

Развитие системы противоаварийного управления для предотвращения и ликвидации асинхронных режимов энергосистемы с использованием регистраторов комплексных величин (PMU)¹

ВОРОПАЙ Н.И., РЕТАНЦ К., ЕФИМОВ Д.Н., ПОПОВ Д.Н., ХЭГЕР У.

Представлены результаты разработки принципов селективной автоматики предотвращения и ликвидации асинхронных режимов (САПЛАР) на основе синхронизированных измерений углов напряжений, полученных от устройств PMU (Phasor Measurement Units). Представлены принципы действия и критерии срабатывания устройства САПЛАР. Эффективность подхода проиллюстрирована расчетным примером на тестовой схеме электроэнергетической системы.

Ключевые слова: энергосистема, асинхронный режим, предотвращение, ликвидация, селективная автоматика, PMU

Асинхронный режим в энергообъединении является одним из самых тяжелых аварийных режимов. Он связан с нарушением устойчивости энергообъединения, что создает опасность повреждения оборудования, нарушения электроснабжения потребителей, нежелательного развития аварийного процесса с тяжелыми последствиями для энергообъединения в целом и его частей (blackout) [1–3 и др.]. В частности, при возможной в перспективе совместной работе энергообъединений USTE и IPS/UPS по связям переменного тока возникновение асинхронного режима на интерфейсе между этими энергообъединениями может быть опасным для обоих с тяжелыми последствиями для систем и потребителей, поэтому требуются мероприятия по выявлению, предотвращению и ликвидации асинхронных режимов.

Для надежного, своевременного и селективного выявления и ликвидации асинхронного режима в электроэнергетической системе (ЭЭС) используется специальная автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР) [1, 4, 5]. Наиболее эффективной является так называемая селективная АЛАР на основе измерения угла [5–7]. В прошлом трудности непосредственного измерения угла с помощью средств телепередачи фазы напряжения заставляли использовать косвенное вычисление угла, наиболее

The results obtained from development of principles for constructing an automatic system for selectively preventing and eliminating out-of-step operating modes using synchronized measurements of angles between voltage vectors obtained from phasor measurement units are presented. The operating principles of the automatic emergency control system and criteria according to which it comes into action are presented. The effectiveness of the developed approach is illustrated by a calculation carried out for a test configuration of an electric power system.

Key words: power system, out-of-step operation, prevention, elimination, selective automatic control, phasor measurement units

распространенные способы которого основываются на определении амплитуды тока или комплексного сопротивления в месте подключения автоматики [5]. При этом ЭЭС представляется в виде двухмашинного эквивалента по отношению к сечению по связям, на котором установлена АЛАР.

Параметры двухмашинного эквивалента определяются в предположении когерентного движения генераторов исходной системы по обеим сторонам рассматриваемого сечения [5, 10 и др.]. Основанием для такого предположения является тот факт, что кинетическая энергия взаимных колебаний генераторов в переходном процессе при возмущении в случае возникновения асинхронного режима переходит в кинетическую энергию асинхронного движения двух групп генераторов по обе стороны сечения, по которому происходит асинхронный режим, а межмашинные колебания внутри этих двух групп генераторов существенно уменьшаются.

Наиболее просто реализуемым косвенным способом вычисления угла электропередачи является зависимость тока электропередачи от этого угла. Недостатком этого способа является большой разброс значений угла срабатывания АЛАР при принятой уставке срабатывания по току вследствие различного возможного состава и структуры связей в сечении при разных схемах и режимах в ЭЭС. Кроме того, эта зависимость нелинейна. Меньшую погрешность дает использование так называемой фантомной схемы – моделирования вектора напряжения удаленной точки от места установки автома-

¹Работа выполнена при поддержке ведущей научной школы (грант НШ-4633.2010.8) и РФФИ (грант №09-08-91330 ННЮ а) и в рамках международного проекта ICOEUR (см. «Электричество», 2011, № 4).

тики, например приемного конца электропередачи, которая и используется в устройствах АЛАР, установленных в ЭЭС России. Особо сложные условия для селективной работы АЛАР возникают при многочастотном асинхронном режиме по нескольким сечениям [5].

