

Некоторые вопросы анализа статической устойчивости электроэнергетических систем

ЛОХАНИН Е.К., РОССОВСКИЙ Е.Л., ГАРАЕВ Ю.Н., МОРОШКИН Ю.В., ГЛАГОЛЕВ В.А.

Показано, что в изолированных энергосистемах наряду с нарушением устойчивости по углу возможно нарушение статической устойчивости по частоте. На базе уравнений Парка–Горева рассматриваются основные положения методики исследования статической устойчивости, основанной на расчете и анализе переходных процессов, вызванных малыми возмущениями скольжений роторов электрических машин. При этом анализ колебаний роторов проводится относительно синхронно вращающейся оси.

Ключевые слова: энергосистема, переходные процессы, статическая устойчивость, анализ устойчивости

Согласно руководящим указаниям по определению устойчивости электрических систем важной практической задачей является определение запаса статической устойчивости исследуемых установившихся режимов по отношению к их предельным значениям. Последние получаются утяжелением исходных расчетных режимов по заданным параметрам (генерируемой мощности, нагрузке, электрическим углам векторов напряжения и т.д.). Причем в зависимости от параметра утяжеления существуют разные оценки запасов устойчивости, что соответствует реальным условиям работы энергосистем.

Анализ статической устойчивости включает следующие взаимосвязанные между собой этапы:

расчет характерных нормальных и ремонтных установившихся режимов;

проверка исходного режима на статическую устойчивость:

по частоте (при отсутствии в расчетной схеме балансирующего узла);

по углам роторов электрических машин;

по напряжению в узлах электрической сети;

расчет траекторий утяжеления;

определение предельных режимов по условиям статической устойчивости;

определение запасов статической устойчивости исходных установившихся режимов относительно их предельных значений.

Проверка статической устойчивости включает в общем случае составление линеаризованной системы дифференциальных уравнений движения для получения характеристического уравнения системы и исследование его корней на устойчивость.

It is shown that in isolated electric power systems, loss of small-perturbation stability in frequency may occur along with loss of stability in power angle. Key principles of a procedure for studying small-perturbation stability are considered on the basis of Park–Gorev's equations. Central to this procedure are calculation and analysis of transients caused by small disturbances in the slipping of electric machine rotors. The oscillations of rotors are analyzed with respect to a synchronously rotating axis.

Key words: power system, transients, small-perturbation stability, analysis of stability

По соображениям практической реализации в современных режимных программных комплексах анализ статической устойчивости сложных энергосистем можно выполнять путем численного решения исследуемых дифференциальных уравнений при малых возмущениях: этот подход позволяет сохранить ту же расчетную модель, что и для расчетов динамической устойчивости. Допустимость такого решения рассмотрена также в [1–3], где независимость результатов исследования от мест приложения малых возмущений следует из теоремы Ляпунова.

Проверка исходного установившегося режима на статическую устойчивость по частоте. В предлагаемой методике в качестве малых возмущений выбираются приращения скольжений роторов генераторов. Исследуемый режим считается статически устойчивым, если после указанных возмущений все скольжения устанавливаются с одинаковыми постоянными значениями. При этом должны устанавливаться и все взаимные углы роторов генераторов, т.е.

$$s_i \otimes s_{уст}, d_{ij} \otimes d_{ijуст} < d_{пр},$$

где $d_{пр}$ – предельное значение взаимных углов генераторов в исследуемых установившихся режимах.

Исследуемый режим считается статически неустойчивым, если хотя бы одно из этих условий не выполняется. Так, если какой-либо из взаимных углов генераторов по модулю превышает предельное значение, т.е. $d_{ij} > d_{пр}$ при $s_i^{-1} s_j$, то имеет место нарушение устойчивости, которое характеризуется как неустойчивое по углу.

Результаты исследований показывают, что нарушение устойчивости возможно при относительно малых взаимных углах роторов генераторов. В этом случае в энергосистемах с сильными электрическими связями неустойчивость режима может проявляться как неустойчивость по частоте. При этом скорости вращения генераторов, не изменяясь относительно друг друга, изменяются все одновременно вплоть до срабатывания частотной системной автоматики. В этом случае имеет место неустойчивость по частоте, которую можно определить следующим образом:

$$s_{ij} \approx 0 \text{ при } s_i = s_j = \text{var} \text{ и } d_{ij} \approx d_{ij\text{уст}}.$$

Как известно, неустойчивость по частоте вызывается отсутствием резерва генерирующей мощности и может сопровождаться «лавиной частоты» [4]. Теоретическое обоснование нарушения статической устойчивости по частоте путем анализа коэффициентов характеристического уравнения для случая одиночного генератора дано в [5]. В статье показана возможность выявления нарушения устойчивости по частоте в многомашинных изолированных энергосистемах.

