

Мониторинг устойчивости и управление распределенной генерацией по данным синхронизированных измерений в узлах ее подключения

М.А. СОБОЛЕВА, А.Г. ФИШОВ
Новосибирский государственный технический университет
А.И. ДЕХТЕРЕВ
ЗАО «Синетик», Россия
fishov@ngs.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электрические сети, распределенная генерация, устойчивость параллельной работы, синхронизированные измерения, идентификация параметров, ограничение выдаваемых мощностей

1 ВВЕДЕНИЕ

Развитие распределенной генерации в передающей сети с крупными электростанциями, в районах распределительных сетей [1] существенно усложняет контроль устойчивости режима при эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС). Применяемые методы контроля базируются на использовании математической модели режима энергосистемы, отражающей топологию сети, параметры всех элементов и реализуются в централизованных системах автоматического и оперативного управления. Интеграция в ЭЭС распределенной генерации повышает размерность решаемой задачи, существенно усложняет систему управления, снижая тем самым экономический эффект от ее использования. Возникает технологический барьер на пути развития распределенной генерации, что актуализирует задачу разработки новой технологии контроля устойчивости, создающей более приемлемые условия для интеграции распределенной генерации в существующие ЭЭС и сети.

Предметом исследования и разработки в данной работе является технология мониторинга статической устойчивости электроэнергетических систем, основанная на использовании данных синхронизированных измерений режимных параметров в узлах электрической сети [2]. Синхронизированные распределенные измерения режимных параметров, включая векторы напряжения в узлах сети, создают техническую возможность для разработки и внедрения новых технологий контроля устойчивости и допустимости режимов электроэнергетических систем (ЭЭС). Содержащаяся в них информация о взаимном движении роторов синхронных машин в переходных процессах, в процессах перераспределения мощности между генераторами, позволяет сформировать модель для учета ограничений по устойчивости режима ЭС, соответствующую текущим режимным условиям и актуальной топологии электрической сети без ее контроля, использовать ее в задачах оперативного и автоматического противоаварийного управления.

В основе предлагаемой технологии контроля ограничений на выдачу мощности генераторами по условиям статической апериодической устойчивости в реальном времени лежит использование модели режима генераторов в виде многополюсника узлов подключения их электродвижущих сил (матрицы собственных и взаимных проводимостей (СВП) ЭДС генераторов).

Для идентификации модели используются параметры генераторов, результаты синхронизированных измерений модуля и фазы напряжения, активной и реактивной мощности на шинах генераторов набора квазиустановившихся режимов, выделяемых в процессах перераспределения мощности между генераторами (при оперативном управлении, регулировании частоты и мощности или при электромеханических колебаниях роторов) [3].

2 МОДЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЖИМА ЭС

Представим электрический режим ЭЭС в текущий момент времени пассивным линейным многополюсником с активными узлами, соответствующими узлам приложения ЭДС генераторов. Нагрузки, замещаемые линейными шунтовыми элементами, учтем в составе пассивного многополюсника. Этому многополюснику соответствует квадратная матрица собственных и взаимных проводимостей (СВП) ЭДС генераторов ($\underline{Y}$).

Режим n генераторов описывает система уравнений [4]:

$$\underline{S} = \text{diag}\{\dot{E}\} \cdot \underline{Y}^* \cdot \dot{E}^* \quad (1)$$

где $\underline{S}$ - матрица внутренних мощностей генераторов в точках приложения ЭДС;

$\dot{E}$ - матрица векторов ЭДС генераторов.

Режим каждого из генераторов определяется выражением

$$S_i = \dot{E}_i \sum_{j=1}^n \underline{Y}_{ij}^* \dot{E}_j^* \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

где i и j – индексы, указывающие номера генераторов в схеме;

S_i – внутренняя мощность i -го генератора;

$\dot{E}_i$, Y_{ij} и Y_{ji} - элементы матриц $\dot{E}$ и $\underline{Y}$.

Уравнение (3) можно записать в виде:

$$S_i = \dot{E}_i \cdot (\dot{E}^*)^T \cdot \underline{y}^{(i)*} \quad (4)$$

где $\underline{y}^{(i)}$ – матрица-столбец (вектор) СВП i -го генератора, соответствующая i -й строке матрицы $\underline{Y}$.

