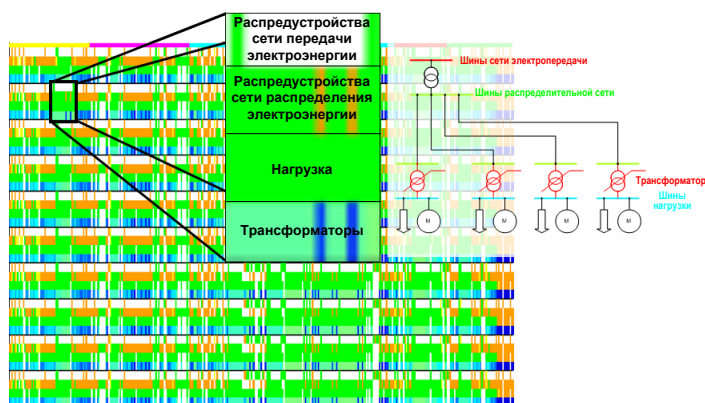


Рис. 3б: Увеличьте рисунок для получения подробной информации

Рис. 3 (а и б): Отображение мета-уровня индексов устойчивости для общенациональной энергосистемы

На рисунке 3а показано первое предложение для отображения индексов устойчивости системы для n различных аварийных ситуаций (по оси Y) относительно узлов системы (по оси X). Третье измерение – различная нагрузка шин показана относительно оси времени, что в результате формирует динамическую диаграмму, зависимую от времени. Используя время в качестве скользящего маркера можно отобразить и проанализировать индексы для конкретной величины нагрузки. Распределение результатов, выделенное цветом, показано здесь приблизительно в соответствии с региональной привязкой. Если оператору нужна более подробная информация, то он может ее получить на соответствующей однолинейной схеме, увеличив мозаичную схему, как показано на рис. 3б.

3.2 Анализ надежности защит с помощью SIGUARD®-DSA

Анализ аномальных режимов в разных странах и на разных континентах показал, что практически ни одна крупная системная авария не произошла без участия релейной защиты. Чаще всего это происходит из-за использования неверных характеристик и уставок защит.

Наиболее часто повторяющиеся ошибки следующие:

- Срабатывание 3 зоны в реле дистанционной защиты. Эта зона часто используется как защита от перегрузки, вместо использования тепловой модели, как это делается в цифровых устройствах защиты.
- Несогласованность или неселективность защиты от КЗ или перегрузки, например, на пересечении зоны ответственности различных системных операторов.
- Слишком низкие уставки функции контроля синхронизма, при которых происходит блокирование воссоединения частей энергосистемы.
- Параллельная с дистанционной или дифференциальной защитой работа резервной МТЗ без дополнительной выдержки времени.
- Расширение первичной сети, в том числе и по территории, без изменения принципов защит и их уставок.

Важным модулем ограничения распространения аварийных режимов и предотвращения развития системных аварий является так называемый онлайн или оффлайн модуль исследования надежности защит “Protection Security Assessment (SIGUARD®-PSA)”. Он позволяет выполнять автоматизированный анализ селективности всей системы защиты на базе фактического плана коммутаций в сети. Это требует наличия функций применяемых реле, их характеристик, уставок, а также наличия связи между устройствами. В качестве программного движка используется PSS®SINCAL [6], с помощью которого моделируются все виды повреждений в любой точке линии, шин, трансформаторов и т.д. Моделируются пуски и срабатывания реле защиты и результаты оцениваются на предмет селективной работы. Результаты онлайн- или оффлайн-моделирования могут быть представлены в виде списка тревог, указывающих на необходимость более подробного исследования поведения защиты. Также возможно использование экспертной системы, результатом работы которой является улучшенный набор уставок. Эти улучшенные селективные уставки можно проверить и задокументировать в ходе нового цикла моделирования перед их загрузкой в реле или отправки непосредственно в современные адаптивные реле.

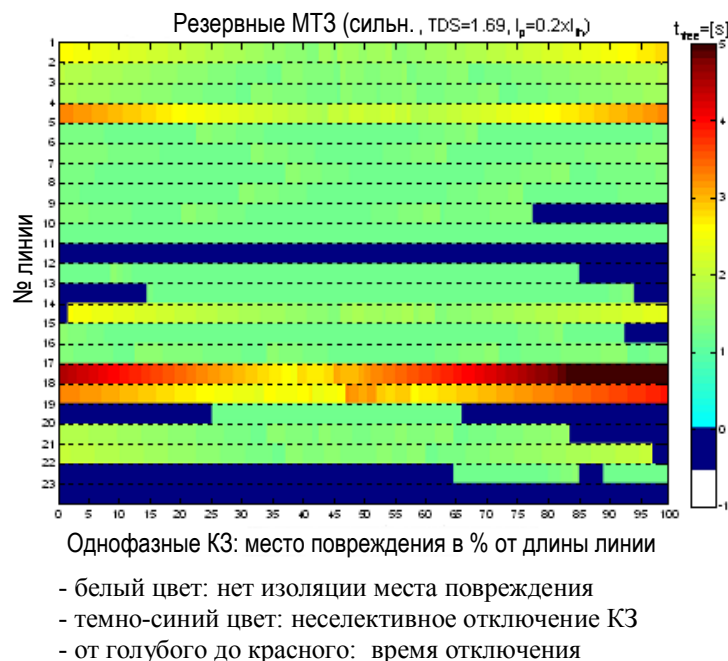


Рис. 4: Отпечаток работы системы резервной защиты в сети с 23 линиями

Анализ, проведенный для сетей электропередачи с числом реле более 12000, показал, что