Если на неустойчивость по углу значительное влияние оказывает близость режима к максимуму или минимуму электромагнитной мощности генераторов, то неустойчивость по частоте может быть вызвана ограничениями механической мощности турбин. При этом электромагнитная мощность генератора может быть значительно меньше своего предельного значения, определяемого электрическими связями между генерирующими и нагрузочными узлами.

В качестве примера проведем анализ статической устойчивости синхронных генераторов в изолированной энергосистеме.

В «Сахалинэнерго», как показывает опыт эксплуатации, реализация задаваемых графиков нагрузки и генерации допускается в диапазоне частот от 47,5 до 52,5 Гц. Расчет установившихся и переходных режимов с введением балансирующего узла здесь не применим, так как при этом исследуемая модель энергосистемы более устойчива, чем это имеет место в реальной энергосистеме, где отсутствует даже само понятие балансирующего узла.

Общая расчётная схема «Сахалинэнерго» содержит 75 узлов, 82 ветви с 13 генераторами разной номинальной мощности от 12 до 120 Мвт. Нагрузочные узлы представлялись индивидуальными динамическими и статическими характеристиками.

В каждом генерирующем энергоблоке в соответствии с эксплуатационными формулярами и имеющейся информацией учитывались теплосило-

вое оборудование и различные типы регуляторов возбуждения, форсировки и расфорсировки.

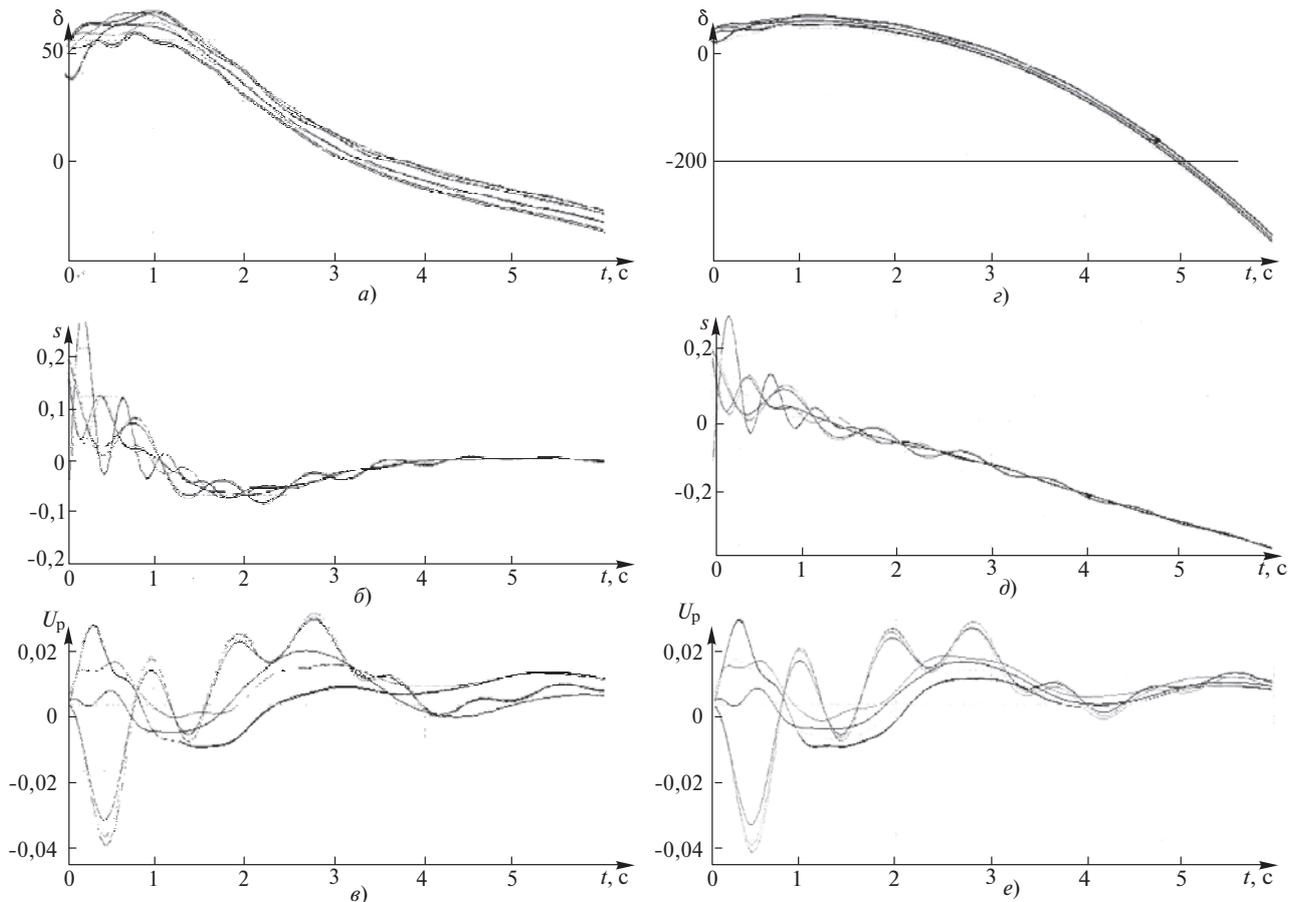
Модели генераторов представлялись упрощенными уравнениями Парка–Горева с учетом одного демпферного контура в каждой оси. Это обстоятельство позволяет избежать ошибочного учета демпфирования по абсолютному скольжению.