Записав уравнения (4) для $n-1$ генератора, получим систему линейно независимых уравнений относительно вектора СВП генераторов $\underline{y}$, который получается путем объединения векторов $\underline{y}^{(i)}$:

$$\underline{S} = \underline{A} \cdot \underline{y}^* \quad (5)$$

Вектор СВП $\underline{y}$ с учетом симметрии матрицы $\underline{Y}$ ($Y_{ij} = Y_{ji}$) имеет размерность $(n^2 + n)/2$ или $(n^2 + n - 2)/2$, если один из узлов генерации принимается шинами бесконечной мощности (ШБМ).

В электрической схеме с n генераторами число неизвестных значений вектора СВП больше числа независимых уравнений (5), за исключением случая работы генератора без собственной нагрузки на ШБМ. Одного установившегося режима для идентификации матрицы СВП недостаточно, поэтому того чтобы система уравнений (5) стала определенной, уравнения мощностей генераторов можно дополнить, используя измерения для разных моментов времени переходного электромеханического процесса или квазиустановившихся режимов с перераспределением мощностей между генераторами.

В отличие от подробной цифровой модели ЭС, обычно используемой при расчетах установившихся и переходных режимов, матрица СВП ЭДС генераторов имеет меньший порядок, при ее получении (идентификации) исключено влияние таких факторов, как ошибки средств телемеханики и недостоверность баз данных по оборудованию электрических сетей. Порядок матрицы (структура идентифицируемой модели) и погрешность определения ее параметров напрямую зависят от характера и интенсивности взаимных движений роторов генераторов, т.к. для генераторов с синфазно движущимися роторами идентификация взаимных проводимостей невозможна в силу вырожденности матрицы $\underline{A}$.

Идентификация матриц СВП ЭДС генераторов по данным синхронизированных измерений режимных параметров при изменениях режима ЭЭС

Идентификация модели режима ЭС, заданной матрицей СВП ЭДС генераторов, заключается в решении системы уравнений (5) относительно $\underline{y}$, при этом векторы ЭДС генераторов для каждого момента времени получаются расчетным путем на основе синхронизированных регистрограмм напряжения и мощностей на шинах генераторов с учетом падений напряжения на соответствующих сопротивлениях генераторов.

Для отдельных фаз переходного процесса характерна слабая обусловленность матрицы коэффициентов системы уравнений (5): 1) из-за нелинейности угловых характеристик мощности генераторов; 2) при снижении скорости относительного движения роторов генераторов в процессе электромеханических качаний; 3) на стадии затухания электромеханического переходного процесса; 4) при отсутствии взаимного движения роторов части синхронных генераторов в переходном процессе (синфазности колебаний роторов генераторов).

Условия идентифицируемости актуальной матрицы СВП можно выполнить на основе одного их принципов:

- использования регистрограмм процессов при возникновении спорадических возмущений нормального режима ЭС в результате воздействия аварийных возмущений. В этом случае область применения рассмотренной модели режима ЭС – контроль допустимости квазиустановившихся и установившихся послеаварийных режимов (ПАР).
- использования искусственных возмущений режима, например, путем подачи специальных (зондирующих) воздействий на разгрузку турбин. В этом случае может быть обеспечен контроль допустимости нормальных режимов. На рисунке 1 представлена структура процесса в ЭЭС при возмущении спорадическим возмущением установившегося режима с указанием временного окна, наиболее благоприятного для идентификации матрицы СВП.