Дальнейшее развитие селективной АЛАР привело к созданию многофункционального устройства, позволяющего не только ликвидировать уже возникший асинхронный режим, но и предотвращать его возникновение. Это устройство реализует две ступени управляющих воздействий [5]. Первая призвана предотвратить нарушение устойчивости, для чего проводится отключение генерации в избыточной части системы и пуск быстрого резерва (либо отключение второстепенной нагрузки) в дефицитной части. Если эти управляющие воздействия недостаточны и предотвратить асинхронный режим не удается, срабатывает вторая ступень автоматики и проводит разделение энергообъединения.

Принципиально новые возможности реализации селективной АЛАР и селективной автоматики предотвращения и ликвидации асинхронного режима (САПЛАР) открывает использование синхронизированных измерений фаз напряжений с помощью устройств РМУ [11]. В последнее время были предложены ряд систем АЛАР на основе РМУ. В [12, 13] для выявления динамической неустойчивости используется критерий равных площадей при представлении системы двухмашинным эквивалентом, требуемые параметры которого определяются по комплексным значениям переменных состояния ЭЭС. В [14] используются измерения фаз напряжений и разностей их первых производных для прогнозирования потери устойчивости ЭЭС по критерию на основе энергетической функции. В [15] предложен комплексный критерий вы-

явления центра качаний с использованием оценок проекции модуля напряжения в некоторой точке связи между двумя частями системы и тока по этой связи при использовании двухмашинного эквивалента ЭЭС на основе оценки когерентности движения генераторов в этих двух частях системы по текущим измерениям углов.

В статье авторы предлагают принципы построения модифицированной САПЛАР с использованием измерений устройств РМУ; эффективность ее демонстрируется на тестовой схеме ЭЭС.

Принципы построения модифицированной САПЛАР.

1. Схема взаимосвязи состояний и управляющих воздействий. Потеря синхронизма в работе ЭЭС по какому-то сечению может быть вызвана двумя основными причинами:

превышением предельно допустимой пропускной способности сечения и нарушением вследствие этого аperiodической статической устойчивости системы;

нарушением динамической устойчивости в результате возмущения на одной из связей или вблизи рассматриваемого сечения.

В обоих случаях индикатором нарушения синхронизма и начала асинхронного режима является разность фаз напряжений по концам наиболее критичной связи рассматриваемого сечения. Другими словами, существует некоторое предельное значение разности фаз напряжений δ_{lim}^{as} , превышение которого свидетельствует о начале асинхронного режима.

Для того чтобы отстроиться от подобной критической ситуации, необходимо поддерживать нагрузку сечения не выше некоторого допустимого уровня, соответствующего $\delta_{lim} < \delta_{lim}^{as}$. Разница между δ_{lim} и δ_{lim}^{as} должна учитывать уровень нерегуляр-

