

Исследование режимов электроэнергетических систем с распределенной генерацией

Г.С. НУДЕЛЬМАН, А.А. НАВОЛОЧНЫЙ, О.А. ОНИСОВА

ОАО «ВНИИР»

Россия

onisova@vniir.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Распределенная генерация, режимы энергосистем, устойчивость, моделирование.

1 ВВЕДЕНИЕ

В предыдущие десятилетия развитие энергосистемы России было неразрывно связано с созданием крупных централизованных электростанций, передающих вырабатываемую электрическую энергию в мощные центры нагрузки по высоковольтным линиям электропередач. Перед современной энергетикой встает ряд проблем, решение которых требует пересмотра такого подхода:

- растущий дефицит генерирующих и сетевых мощностей на фоне старения существующего оборудования энергосистемы;
- сложности в энергоснабжении районов, удаленных от сетей централизованной энергосистемы;
- снижение энергоэффективности и надежности электроснабжения, рост потребительских тарифов;
- негативное влияние крупных электростанций на окружающую среду.

На фоне этих проблем наблюдается рост интереса к малой распределенной энергетике. В составе генерирующих мощностей энергосистемы появляются локальные источники относительно небольшой мощности, устанавливаемые в непосредственной близости от конечного потребителя. Технологии малой распределенной генерации характеризуются гибкостью, возможностью адаптации под нужды потребителя, инвестиционной привлекательностью, высокими показателями энергоэффективности. В то же время, реализация всех достоинств этих технологий требует постановки и решения набора исследовательских и технических задач.

С изменением структуры генерации в энергосистеме появляются новые элементы со своими статическими и динамическими характеристиками, особенностями управления; изменяются режимные свойства как отдельных фрагментов распределительных сетей, содержащих локальные источники, так и всей энергосистемы в целом. Еще большую актуальность приобретают задачи обеспечения управляемости энергосистемы, эффективности функционирования релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Первым этапом решения приведенных задач является исследование электрических режимов энергосистем с распределенной генерацией, позволяющее выявить качественные изменения установившихся и переходных процессов, обусловленные появлением малых электростанций в составе энергосистемы.

2 ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

В перспективе своего развития электроэнергетические системы будут содержать и централизованные электростанции, и малую распределенную генерацию, представленную как в виде отдельных источников, подключаемых на уровне распределительных сетей и используемых для электроснабжения промышленных или коммунально-бытовых потребителей,

так и в виде целых областей с локальными источниками (часто различного типа), обеспечивающих энергией крупные города, промышленные центры и удаленные районы (рис. 1).

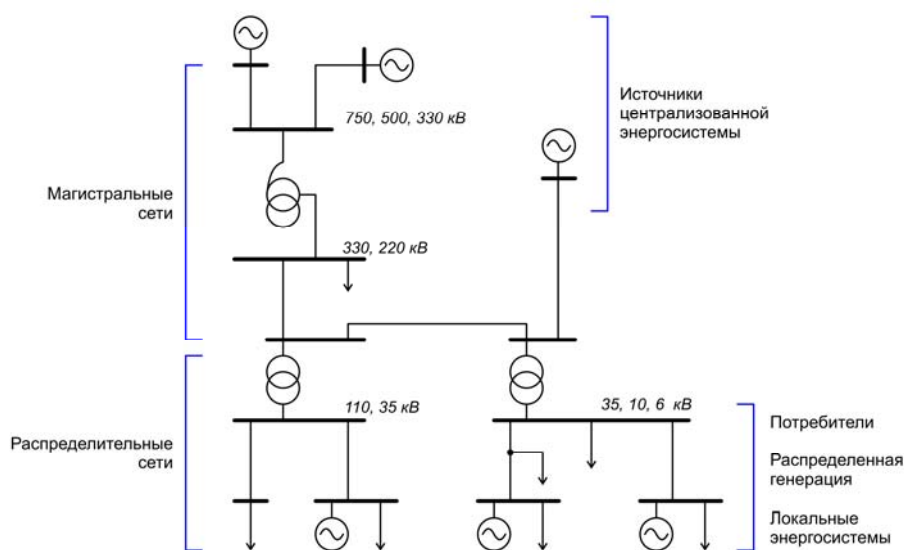


Рис. 1: Структура энергосистемы с распределенной генерацией

Электроэнергетические системы с появлением в их составе распределенной генерации меняют свои характеристики:

- Трансформируется традиционный механизм энергоснабжения «генерация – передача – распределение – потребление». Выработка энергии начинает осуществляться, в том числе, и децентрализованно в непосредственной близости от конечных потребителей. Роль распределительных сетей возрастает.
- Работа источников распределенной генерации может осуществляться как в параллель с источниками централизованной энергосистемы, так и в автономном режиме. В первом случае становятся возможными следующие режимы работы локальных источников:
 - электроснабжение части нагрузки потребителей (с питанием оставшейся части от централизованной энергосистемы);
 - электроснабжение всей нагрузки без выдачи энергии в сеть энергосистемы;
 - выдача излишков генерируемой энергии в сеть централизованной энергосистемы и участие в покрытии пиковых нагрузок распределительной сети.
- В связи с тем, что локальные электростанции находятся в непосредственной близости от потребителей, на условия их работы существенное влияние оказывает неравномерность графика нагрузки, обуславливая непостоянство направлений и величин потоков мощности, сложности в оптимизации их распределения. Значительную долю нагрузки промышленных центров составляют асинхронные электродвигатели, динамические свойства которых в значительной степени отражаются в характеристиках переходных процессов.
- Источники распределенной генерации имеют ряд конструктивных особенностей, отличающих их от генераторов крупных электростанций. Первичными двигателями источников малой генерации, как правило, являются газовые турбины, газопоршневые и дизельные двигатели. Для газотурбинных электростанций со свободной силовой турбиной, газопоршневых и дизельных установок значения механических постоянных инерции, характеризующих агрегат «генератор – первичный двигатель», имеют небольшие значения (1-5 с). Необходимо учитывать, что газопоршневые и дизельные установки с турбонаддувом имеют существенные ограничения на величину возможного наброса мощности.

Приведённые особенности обуславливают существенные изменения характеристик электрических режимов при появлении в составе энергосистемы малой распределенной

генерации. В то же время задача исследования режимов энергосистем с распределенной генерацией приобретает постановку, отличающую ее от классической задачи анализа параллельной работы крупных электростанций.

3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Наличие источников генерации в непосредственной близости от нагрузки способствует поддержанию напряжений в узлах, снижению потерь в сети; позволяет повысить надежность электроснабжения в схемах нормальных и ремонтных режимов внешней сети, в особенности при слабых связях с источниками централизованной энергосистемы.

Однако с появлением локальной генерации изменяется распределение потоков мощности в распределительной сети; направления и величины потоков становятся непостоянными; появляется вероятность возникновения синхронных качаний и асинхронных режимов.

Упрощенная оценка предельного времени отключения КЗ

В связи с тем, что локальные электростанции на базе двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок со свободной силовой турбиной характеризуются малыми значениями механических постоянных инерции, короткие замыкания в распределительной сети во многих случаях могут приводить к нарушению динамической устойчивости.

В первом приближении выполнить оценку предельного времени отключения КЗ с точки зрения сохранения устойчивости можно на основе уравнения механического движения ротора генератора с принятием допущения о неизменности механического момента турбины и переходной э.д.с. генератора [1]:

$$T_J \frac{d^2}{dt^2} \delta = P_M - P_{ЭМ}, \quad (1)$$

где T_J – механическая постоянная инерции агрегата «генератор – первичный двигатель»;

δ – угол э.д.с. генератора относительно оси, вращающейся с синхронной частотой,

P_M – механическая мощность турбины генератора,

$P_{ЭМ}$ – электромагнитная мощность генератора.

Для случая близкого трехфазного короткого замыкания ($P_{ЭМ} = 0$) уравнение (1) имеет аналитическое решение. Время достижения предельного значения угла отключения короткого замыкания определяется выражением:

$$t_{ДОП} = \sqrt{2T_J (\delta_{ПР} - \delta_0) / P_M}, \quad (2)$$

где δ_0 – значение угла э.д.с. генератора в исходном режиме;

$\delta_{ПР}$ – предельный угол отключения короткого замыкания.