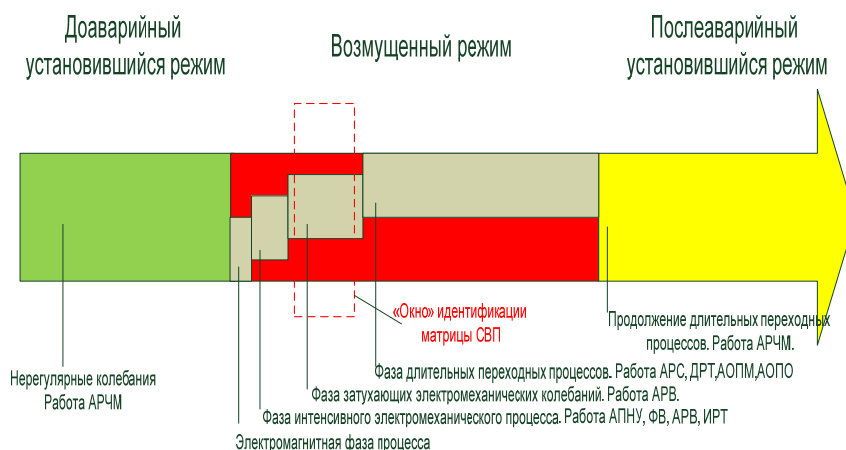
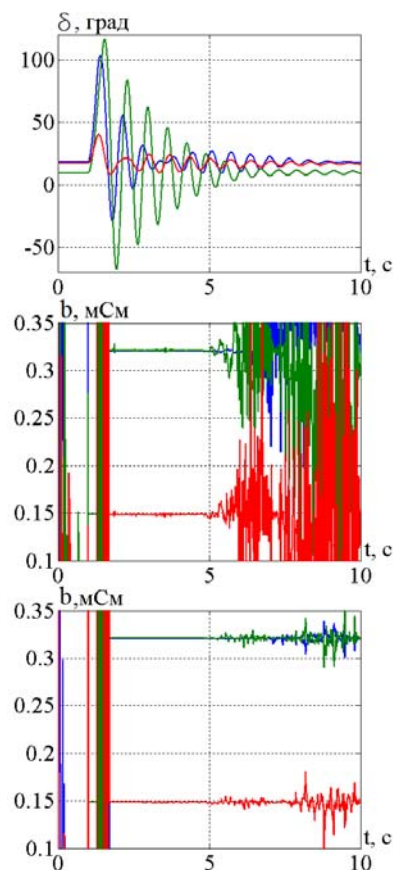


Рис. 1: Структура процесса при возмущении режима ЭЭС с указанием благоприятного окна идентификации матрицы СВП.

С учетом всех указанных факторов, «окно идентификации» – интервал времени, для которого характерна стабильность идентификации значений матрицы СВП – составляет, как правило, 1-3 секунды электромеханического переходного процесса в послеаварийном состоянии схемы. Выбор оптимального интервала идентификации и сглаживание результатов позволяет обеспечить стабильность и снизить погрешность идентификации.

Идентификацию актуальной матрицы СВП предлагается выполнять на основе решения переопределенной системы уравнений мощностей генераторов, что позволяет более полно использовать исходную информацию и получать стабильный результат идентификации.



Поскольку переопределенная система линейных уравнений, формируемая на основе измерительной информации, не имеет точного решения, вместо точного решения системы уравнений необходимо выполнить поиск такой матрицы СВП $\underline{Y}$, которая будет минимизировать сумму квадратов ошибок во всех исходных уравнениях. Для решения может быть использован метод Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt algorithm), сочетающий в себе метод минимизации вдоль градиента и метод Ньютона, обеспечивающий наилучшую сходимость в окрестностях минимума функции и часто используемый в существующих пакетах прикладных программ (в том числе, MatLab).

На рисунке 2 приведены переходный процесс в ЭЭС (графики изменения углов роторов генераторов) и результаты идентификации взаимных проводимостей в схеме «три генератора - ШБМ». Как видно из рисунка, использование избыточности измерений обеспечивает достаточно высокую стабильность идентификации значений матрицы СВП.

Рис. 2: Влияние кратности переопределения системы уравнений на стабильность результата идентификации СВП в электромеханическом переходном процессе после возмущения установившегося режима: (верхний) – колебания углов роторов генераторов; (средний) – значение одной из проводимостей матрицы при 4-х кратном переопределении системы уравнений, (нижний) – при 10-ти кратном переопределении.

Влияние электромагнитных переходных процессов на идентификацию матрицы СВП ЭДМ генераторов

Спорадические нарушения нормального режима ЭЭС (короткие замыкания, коммутации в электрической сети) сопровождаются возникновением затухающих электромагнитных переходных процессов в сети (Рис.1). Для оценки степени влияния этих процессов проведено исследование идентификации матрицы СВП на базе чисто электромеханических переходных процессов и полной картины процессов.

Для моделирования электромеханического процесса использовался ПВК Мустанг, для полного процесса – СИМ Simulink. Для сранения результатов на рисунке 3 представлены графики изменения мощностей и “скользящего” расчета матрицы СВП (на графике приведена одна из взаимных проводимостей).