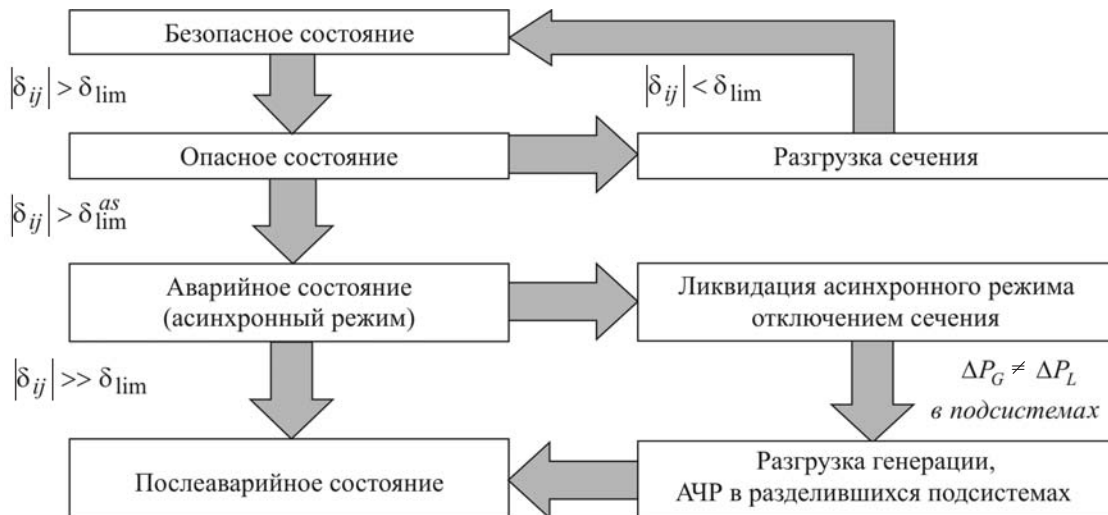


Рис. 1. Схема взаимосвязи состояний ЭЭС и управляющих воздействий в САПЛАР

ных колебаний перетоков по связям и необходимость обеспечения динамической устойчивости ЭЭС при штатных возмущениях. В диспетчерской практике в ЭЭС России используются рекомендуемые значения запасов по загрузке связей в нормальных и послеаварийных состояниях [16]. В ЭЭС УСТЕ подобные явные рекомендации отсутствуют, тем не менее можно говорить о целесообразности задания значения $\delta_{lim} < \delta_{lim}^{as}$.

С учетом сказанного ЭЭС может находиться в четырех состояниях (рис. 1): безопасном, опасном, аварийном (асинхронный режим), послеаварийном. Нахождение ЭЭС в безопасном состоянии определяется условием $|\delta_{ij}| < \delta_{lim}$. Текущее значение $\delta_{ij}(t)$ отслеживается по измерениям РМУ. В опасное состояние ЭЭС переходит при $|\delta_{ij}| > \delta_{lim}$. Для того чтобы ЭЭС вернулась в безопасное состояние, требуются управляющие воздействия по разгрузке сечения путем снижения загрузки агрегатов электростанций на передающей стороне и ввода быстрого резерва (либо отключения второстепенных потребителей) на приемной стороне. Если этих управляющих воздействий достаточно, ЭЭС возвращается в нормальное состояние. В случае недостаточности управляющих воздействий система переходит в аварийное состояние (асинхронный режим), прерывание которого выполняется отключением сечения (делением ЭЭС). При неуспешном делении ЭЭС аварийная ситуация может развиваться и послеаварийное состояние может оказаться тяжелым вплоть до блэкаута. В случае успешного деления происходит балансирование генерации и нагрузки в разделившихся подсистемах путем отключения генерации в избыточной подсистеме и действия АЧР в дефицитной подсистеме. Послеаварийное состояние в этом случае окажется менее тяжелым по сравнению с предыдущим.

Следует заметить, что традиционно в диспетчерской практике ЭЭС России автоматика разгрузки сечения и АЛАР рассматриваются отдельно вследствие того, что первая настраивается и работает по значениям перетока мощности в качестве индикатора перегрузки, а вторая, по сути, ориентирована на действие по углу электропередачи, определяемому косвенными методами [1]. Использование одного и того же индикатора, которым является разность фаз напряжений по концам электропередачи, измеряемых РМУ, позволяет рассматривать оба вида автоматики как единую комплексную систему противоаварийного управления.

2. Критерии действия ступеней САПЛАР. Как было отмечено ранее, условие перехода из нормального (безопасного) состояния в опасное фор-

мулируется как $|\delta_{ij}| > \delta_{lim}$. Следовательно, критерий действия ступени разгрузки сечения САПЛАР будет выглядеть как

$$C_{act}^{ul} = (|\delta_{ij}| > \delta_{lim}). \quad (1)$$

В случае недостаточности либо неэффективности действия ступени разгрузки сечения разность фаз напряжений по критической связи сечения при ее перегрузке продолжает увеличиваться и может достигать значения δ_{lim}^{as} . Это свидетельствует о нарушении апериодической статической устойчивости ЭЭС по рассматриваемому сечению и необходимости деления системы. Критерий действия ступени деления САПЛАР будет выглядеть как

