

УДК: 621.311.018

Влияние выбора опорной машины на результаты расчета переходных процессов по упрощенной модели электроэнергетической системы

Т.Ю. Фомина

ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ», г. Москва, Российская Федерация

E-mail: fominatu@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При использовании полной модели электроэнергетической системы, когда в уравнениях, описывающих цепи статора синхронных машин и элементы сети, учитываются электромагнитные переходные процессы, переход от одной опорной машины к другой не вносит погрешности в результаты расчета переходных процессов. При использовании упрощенных моделей энергосистемы эти результаты зависят от выбора опорной машины. В связи с этим необходима дополнительная оценка соответствующей погрешности.

Материалы и методы: Используются основные положения теории электромеханических переходных процессов, методы математического моделирования, методы решения систем нелинейных и линейных уравнений, теория дифференциальных уравнений.

Результаты: Проведены сопоставительные расчеты для тестовой схемы при использовании разных опорных машин для полной модели электроэнергетической системы и для модели без учета электромагнитных переходных процессов в обмотках статора и элементах электрической сети.

Выводы: Показано, что расхождения в результатах расчета, вносимые переходом от одной опорной машины к другой при пренебрежении электромагнитными переходными процессами в обмотках статора и элементах электрической сети, пренебрежимо малы.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, электромеханические переходные процессы, математическое моделирование, упрощенные модели.

The effect of choosing a reference machine on calculating transients according to a simplified model of the electrical power system

T.Yu. Fomina

OAO «Institut «ENERGOSETPROEKT», Moscow, Russian Federation

E-mail: fominatu@mail.ru

Abstract

Background: In a detailed power system model when electromagnetic transients in stator circuits of synchronous machines and network elements are taken into consideration; the transition from one reference machine to another does not change transient calculations results.

When simplified models are used, these results depend on the choice of a reference machine, which requires additional calculations of the current error.

Materials and methods: The study is based on applying the basics of the electromechanical transients theory, mathematical modeling techniques, methods of solving linear and nonlinear equations systems, and the theory of differential equations.

Results: The paper presents comparative calculations of a test power system using different reference machines for a detailed power system model and for a simplified model excluding electromagnetic transients in stator windings and electrical network elements from calculations.

Conclusions: It is shown that the discrepancies in the results of the calculations introduced by the transition from one reference machine to another, for the power system model neglecting electromagnetic transients in the stator windings and the electrical network elements being negligibly small.

Key words: electric power systems, electromechanical transients, mathematical modeling, simplified models.

В исследованиях динамической устойчивости электроэнергетических систем используется ряд математических моделей, характеризующихся разной степенью детализации. Необходимость упрощений математического описания вызвана не только сложностью уравнений, но и невозможностью получения в полном объеме достоверной информации, необходимой для их формирования.

Полная математическая модель электроэнергетической системы [1] включает в себя следующие блоки уравнений:

- 1) уравнения переходных процессов для синхронных машин;
- 2) уравнения переходных процессов для элементов электрической сети;
- 3) уравнения для узлов нагрузки;

- 4) уравнения балансов токов в узлах сети;
- 5) уравнения преобразования координат.

При записи уравнений переходного процесса для каждой из синхронных машин (блок уравнений 1) используется система координат (d, q) , вращающаяся с частотой ротора данной машины. Для элементов электрической сети (блоки уравнений 2–4) используется система координат (d_e, q_e) произвольно выбранной синхронной машины, называемой в дальнейшем опорной.

Полную модель энергосистемы рекомендуется использовать для расчета начала переходного процесса (на интервале от возмущения до 0,1–3 с) до затухания электромагнитных переходных процессов в обмотках статора и элементах электрической сети. Расчет по полной модели на первом этапе позволяет наиболее точно оценить колебания электромагнитных моментов синхронных машин и, соответственно, смоделировать процесс протекания электромеханического переходного процесса с минимальными погрешностями.

После затухания указанных электромагнитных переходных процессов допустимо переходить к расчету по упрощенной модели.

Однако, если задачей расчета является приближенная оценка динамической устойчивости системы, допускается сразу переходить к расчетам по упрощенной модели второго этапа, при этом погрешность расчета частот вращения роторов синхронных машин и взаимных углов остается незначительной.

В качестве опорной машины может быть принята любая синхронная машина системы. Таким образом, количество форм записи уравнений для электрической сети и нагрузок равно числу синхронных машин в системе.