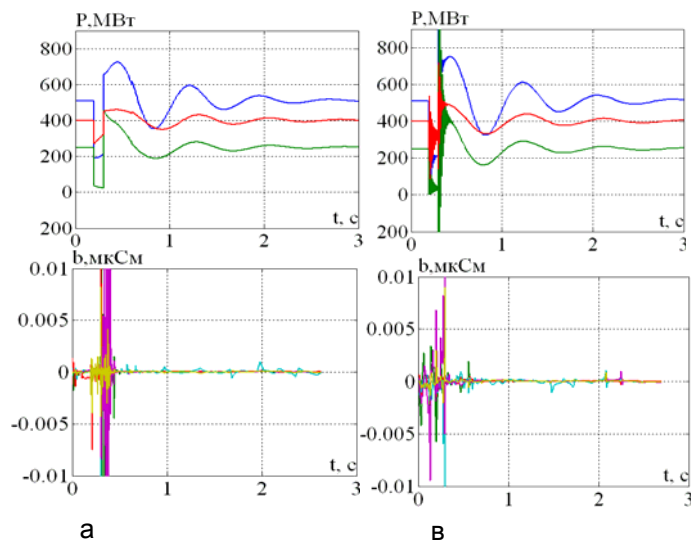


Рис. 3: Графики изменений мощностей генераторов (верхние рисунки) и значений одной из взаимных проводимостей матрицы СВП (нижние рисунки) в процессе ее скользящего многократного расчета в сети с тремя генераторами а – при неучете электромагнитного процесса; в – с учетом электромагнитного процесса.

По результатам исследования можно сделать вывод о необходимости смещения окна идентификации для его вывода из фазы электромагнитных процессов и интенсивных электромеханических процессов (Рис.2).

Использование матрицы СВП ЭДС генераторов для определения пределов выдаваемых мощностей.

Полученная в результате идентификации актуальная матрица СВП ЭДС генераторов используется в аналитических выражениях угловых характеристик их мощностей

$$P_i = E_i^2 g_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (E_i E_j b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - E_i E_j g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j))$$

где P_i – активная мощность генератора; E_i – модуль вектора ЭДС генератора; g_{ii} и g_{ij} , b_{ij} – соответственно активные и реактивные составляющие СВП генераторов; δ_i и δ_j – углы векторов ЭДС генераторов относительно вектора напряжения ШБМ.

Определение пределов по статической аperiodической устойчивости осуществляется путем утяжеления режима при перераспределении мощности между генераторами в задаваемых направлениях утяжеления.

3 ТЕХНОЛОГИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Полученная модель может использоваться для расчета ограничений на выдаваемую мощность каждого из генераторов сети для установившихся нормальных режимов, квазиустановившихся и установившихся послеаварийных режимов с учетом ограничений по току возбуждения генераторов, диапазону изменения активной мощности, работы регуляторов возбуждения и скорости.

При оперативном управлении выдачей мощности генераторов с контролем устойчивости по предлагаемой технологии оператор вначале производит снижение выдаваемой генератором мощности на некоторую небольшую величину, необходимую для появления достаточного для идентификации матрицы СВП перераспределения мощности в системе. После процедур идентификации и определения ограничений на выдаваемую мощность осуществляется желаемое изменение режима генерации, причем в процессе изменения продолжается контроль ограничений в реальном времени. Расчетный процесс в ЭЭС с таким управлением представлен на рисунке 3.

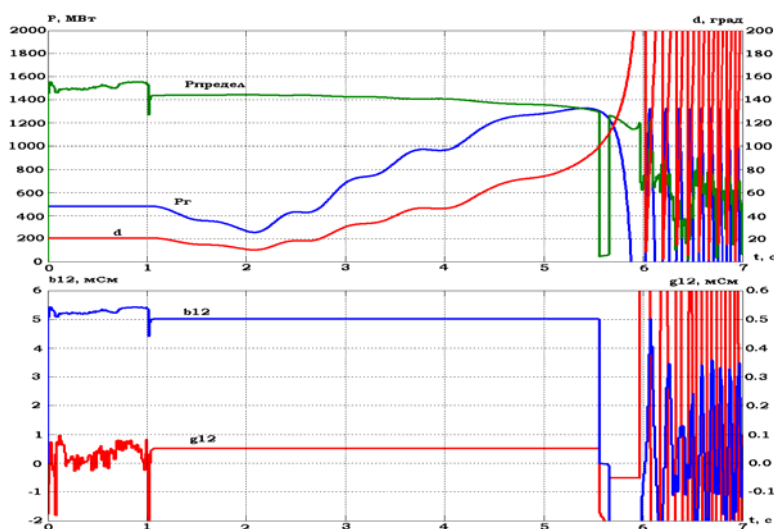


Рис. 3: Процесс управления мощностью генератора с мониторингом ограничений на выдаваемую мощность, преднамеренным доведением до предела и нарушением устойчивости
— предел мощности, — мощность, угол ротора генератора (верхний рисунок): проводимости (нижний)