Угловая характеристика электромагнитной мощности локального генератора, работающего в мощной сети централизованной энергосистемы, приведена на рис. 2, а. Предельное значение угла отключения короткого замыкания в соответствии с принятыми допущениями можно определить из условия равенства площадей ускорения (S_U) и торможения (S_T).

На рис. 2, б приведена зависимость допустимого времени отключения коротких замыканий ($t_{ДОП}$) в функции значения механической постоянной инерции агрегата «генератор – первичный двигатель» (черная кривая). Следует заметить, что приведенная графическая зависимость позволяет получить лишь приближенную качественную оценку влияния постоянной инерции электростанции на допустимое время отключения КЗ. В действительности существенное влияние на характер изменения скорости при КЗ оказывает работа систем регулирования скорости и возбуждения генератора, состав и параметры нагрузок распределительной сети.

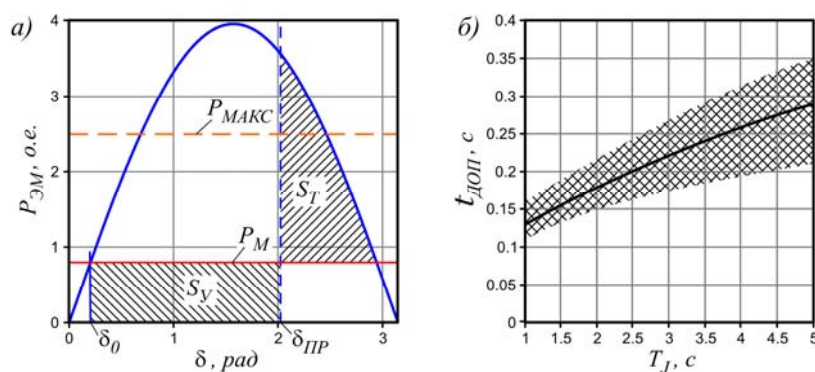


Рис. 2: а – угловая характеристика мощности генератора; б – зависимость допустимого времени отключения КЗ от значения механической постоянной инерции

Ниже приводятся характеристики процессов в энергосистемах с распределенной генерацией, полученные путем моделирования характерных схемно-режимных ситуаций и позволяющие провести анализ изменений параметров режимов во времени.

Примеры переходных процессов в энергосистемах с распределенной генерацией

На рис. 3 приведена упрощенная схема фрагмента распределительной сети, содержащей локальные источники генерации. В процессе исследований рассматривались следующие схемно-режимные ситуации:

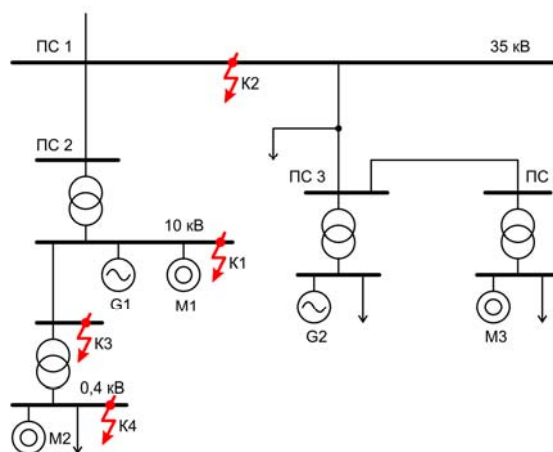


Рис. 3: Схема фрагмента распределительной сети

1) Электростанция небольшой мощности в схеме мощной сети.

Графики переходных процессов при трехфазном коротком замыкании длительностью 0,2 с вблизи шин локальной электростанции (точка К1) приведены на рис. 4. Возмущение приводит к нарушению динамической устойчивости электростанции и возникновению асинхронного режима, характеризующегося высокой частотой скольжения. Процесс завершается ресинхронизацией. Самозапуск асинхронных электродвигателей после отключения короткого замыкания вызывает дополнительное снижение напряжения на шинах электростанции.