При расчётах установившихся и переходных режимов отсутствовал балансирующий узел. Расчёты проводились с учётом переменной частоты, зависящей от статизма регуляторов скорости в пределах регулировочного диапазона, определяемого границами перемещения регулирующего органа турбины, и частотными нагрузочными характеристиками. В связи с этим важно отметить, что значения параметров регуляторов уточнялись в результате сопоставительных расчетов для известных реальных режимов, включая аварийные.

На рисунке представлены графики изменений углов выбега роторов генераторов (*a*, *г*), скольжений (*б*, *д*) и выходных сигналов регуляторов возбуждения (*в*, *е*) при расчете переходных процессов в случаях сохранения и нарушения статической устойчивости при разной нагрузке генераторов и вблизи верхней границы регулировочного диапазона в случае нарушения устойчивости. Исследуемые установившиеся режимы характеризовались относительно малыми разностями взаимных углов роторов генераторов, что свидетельствует о большом запасе статической устойчивости по углу. Здесь разности установившихся углов роторов генераторов не превышали 35°. Последнее определяет также наличие сильных электрических связей между генераторами.

При этом, если при сохранении статической устойчивости переходный процесс при малых возмущениях завершался при одинаковых скольжениях всех генераторов, то при нарушении статической устойчивости по частоте процесс изменения скольжений при их равенстве не прекращался. Таким образом, во втором случае имеет место сползание режима с одинаковой для каждого генератора частотой вплоть до отключения генераторов технологической защитой. Данный режим, будучи устойчивым по углу, определяется как неустойчивый по частоте.

На графиках изменений скольжений роторов генераторов (рисунок *б*, *д*) можно выделить отрезок времени, на котором скольжение начинает уменьшаться в первом случае (рисунок *б*) и продолжает увеличиваться во втором (рисунок *д*). Последний соответствует прекращению действия регуляторов скорости при выходе на границу регулировочного диапазона в момент времени, близкий к 2 с.



Графическое отображение результатов расчета переходных процессов в энергосистеме «Сахалинэнерго»: а, б, в – при сохранении статической устойчивости по углу и частоте; г, д, е – при нарушении статической устойчивости по частоте

Графики изменения выходных сигналов регуляторов возбуждения, приведенные на рисунке, показывают, что нарушение устойчивости генераторов не связано с нарушением устойчивой работы системы регулирования возбуждения и обусловлено исключительно достижением границы регуляторного диапазона.