$$C_{act}^{as} = (|\delta_{ij}(t)| > \delta_{lim}^{as}). \quad (2)$$

Для формулирования критерия действия ступени деления САПЛАР по условиям динамической неустойчивости ЭЭС при больших возмущениях необходимо использовать вторую производную разности фаз напряжений критической связи в сечении. Если вторая производная разности фаз напряжений уменьшается, это свидетельствует о сохранении динамической устойчивости ЭЭС. Переход системы в аварийное состояние (асинхронный режим) выявляется при условии, если в течение как минимум трех циклов измерений с помощью РМУ, каждый из которых может составлять несколько десятков миллисекунд, значение второй производной разности фаз напряжений критической связи в сечении не снижается ниже некоторого небольшого значения $d\delta_{min}$. Теоретически должно быть $d\delta_{min} = 0$, однако на практике это значение не равно нулю вследствие ошибок и шумов в измерениях, а также погрешностей в определении второй производной из-за дискретности измерений. Определение приемлемого значения $d\delta_{min}$ является самостоятельной задачей.

Следовательно, при прямом перетоке мощности по сечению от узла i к узлу j критерий действия ступени деления САПЛАР по условиям динамической устойчивости будет

$$C_{+} = (\Delta\delta_{ij}(t) > 0) \wedge \left(\frac{d^2\delta_{ij}(t)}{dt^2} \geq d\delta_{min} \right) \wedge \dots \wedge \left(\frac{d^2\delta_{ij}(t-2T_s)}{dt^2} \geq d\delta_{min} \right), \quad (3)$$

где T_s – продолжительность цикла между измерениями РМУ.

Соответствующий критерий C_- при обратном перетоке мощности по сечению (от узла j к узлу i) определяется аналогично.

Общий критерий перехода в аварийное состояние (асинхронный режим) и действия ступени деления САПЛАР записывается следующим образом:

$$C_{as} = (C_{act}^{as} \wedge (C_+ \vee C_-)). \quad (4)$$

В результате ЭЭС разделяется на две изолированные подсистемы.

3. Сопутствующие проблемы. Сформулированный подход к совершенствованию САПЛАР на основе измерений РМУ представляет лишь основные принципиальные положения в этом направлении. Тестовый пример, рассмотренный далее, иллюстрирует эти основные положения. Реально необходимо иметь в виду и ряд сопутствующих проблем, которые необходимо будет решать в ходе реализации подхода. Основными из них являются следующие.

Выше отмечалось, что измерения фаз напряжений с использованием РМУ целесообразно проводить по концам критической связи в сечении. Проблема заключается в том, что при увеличении передаваемой мощности по сечению загрузка отдельных связей в сечении оказывается неодинаковой. Эта ситуация определяется не только параметрами самих связей, но также и структурой и параметрами прилегающих электрических сетей. Указанная неоднородность электрической сети проявляется в том, что сенсорность узлов и связей в нагружаемом сечении оказывается неодинаковой [17]. В результате по наиболее сенсорной связи прежде всего формируются условия перехода в асинхронный режим, эта связь оказывается критической в сечении, и по ее концам целесообразно устанавливать устройства РМУ.

Следует отметить, что значимость критической связи в сечении требует дополнительного исследования, поскольку в ситуации, когда начинается асинхронный режим, расхождение фаз векторов напряжений в результате будет наблюдаться по всем связям сечения. Важно установить, насколько значимо расхождение в загрузке связей в начале формирования асинхронного режима с точки зрения эффективности работы САПЛАР.

Другая проблема связана с необходимостью верификации критерия (3). Она имеет две составляющие. Первая связана с наличием ошибок и шумов в измерениях с использованием РМУ, технических запаздываний в передаче информации, циклическостью измерений и др. Эти технические особенности требуют серьезных самостоятельных исследова-

ний, от результатов которых зависит специфика технической реализации автоматики.

Второй составляющей данной проблемы является точность определения вторых производных изменения разностей фаз напряжений. Она зависит от монотонности изменений разностей фаз и продолжительности интервалов между измерениями, а также от ошибок в измерениях. Проблема в том, что вторые производные должны определяться численным дифференцированием измеряемых величин. Этот вопрос требует также глубокого дополнительного исследования.