В интервале 0-1с имеем чисто установившийся режим, в интервале 1-2 с оператор снижает мощность генератора для создания условий надежной идентификации матриц проводимостей с последующим определением предела выдаваемой мощности. Далее, на интервале 2-5.5 с

оператор увеличивает выдаваемую мощность, зная о величине предела, при времени 5.5 с намеренно достигается предел для проверки его достоверности. С 5.5 с происходит аperiodическое нарушение устойчивости с последующим асинхронным режимом.

При непредвиденных (спорадических) изменениях нормального режима сети также определяются пределы выдаваемых мощностей, которые используются при необходимости предотвращения нарушений устойчивости автоматикой или оперативно.

Представленная технология контроля ограничений по устойчивости может использоваться:

В распределительной сети с центром питания и включенными в разные узлы генераторами соразмерной мощности.

В передающей сети энергосистемы, содержащей крупные электростанции (генераторы) и распределенную по узлам генерацию.

В первом случае реализуется одноуровневая система контроля для всех генераторов распределительной сети, в которой предельные мощности каждого из генераторов определяются для направления утяжеления генератор-центр питания.

Во втором случае реализуется двухуровневая система контроля исходя из разделения движений крупной и малой генерации. Устойчивость параллельной работы крупных генераторов обеспечивается по традиционной технологии. Устойчивость районов с распределенной генерацией – по предлагаемой технологии в условиях контролируемого движения крупных генераторов.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идентификация актуальной матрицы СВП ЭДС генераторов на основе измерений СМПР позволяет получить модель режима ЭС для мониторинга допустимости режимов ЭС в реальном времени.

Результаты мониторинга допустимости режимов ЭС могут быть использованы для корректировки ограничений на режимы ЭС в части запасов статической устойчивости в нормальных и послеаварийных режимах, уточнения необходимых величин управляющих воздействий ПА в темпе переходного процесса, что повысит управляемость ЭС.

Создание системы мониторинга допустимости режимов ЭС позволит осуществить переход от управления режимами для предотвращения нарушений устойчивости по принципу “ДО” на основе заранее выполненных расчетов для ограниченного набора расчетных условий к управлению по принципу “ПОСЛЕ” по факту возникновения аварийного возмущения.

В электрических сетях с распределенной генерацией предлагаемая технология контроля устойчивости может служить основой свободного (безопасного) доступа генерации в сети.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фишов А.Г., Калюжный Р.С. Сценарии развития региональной энергосистемы в современных условиях/ Научный вестник НГТУ. - 2012 - №3(48). С.161-172.
- [2] Аюев Б. И. Система мониторинга переходных режимов: текущее состояние и перспективы развития [Электронный ресурс] // Мониторинг параметров электроэнергетической системы: материалы второй международной науч. - практической конф., Санкт-Петербург, 28-30 апр. 2008 г. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : цв. ; 12 см.
- [3] Фишов А.Г. Мониторинг запасов устойчивости энергосистем по данным СМПР с идентификацией и использованием собственных и взаимных проводимостей ЭДС эквивалентных генераторов / А.Г. Фишов // Электроэнергетика глазами молодежи : научные труды всероссийской научно-технической конференции, Екатеринбург 17-19 ноября 2010 года : сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2010. Т1. - С. 24-27
- [4] Жуков Л. А. Установившиеся режимы сложных электрических систем: Методы расчетов [Текст] / Л. А. Жуков, Стратан И. П. – М.: Энергия, 1979. – 416 с.
- [5] Д. В. Тутундаева, А. Г. Фишов Развитие технологии контроля и нормирования запасов устойчивости энергосистем / Научный вестник НГТУ. – 2011. – №2(43). – С. 147-160. – ISSN 1814-1196.