ЭДС, наводимая в электрическом контуре, условно разделяется на две составляющие – ЭДС трансформации и ЭДС вращения [1, 2]. Значения составляющих ЭДС трансформации и ЭДС вращения в суммарной ЭДС зависят от выбора системы координат, в которой ведется анализ переходных процессов. ЭДС трансформации индуцируется и при взаимно неподвижных, и при взаимно перемещающихся обмотках, а ЭДС вращения проявляется только во взаимно

перемещающихся обмотках или при взаимном перемещении магнитопроводов.

При переходе от полной модели с одной опорной машиной к полной модели с другой опорной машиной меняется распределение составляющих ЭДС, при этом величина суммарной ЭДС остается неизменной, так как не зависит от выбранной системы координат. При преобразовании упрощенных моделей данное утверждение будет неверным, так как при пренебрежении любой из составляющих ЭДС суммарная ЭДС изменится. Упрощенные модели не являются строго подобными, и одну упрощенную модель нельзя получить из другой упрощенной модели.

Неучет электромагнитных процессов в статорных обмотках синхронных машин и в статических элементах электрической сети соответствует пренебрежению ЭДС трансформации. Значения составляющих ЭДС вращения при использовании разных опорных машин будут разными. Это относится только к элементам электрической сети, так как уравнения для статорных обмоток синхронных машин записываются в системе координат (d, q) каждой синхронной машины и не зависят от выбора опорной машины.

При использовании полной модели энергосистемы, когда в уравнениях, описывающих цепи статора синхронных машин и элементы сети, учитываются составляющие, соответствующие ЭДС трансформации и ЭДС вращения [1, 2], переход от одной опорной машины к другой не вносит погрешность в результаты расчета переходных процессов. Это, в частности, подтверждается результатами сопоставительных расчетов, выполненных при выборе различных опорных машин.

Для проведения расчетов в качестве тестовой схемы использована схема ЭЭС института «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ». ЭЭС состоит: из шести синхронных машин, моделирующих генераторы электростанций разной мощности и синхронный компенсатор; трансформаторов; линий электропередач; реактора и эквивалентных нагрузок, представляемых постоянными сопротивлениями (рис. 1).

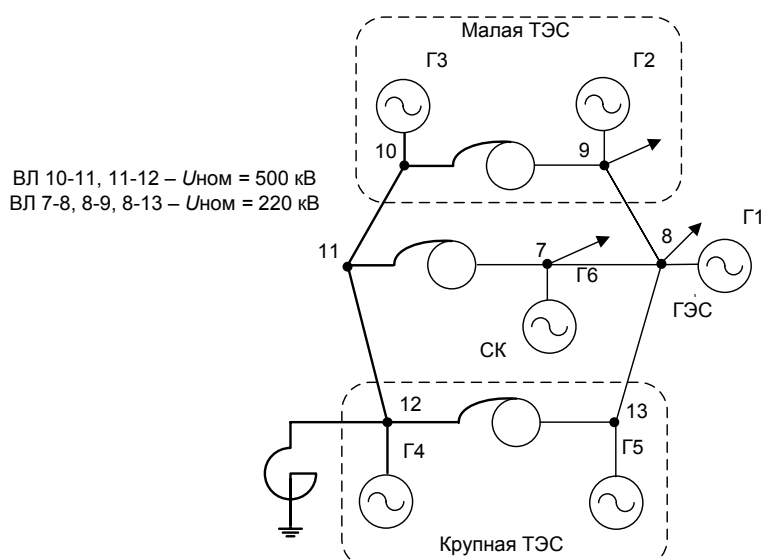


Рис. 1. Шестимашинная тестовая схема ЭЭС

Генератор Г1 тестовой схемы представляет мощную гидроэлектростанцию (1400 МВт), генераторы Г2 и Г3 моделируют тепловую электростанцию малой мощности (800 МВт), агрегаты которой работают на линии электропередачи разного номинального напряжения 500 и 220 кВ, генераторы Г4 и Г5 моделирует мощную тепловую электростанцию (2500 МВт), агрегаты которой также работают на линии электропередач разного напряжения, с помощью Г6 моделируются синхронные компенсаторы (200 Мвар), установленные на узловой подстанции. Особенностью схемы является удаленность мощной тепловой станции (Г4, Г5) от крупных узлов нагрузки 7, 8 и в связи с этим необходимость передавать большую мощность по относительно слабым связям (8–13, 11–12).

Переходный процесс в рассматриваемой электроэнергетической системе описывается системой алгебраических и дифференциальных уравнений. В качестве математической модели для синхронных машин используются уравнения Парка-Горева. Для расчета переходных процессов разработана программа на ЭВМ, реализующая неявный метод трапеций для алгебраизации дифференциальных уравнений на шаге интегрирования и метод Ньютона для решения системы нелинейных алгебраических уравнений. Для решения системы линеаризованных уравнений на каждом шаге метода Ньютона используется метод Гаусса, как наиболее простой, производительный и точный.