От результатов исследований обеих перечисленных составляющих зависит эффективность использования критерия (3) и, в частности, определенность в назначении величины $d\delta_{\min}$.

В определенной мере остается открытым вопрос о селективности действия модифицированной САПЛАР при многочастотном асинхронном режиме в случае нарушения устойчивости по нескольким сечениям. Представляется, что селективность работы автоматики должна быть достаточно высокой и приемлемой, поскольку расхождение фаз напряжений по концам связей в сечении является однозначным и вполне определенным индикатором начала асинхронного режима. При этом значение δ_{\lim} однозначно определяется параметрами режима критической связи сечения и требуемыми запасами пропускной способности по ней.

Тестовые исследования. Пусть система (рис. 2) работает в послеаварийном режиме с загрузкой связи 8–5 в размере 90% предельно возможной, что соответствует углам электропередачи $\delta_{8-5} = 36,6^\circ$ и $\delta_{202-100} = 50,5^\circ$.

В качестве возмущения примем неплановое отключение одной из двух цепей связи 8–5.

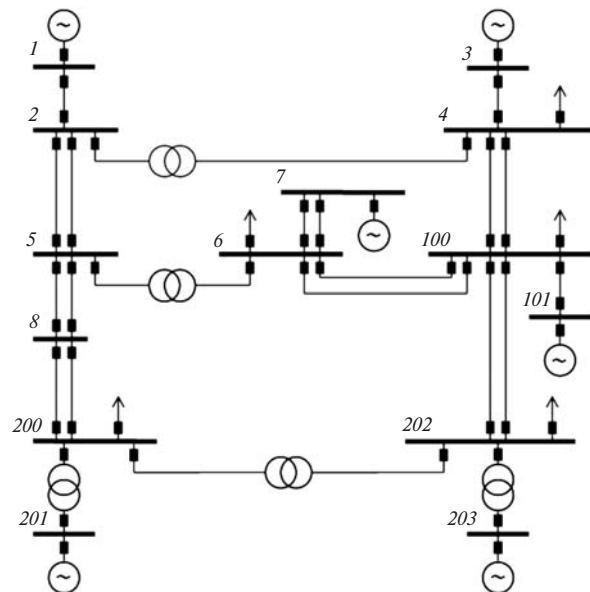


Рис. 2. Схема тестовой ЭЭС

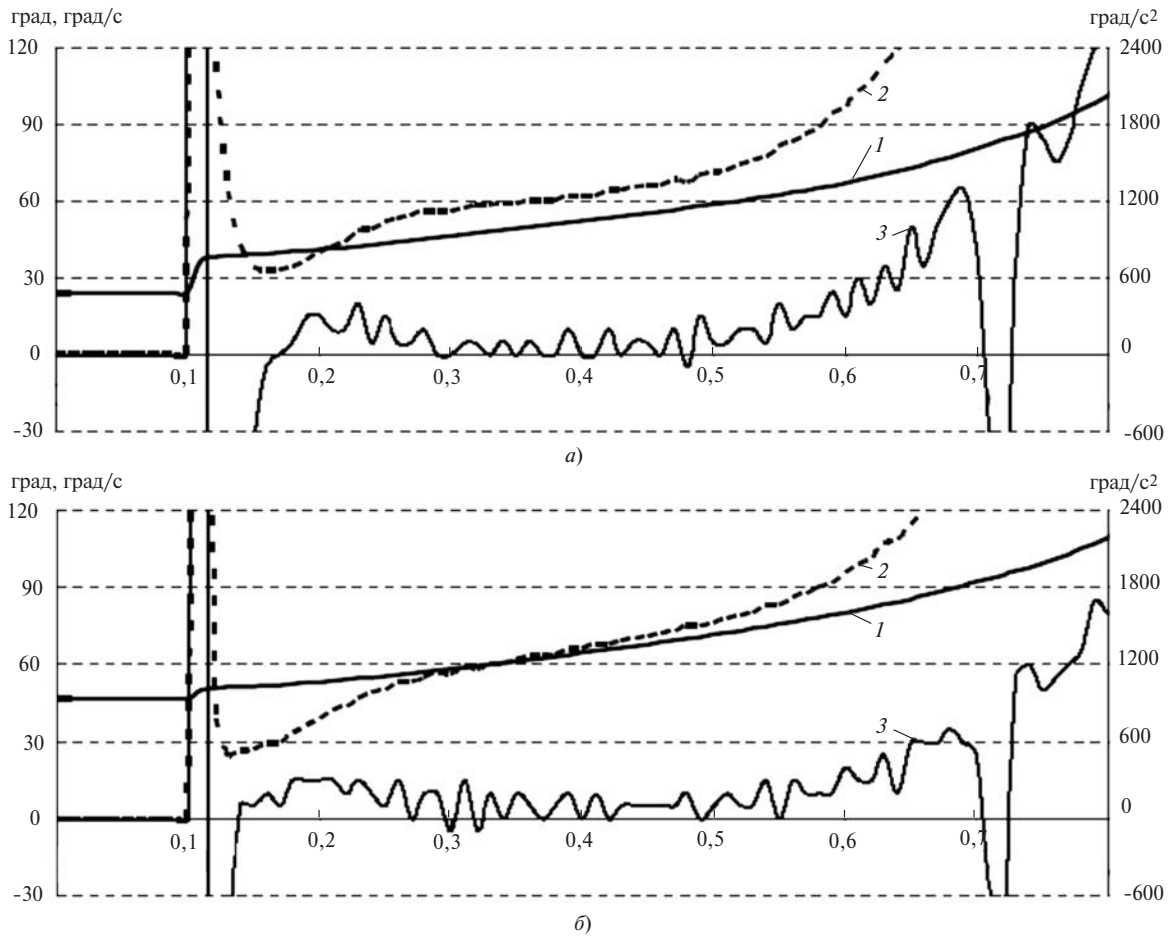


Рис. 3. Зависимость от времени δ (1), $d\delta/dt$ (2) и $d^2\delta/dt^2$ (3) при отсутствии управляющих воздействий: а – по связи 8–5; б – по связи 202–100