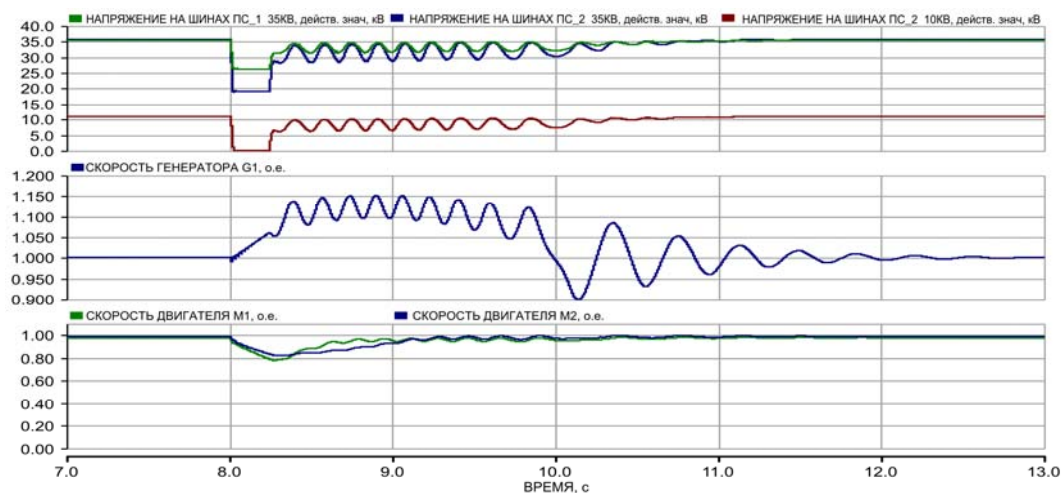


Рис. 4: Графики переходных процессов при трехфазном КЗ в точке K1

2) Распределительная сеть с локальными источниками генерации разных типов.

Трехфазное короткое замыкание вблизи шин 35 кВ ПС 1 (точка K2) приводит к ускорению генераторов локальных электростанций относительно генераторов централизованной энергосистемы. При этом скорость генераторов газопоршневой электростанции увеличивается в большей степени, что приводит к нарушению синхронизма между генераторами в пределах распределительной сети и развитию многочастотного асинхронного режима (рис. 5).

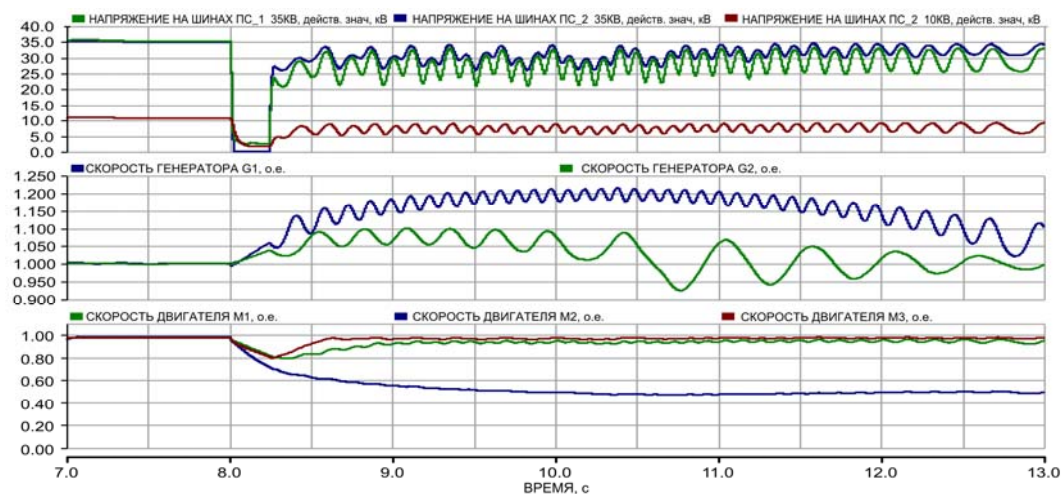


Рис. 5: Графики переходных процессов при трехфазном КЗ в точке K2

3) Автономная система электроснабжения (работа газопоршневой электростанции в автономном режиме на нагрузку ПС 2).