Расчет траекторий утяжеления и анализ статической устойчивости по углу. В практике расчетов траекторий утяжеления наибольшее распространение получил метод пошагового итерационного корректирования установившихся режимов. Получение траектории утяжеления таким способом сводится к расчету серии утяжеляемых режимов. Для каждого такого режима последовательно выполняется перераспределение мощностей генераторов или нагрузок и снижение модулей напряжений в утяжеляемых узлах. При этом с приближением к предельному режиму сходимость естественно резко ухудшается. В этом случае для получения предельного режима существуют следующие возможности:

дробление шага утяжеления до получения сходящегося расчета с заданной точностью по утяжеляемым параметрам;

переход на утяжеление по углу;

использование прогнозирования на последующих шагах утяжеления информации, полученной на предыдущих шагах.

В последнем случае могут использоваться формулы Ньютона для интерполяции вперед.

При подходе к предельному режиму число итераций начинает возрастать и наступает момент, когда следующий режим становится неопределенным.

С физической точки зрения нарушение сходимости итерационного процесса может происходить из-за наличия в электроэнергетической системе «слабых» звеньев. Наличие слабого звена в итерационном процессе может быть определено:

снижением напряжения ниже допустимого предела при увеличении нагрузки;

снижением напряжений по концам линий электропередачи, что не позволяет увеличить переток мощности;

возрастанием невязки между заданной и отрабатанной активной мощностью в генераторных узлах.

Обычно анализ статической устойчивости разбивается на два этапа:

исследуется апериодическая (квазипериодическая) устойчивость (АСТУ) при допущении, что в энергосистеме отсутствует самораскачивание;

проводится полный анализ статической устойчивости с учетом динамических свойств энергосистемы и систем регулирования.

Следует иметь в виду, что определять АСТУ по сходящимся установившимся режимам не всегда возможно: соответствие условий сходимости и апериодической устойчивости зависит от выбора метода расчета установившихся режимов.

Следует также отметить, что в расчетах режимов необходимо учитывать ограничения по реактивной мощности генераторов Q_{\max} с учетом допустимой перегрузки по токам статора и ротора. В машинном зале электростанций это обстоятельство отражается путем изменения заданных уставок напряжений в регуляторах АРВ.

Учет зависимости Q_{\max} от режима работы генераторов является наиболее актуальным при расчете траекторий утяжеления для регионов с дефицитом реактивной мощности, где возможны значительные снижения напряжения в узлах электрической сети.

Основные положения предлагаемой методики анализа статической устойчивости. Как было отмечено ранее, в разработанных алгоритмах расчета анализ статической устойчивости сложных энергосистем выполняется на основе численного решения дифференциальных уравнений. Уравнение движения синхронных машин здесь представлено в системе осей q, jd , связанных с ротором, анализ колебаний которого выполняется относительно синхронно вращающейся оси (СВО). Следует отметить, что определение СВО имеет физический смысл только в случае существования послеаварийного установившегося режима. Ляпунов рассматривает устойчивость переходного процесса по отношению к невозмущенному движению. Применительно к электрической системе это не что иное, как послеаварийный или послекоммутационный установившийся режим, который должен существовать и его необходимо определить. В случае его отсутствия колебания в электрической системе заранее считаются неустойчивыми.

Для исследования устойчивости была разработана методика анализа переходных процессов, основные элементы которой заключаются в следующем.

1. В исходном установившемся режиме определяются значения максимального $\max d_E^{(0)}$, минимально-

го $\min d_E^{(0)}$ и среднего $d_{\text{Еср}}^{(0)} = (\max d_E^{(0)} + \min d_E^{(0)}) / 2$ углов ЭДС всех генераторов.

2. На все уравнения движения генераторов подаются малые возмущения в виде приращений скольжений на $\pm Ds$ ($|Ds| \leq 0,1$ Гц). При этом «+» устанавливается для генераторов с $d_E^{(0)} \geq d_{\text{Еср}}^{(0)}$, а «-» при $d_E^{(0)} < d_{\text{Еср}}^{(0)}$.

3. Проводится расчет переходных процессов (ПП) на заданном временном отрезке T_p , который при анализе ПП разбивается на три участка (по опыту расчетов достаточно иметь $T_p = 15$ с).

4. Анализ затухания скольжений роторов синхронных машин осуществляется по отношению к СВО, а затухание выходных сигналов АРВ определяется с учетом статизма этих регуляторов. При этом СВО определяется как

$$S_{\text{СВО}} = \frac{\sum_{i=1}^n s_{\text{icp}} S_{\text{ном}i}}{\sum_{i=1}^n S_{\text{ном}i}},$$

где s_{icp} – среднее скольжение i -го генератора на исследуемом участке; $S_{\text{ном}i}$ – номинальная мощность i -го генератора.