Динамика углов электропередачи и их производных по времени при отсутствии управляющих воздействий показана на рис. 3.

При наличии ступени разгрузки сечения САПЛАР с критерием действия (1) и уставкой $\delta_{lim(8-5)} = 52,2^\circ$ в системе в момент времени $t=0,4$ с будут реализованы управляющие воздействия в виде частичных отключений (генерации в избыточной по активной мощности части системы и нагрузки в ее дефицитной части) в объемах, показанных на рис. 4. Примем, что по техническим и/или экономическим соображениям большие объемы отключений являются крайне нежелательными.

Динамика углов электропередачи и их производных по времени при наличии названных управляющих воздействий показана на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что предпринятые управляющие воздействия являются недостаточными для обеспечения результирующей устойчивости системы, поскольку возникший практически сразу после возмущения апериодический рост взаимных углов по сечению продолжается и после этих воздействий (хотя и медленнее, чем без них). Если (исключительно для наглядности изложения) принять, что

продолжение взаимного асинхронного движения подсистем является для рассматриваемой ЭЭС неприемлемым, то уставка критерия (2) действия ступени деления САПЛАР в соответствии с рис. 5 будет равна $\delta_{lim(8-5)}^{as} = 57,3^\circ$. Деление ЭЭС произойдет в момент времени $t=0,5$ с (когда первая произ-