Трехфазное короткое замыкание длительностью 0,2 с на шинах электростанции (точка K1) приводит к нарушению устойчивости двигательной нагрузки. Последующий самозапуск электродвигателей не обеспечивается, напряжение на шинах электростанции не восстанавливается (рис. 6).

При большей доле двигательной нагрузки в системе нарушение устойчивости двигателей 0,4 кВ при КЗ в сети 10 кВ (точка K3) приводит к постепенному снижению напряжения на шинах 10 кВ электростанции и нарушению устойчивости высоковольтных двигателей (рис. 7).

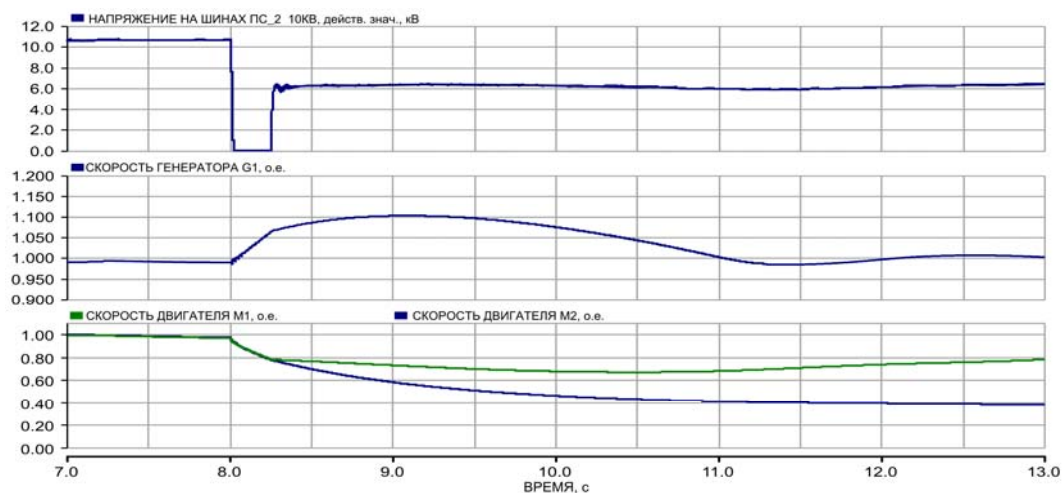


Рис. 6: Графики переходных процессов в автономной системе при трехфазном КЗ в точке K1