5. Декременты затухания скольжений роторов СМ и выходных сигналов АРВ K_{si} и K_{Ui} , соответственно, на участке времени III определяются по отношению к участку II:

$$K_{si}^{\text{III}} = \frac{\max |Ds_i^{\text{III}}|}{\max |Ds_i^{\text{II-III}}|}, \quad K_{Ui}^{\text{III}} = \frac{\max |DU_i^{\text{III}}|}{\max |DU_i^{\text{II-III}}|},$$

где $\max |Ds_i^{\text{III}}|$ – максимальное изменение скольжения i -го генератора в пределах исследуемого участка; $\max |Ds_i^{\text{II-III}}|$ – то же на исследуемом участке по отношению к участку II; $\max |DU_i^{\text{III}}|$ – максимальное изменение сигнала АРВ i -го генератора на исследуемом участке; $\max |DU_i^{\text{II-III}}|$ – то же на исследуемом участке по отношению к участку II.

6. В процессе расчета в конце каждого участка, начиная со II, анализируются взаимные углы ЭДС генераторов. При этом различают следующие ситуации.

6.1. В случае, когда максимальные взаимные углы всех генераторов (любых i -го и j -го генераторов) $\max |d_{ij}| < 180^\circ$, определяются СВО, декременты затухания K_{si} и K_{Ui} и дальнейший анализ проводится следующим образом:

при $K_{si} < 1,0$ и $K_{U_i} < 1,0$ на завершающем участке расчета режим считается статически устойчивым;

при $K_{si} \geq 1,0$ и $K_{U_i} \geq 1,0$ в конце последнего участка делается вывод о статической неустойчивости режима.

6.2. В случае, если $\max |d_{ij}| \geq 180^\circ$ в конце текущего исследуемого участка, режим считается неустойчивым и расчет заканчивается. При этом СВО, K_{si} и K_{U_i} не определяются.

Выводы. 1. В изолированных энергосистемах и выделившихся частях энергосистем с сильными электрическими связями между генераторами наряду с неустойчивостью по углу существует возможность нарушения устойчивости по частоте.

2. Предложенная методика анализа статической устойчивости достаточно эффективна для распознавания характера переходного процесса при малых возмущениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоханин Е.К., Скрипник А.И. Анализ статической устойчивости электроэнергетических систем на основе программного комплекса ВРК ДАКАР. — Электричество, 1998, № 8.

2. Лоханин Е.К., Васильева Г.В. Анализ статической устойчивости сложных энергосистем динамическим методом. Исследование в области устойчивости энергосистем и противоаварийной автоматики. — М.: Энергоиздат, 1986.

3. Веников В.А., Мариносян Р.Э. Статическая устойчивость как частный случай динамической устойчивости электрических систем. — Электричество, 1981, № 6.

4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Изд. 4. — М.: Высшая школа, 1985.

5. Строев В.А. Исследование устойчивости одиночного генератора, работающего на статическую нагрузку. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1964, № 4.

[28.02.13]

Авторы: Лоханин Евгений Константинович окончил гидроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1957 г. В 1993 г. защитил докторскую диссертацию «Методы расчета и анализа стационарных и переходных режимов сложных энергосистем» в С. Петербургском техническом университете. Начальник лаборатории противоаварийного управления ООО «Институт Энергосетьпроект».

Россовский Ефим Львович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1963 г. Старший научный сотрудник лаборатории противоаварийного управления ООО «Институт «Энергосетьпроект».

Гараев Юрий Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1969 г. Ведущий инженер лаборатории противоаварийного управления ООО «Институт «Энергосетьпроект».

Морошкин Юрий Викторович окончил механико-математический факультет Московского государственного университета в 1961 г. В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию «Уточнение практических методов расчета устойчивости ЭЭС» в МЭИ. Старший научный сотрудник лаборатории противоаварийного управления ООО «Институт «Энергосетьпроект».

Глаголев Валерий Александрович окончил Институт электроэнергетики НИУ «МЭИ» в 2007 г. Начальник отдела проектирования ЭЭС ООО «Институт «Энергосетьпроект».

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах на русском и английском языке. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита; место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.