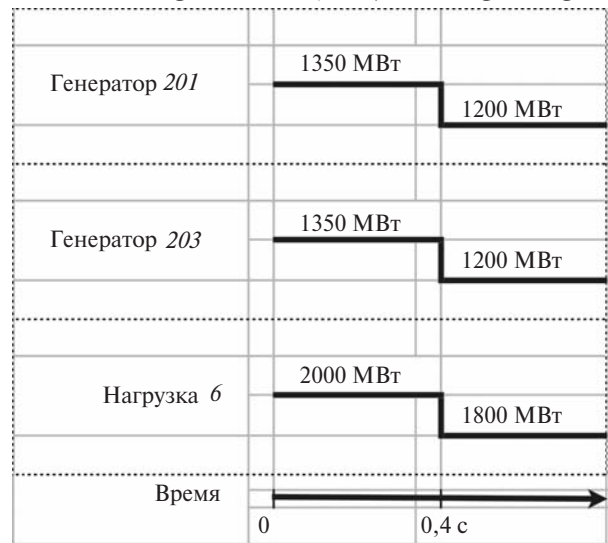


Рис. 4. Отключения генерации и нагрузки для разгрузки сечения

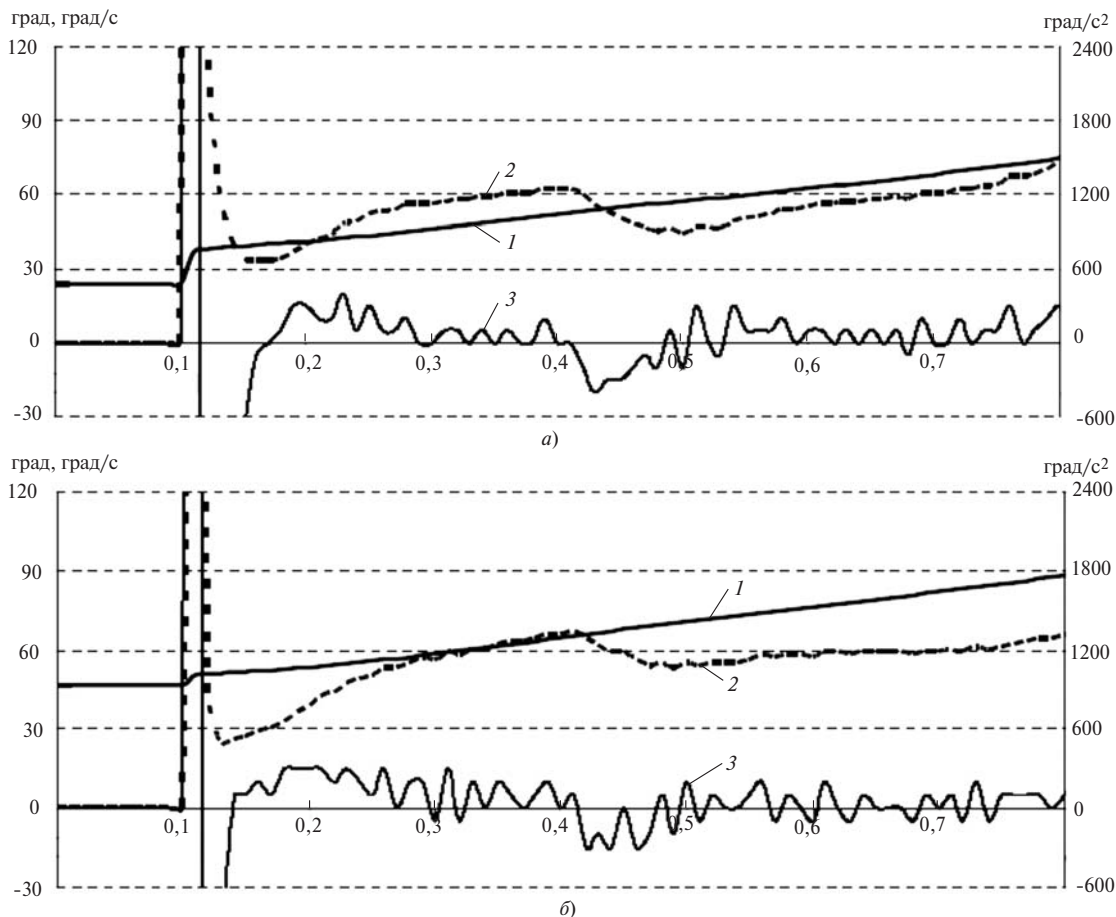


Рис. 5. Зависимость от времени δ (1), $d\delta/dt$ (2) и $d^2\delta/dt^2$ (3) при максимально возможной разгрузке сечения:
а – по связи 8–5; б – по связи 202–100

водная угла достигнет своего минимума, равного $d\delta_{8-5}/dt = 44$ град/с).