для исследования общенациональной сети предлагаемое графическое описание качества в пределах мета-уровня является чрезвычайно необходимым [7, 8], как для системы DSA. Трехсторонний анализ и графическое описание можно разделить на следующие области:

- Работа только основных защит
- Работа только резервных защит
- Комбинированная работа основных и резервных защит.

На рисунке 4 показан «отпечаток» работы системы резервных токовых защит небольшой сети электропередачи с 23 линиями. В этом случае все устройства максимальной токовой защиты с выдержкой времени используют инверсные (обратнозависимые) характеристики выдержки времени.

Для оценки селективности и времен отключения было смоделировано большое число различных видов повреждений с различным значением сопротивления повреждения. Моделирование повреждений выполнялось с шагом 1% от длины линии, а также на шинах. На рисунке 4 показаны результаты для однофазных замыканий на землю. Очень просто определить линии с неселективным отключением (показано темно-синим), а также линии с чрезвычайно большим временем отключения (показано красным), без проверки большого числа карт селективности сети. Если приблизить результирующую диаграмму, то для каждой точки моделирования можно получить подробную информацию о ходе ликвидации повреждения.

Для анализа селективности характеристики и уставки реле обычно выводятся на печать. Указанным способом возможна проверка селективности только одного типа реле друг относительно друга, например, для МТЗ или ДЗ. Использование же «отпечатков» программы SIGUARD®-PSA, на которых оценено и показано поведение всей системы защиты по ликвидации повреждения четкий анализ качества работы может быть сделан независимо от типа реле защиты.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дерегулирование, продажа энергии и необходимость уменьшения выбросов CO₂ ведут к изменению использования и эксплуатации систем электропередачи. Использование оборудования на пределе возможностей и большие нагрузки в энергосистеме – все это приводит к проблемам устойчивости системы и надежности защит. В будущем понадобятся новые средства для заблаговременного определения критических условий системы, не только в статическом, но и в динамическом режиме. Указанные средства (инструменты) должны быть способны информировать оператора о граничных пределах устойчивости между фактической рабочей точкой и точкой коллапса напряжения и частоты. При этом системы защит всегда должны анализироваться, так как их характеристики и уставки могут снизить эти пределы. Когда критические условия системы обнаружены, необходимо определение, опробывание и предложение мер противодействия.

Параллельно должны анализироваться селективность и быстрдействие системы защиты для обнаружения возможных «скрытых повреждений» на ранних этапах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B.-M. Buchholz, R. Krebs, Z. Rudion, Y. Sassnick, 'Vision 2020 – Security of Network Operation Today and in Future. German Experiences.', IEEE PES, GM 2008 Pittsburgh
- [2] PSS®NETOMAC: Dynamic System Analysis. www.siemens.com/power-technologies
- [3] U. Kerin, G. Bizjak, R. Krebs, E. Lerch, and O. Ruhle, 'Faster than RealTime: Dynamic Security Assessment for Foresighted Control Actions' IEEE-Powertech, Bucharest, 29.June – 02. July 2009
- [4] T. van Cutsem and C. Vournas, 'Voltage Stability of Electric Power Systems' Power Electronics and Power System Series, 1994
- [5] P. Kundur and N.-J. Balu, 'Power System Stability and Control' McGraw-Hill Inc. New York, 1998

- [6] PSS[®]SINCAL: Utility and Industry System Analysis. www.siemens.com/power-technologies
- [7] J. Jaeger, R. Krebs and P. Lund 'Network Security Assessment – an Important Task in Distribution Systems with Dispersed Generation' CIRED, Prague, June 2009
- [8] J. Jaeger and R. Krebs, 'Protection Security Assessment in Nationwide Power Transmission Systems' GCC-CIGRE, Bahrain, Nov. 2008
- [9] F. Balasiu, R. Balaurescu and F. Lazar, 'Defence Plan Against Major Disturbances of the Romanian EPS' IEEE GM, Calgary, 2009
- [10] C. Heyde and Z. Styczynski, 'Voltage Stability Analysis as Part of an Online DSA System' IEEE GM, Calgary, 2009
- [11] E. Lerch and O. Ruhle, 'Ranking of System Contingencies in DSA Systems', APSCOM, Hong Kong, 2009
- [12] E. Lerch, O. Ruhle, D. Vickovic, 'Real-Time Stability Assessment in the Control Center of Bosnia and Herzegovina and a National Dispatching System in North Africa', IEEE PES, Seattle, 2009