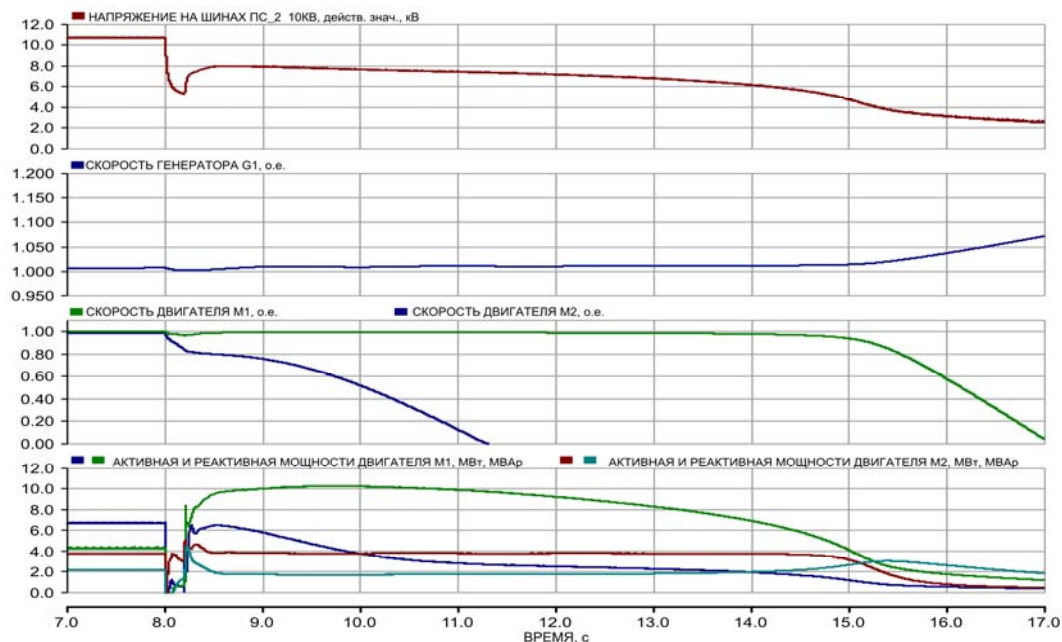


Рис. 7: Графики переходных процессов в автономной системе при трехфазном КЗ в точке K3

Процессы при коротких замыканиях в автономной системе могут иметь и абсолютной характер. На рис. 8 приведен пример процесса при трехфазном КЗ в сети 0,4 кВ (точка K4). Напряжение на шинах электростанции поддерживается близким к номинальному, увеличение потребляемой активной мощности при самозапуске асинхронных электродвигателей приводит к снижению скорости генераторов электростанции.

Особенности переходных процессов

На основе проведенных исследований выявлены следующие особенности переходных процессов в энергосистемах с распределенной генерацией:

- Высокая вероятность нарушения синхронной динамической устойчивости локальной электростанции при коротких замыканиях, что обусловлено малыми значениями постоянных инерции, характерными для газопоршневых агрегатов и газотурбинных установок со свободной силовой турбиной. Рис. 2, б иллюстрирует полученный по результатам исследований диапазон значений допустимого времени отключения близкого

трехфазного короткого замыкания в зависимости от величины постоянной инерции агрегата «генератор – первичный двигатель» (заштрихованная область).

- Асинхронные режимы локальной электростанции относительно генераторов централизованной энергосистемы в большинстве случаев характеризуются высокими скоростью развития и частотой скольжения.
- Угол э.д.с. генератора в исходном режиме невелик: предел передаваемой мощности в распределительных сетях, как правило, ограничивается перегрузочной способностью оборудования сети ($P_{МАКС}$, на рис. 2, а), кроме того, локальные генераторы обычно работают на местную нагрузку без выдачи мощности во внешнюю сеть. В связи с этим асинхронные режимы локальных электростанций, работающих в мощной энергосистеме во многих случаях завершаются ресинхронизацией.
- На характеристики переходного процесса и возможность ресинхронизации существенное влияние оказывают состав и параметры нагрузки. В большинстве случаев значительная доля нагрузки распределительной сети представлена асинхронными электродвигателями. При слабых и нестабильных связях локальной электростанции с источниками централизованной энергосистемы в автономных энергосистемах увеличивается вероятность развития аварийного режима вследствие нарушения устойчивости двигательной нагрузки.
- В распределительных сетях, содержащих локальные источники разного типа, появляется высокая вероятность возникновения многочастотных асинхронных режимов, что связано с различием значений постоянных инерций этих источников и особенностями реакции их первичных двигателей на возмущения.