В результате деления ЭЭС на две изолированные подсистемы (одну – с дефицитом, другую – с избытком активной мощности) в каждой из них возникнут проблемы с приведением частоты к допустимому уровню. Решение этих проблем потребует дальнейшего ограничения мощностей (соответственно нагрузки и генерации), однако эти ограничения могут оказаться меньшими, чем те, что потребовались бы при сохранении параллельной работы при единой частоте. В общем случае положительный эффект деления системы будет тем выше, чем мощнее подсистема, отделившаяся с дефицитом мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Pourbeik P., Kundur P.S., Taylor C.W. The anatomy of a power grid blackout. – IEEE Power and Energy Magazine, 2006, vol. 4, No. 5.
3. Makarov Yu.V., Reshetov V.I., Strojev V.A., Voropai N.I. Blackout prevention in the United States, Europe and Russia. – Proc. of the IEEE, 2005, vol. 93, No. 11.
4. Барзам А.Б. Системная автоматика. – М.: Энергия, 1964.

5. Гоник Я.Е., Иглицкий Е.С. Автоматика ликвидации асинхронного режима. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Бринкис К.А., Семенов В.А. Селективная делительная защита при асинхронном ходе. – Электрические станции, 1975, №2.
7. Ohura Y. e.a. A predictive out-of-step protection system based on observation of the phase difference between substations. – IEEE Trans. Power Delivery, 1990, vol. 5, No. 4.
8. Quintana V.H., Mueller H. Partitioning of power networks and application to security control. – IEE Proc.: Generation, Transmission and Distribution, 1991, vol. 138, No. 6.
9. Wang X.M., Vittal V. System islanding using minimal cut sets with minimum net flow. – IEEE PES General Meeting, Denver (USA), 6–10 June 2004.
10. Наровлянский В.Г., Налевин А.А. Метод определения эквивалентных параметров схемы замещения энергосистемы в асинхронном режиме. – Электричество, 2005, №8.
11. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized phasor measurements and their applications. – Berlin: Springer, 2008.
12. Centeno V. e.a. An adaptive out-of-step relay. – IEEE Trans. Power Delivery, 1997, vol. 12, No. 1.
13. Bozchalui M.C., Sanaye-Pasand M. Out-of-step relaying using phasor measurement unit and equal area criterion. – IEEE Power India Conference, 10–12 April 2006.
14. Padiyar K.R., Krishna S. Online detection of loss of synchronism using energy function criterion. – IEEE Trans. Power Delivery, 2006, vol. 21, No. 1.
15. Li Li, Liu Yutian, Mu Hong, Yu Zhanxun. Out-of-step splitting scheme based on PMUs. – DRPT'2008 Intern. Conf., Nanjing (China), 6–9 April 2008.

16. **Методические** указания по устойчивости энергосистем. – М.: НЦ «ЭНАС», 2004.

17. **Войтов О.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З. и др.** Анализ неоднородностей электроэнергетических систем. – Новосибирск: Наука, 1999.

*Авторы: **Воропай Николай Иванович** окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1966 г. Член-корреспондент АН РФ. Директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН).*

***Ретанц Кристиан** получил в 1994г. диплом инженера-электрика, в 1997г. – степень доктора философии в Техническом университете Дортмунда (Германия). Профессор и заведующий кафедрой электроэнергетических систем и экономики энергетики в Техническом университете Дортмунда (Германия).*

***Ефимов Дмитрий Николаевич** окончил энергетический факультет Иркутского политехнического института в 1987 г. В 1998 г. защитил кандидатскую диссертацию «Методы и алгоритмы формирования расчетных условий при исследовании динамической устойчивости ЭЭС» в ИСЭМ СО РАН. Старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.*

***Попов Дмитрий Борисович** окончил Иркутский государственный университет в 1995 г. по специальности инженер-электрик. Ведущий инженер ИСЭМ СО РАН.*

***Хэгер Ульф** получил диплом инженера-электрика в 2006 г. в Техническом университете Дортмунда (Германия). Сотрудник факультета энергетических систем этого университета.*