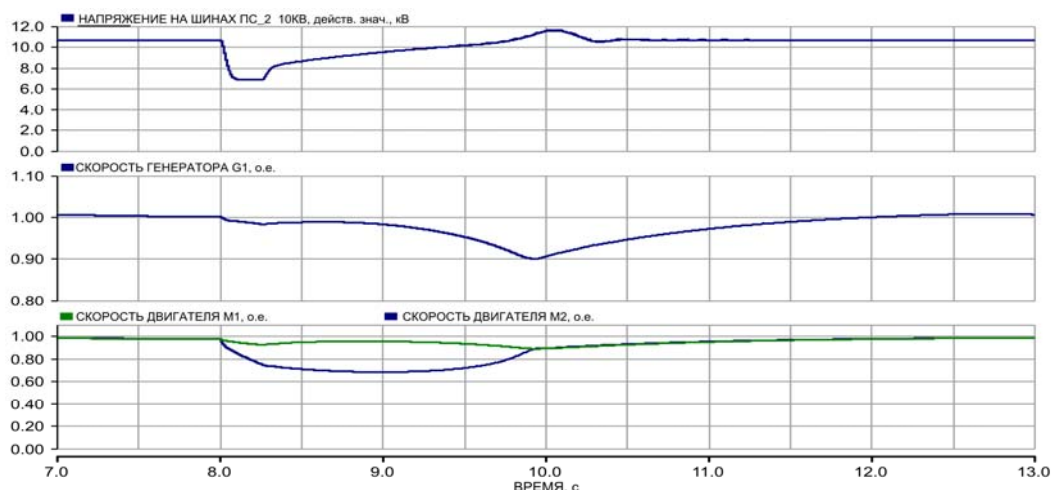


Рис. 8: Графики переходных процессов в автономной системе при трехфазном КЗ в точке К4

4 ОБЩИЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

В настоящее время в энергосистеме России децентрализованное электроснабжение часто находит реализацию в виде отдельных источников, работающих в мощной сети. При этом возможным и в ряде случаев вполне оправданным является не требующий внедрения дополнительных противоаварийных мероприятий и предъявления жестких требований к быстрдействию защит внешней сети подход, связанный с отключением локальных генераторов при повреждениях в этой сети.

В случаях, когда цель установки локального источника генерации связана с обеспечением надежного и бесперебойного энергоснабжения группы потребителей, представляется целесообразным при внешних возмущениях быстрое выделение источника в автономный режим (на выделенную нагрузку). При этом также не предъявляется жестких требований к

релейной защите внешней сети и не требуется разработка особых противоаварийных мероприятий, однако необходимо принятие мер по обеспечению быстродействия защит в системе внутреннего электроснабжения, недопущению отключений локального источника при внешних возмущениях, балансированию нагрузки и генерации при переходе в автономный режим.

Увеличение доли малой распределенной генерации в составе генерирующих мощностей энергосистемы, создание локальных энергосистем и развитие технологий «Microgrid» вынуждает пересматривать описанные выше подходы и приводит к необходимости решения двух важных задач:

- обеспечение устойчивости локальных генераторов при внешних возмущениях. Отключение отдельных генераторов в этих условиях может приводить к значительному снижению запаса реактивной мощности в системе и дополнительным снижениям уровней напряжений, к перегрузкам и отключению сетевого оборудования, что обуславливает снижение живучести энергорайона (локальной энергосистемы) и рост вероятности развития тяжелых аварий;
- обеспечение возможности безаварийного перехода локальных электростанций в автономный режим на сбалансированную нагрузку. При создании локальных энергосистем важно не только обеспечить возможность их надежной работы в параллель с централизованной энергосистемой, а также в автономном режиме, но и реализовать мероприятия по своевременному переводу этих энергосистем в автономный режим при серьезных авариях в централизованной энергосистеме.

Решение этих задач должно учитывать особенности режимов энергосистем с распределенной генерацией, требующие в большинстве случаев разработки новых принципов управления в установившихся режимах и переходных процессах, а также высокого быстродействия релейной защиты.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малая распределенная генерация – относительно новый структурный элемент в составе энергосистемы, в значительной степени оказывающий влияние на ее режимные свойства. В перспективе следует ожидать возрастания роли малой распределенной генерации, в том числе, и в решении системных вопросов управления энергосистемой, обеспечении энергобезопасности и надежности энергоснабжения.

С изменением структуры генерации режимы энергосистемы – прежде всего на уровне распределения – усложняются. Возникает необходимость решения задач по совершенствованию распределительных сетей, повышению их наблюдаемости и управляемости. Решение этих задач должно быть ориентировано на эффективное скоординированное развитие и централизованной, и малой распределенной энергетики.

Выполненные исследования показывают, что характеристики переходных процессов в энергосистемах с распределенной генерацией имеют существенные особенности, отличающие их от процессов, характерных для содержащих только крупные электростанции энергосистем. Это обстоятельство обуславливает невозможность прямого формального переноса существующих принципов построения систем релейной защиты и противоаварийного управления, используемых в централизованных энергосистемах, на сети с распределенной генерацией; появляется необходимость разработки новых решений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М., 1985.