Для того чтобы повысить эффективность метода трапеций, для алгебраизации дифференциальных уравнений на первом шаге интегрирования применяется неявный метод Эйлера [3, 4].

На рис. 2 приведены результаты расчета переходных процессов по полной модели при

коротких замыканиях (КЗ) в разных точках энергосистемы при выборе в качестве опорной машины генератора большой мощности Г1 и синхронного компенсатора Г6. Трехфазное короткое замыкание моделировалось с помощью шунта малого сопротивления, который учитывался в сопротивлении нагрузки узла 7. Таким образом, приближенно моделировалось короткое замыкание в начале одной из отходящих от узла 7 линий электропередачи. Данное приближение позволяет моделировать существенно возмущенный режим, в котором частоты вращения роторов машин и взаимные углы между ними изменяются значительно.

На рис. 2 наглядно показано, что, хотя проекции вектора напряжения U_6 на оси (d , q) опорной машины зависят от выбора опорной машины, модуль вектора U_6 от выбора опорной машины не зависит.

При использовании упрощенных моделей, которые не учитывают в уравнениях, описывающих цепи статора синхронных машин и элементы сети, составляющие, соответствующие ЭДС трансформации, математическая модель электроэнергетической системы зависит от выбора опорной машины. Однако в [2], [5] для расчетов статической устойчивости было показано, что расхождения в результатах расчета, вносимые переходом от одной опорной машины к другой, пренебрежимо малы.

При расчетах динамической устойчивости расхождения, вносимые переходом от одной опорной машины к другой, также малы (не превышают 0,1 %), что подтверждается результатами расчетов с использованием упрощенной модели (рис. 3).

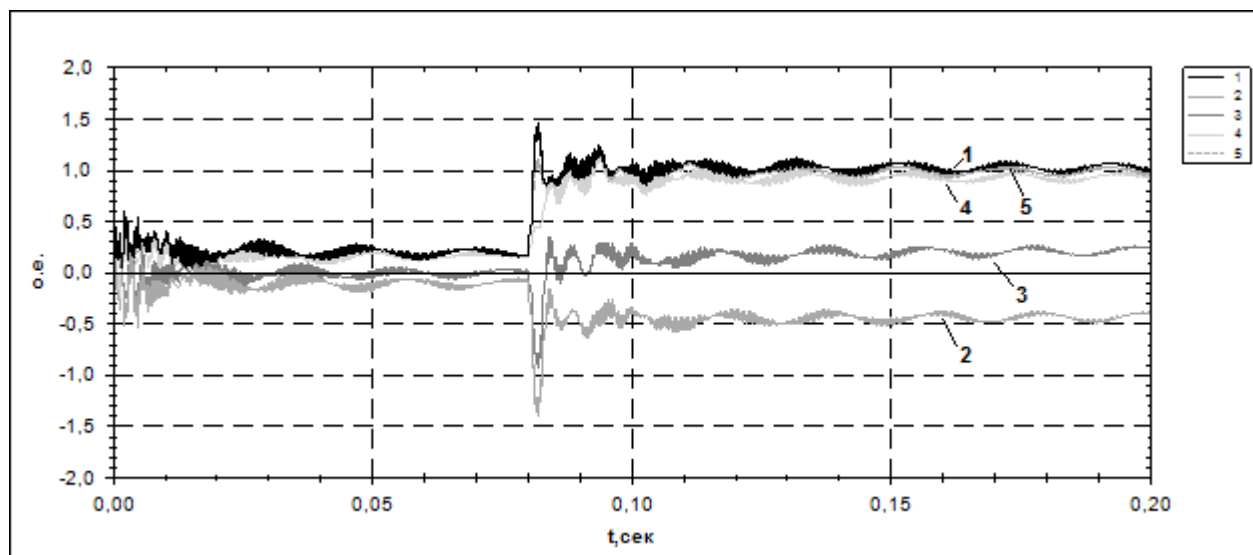


Рис. 2. Полная модель электроэнергетической системы. КЗ в узле 7 (длительность КЗ – 0,08 с, шаг интегрирования – 0,0001 с): 1 – U_{δ} опорная машина Г1, опорная машина Г6; 2 – $U_{\delta\delta}$ опорная машина Г1; 3 – $U_{\delta\delta}$ опорная машина Г6; 4 – $U_{\delta\delta}$ опорная машина Г1; 5 – $U_{\delta\delta}$ опорная машина Г6

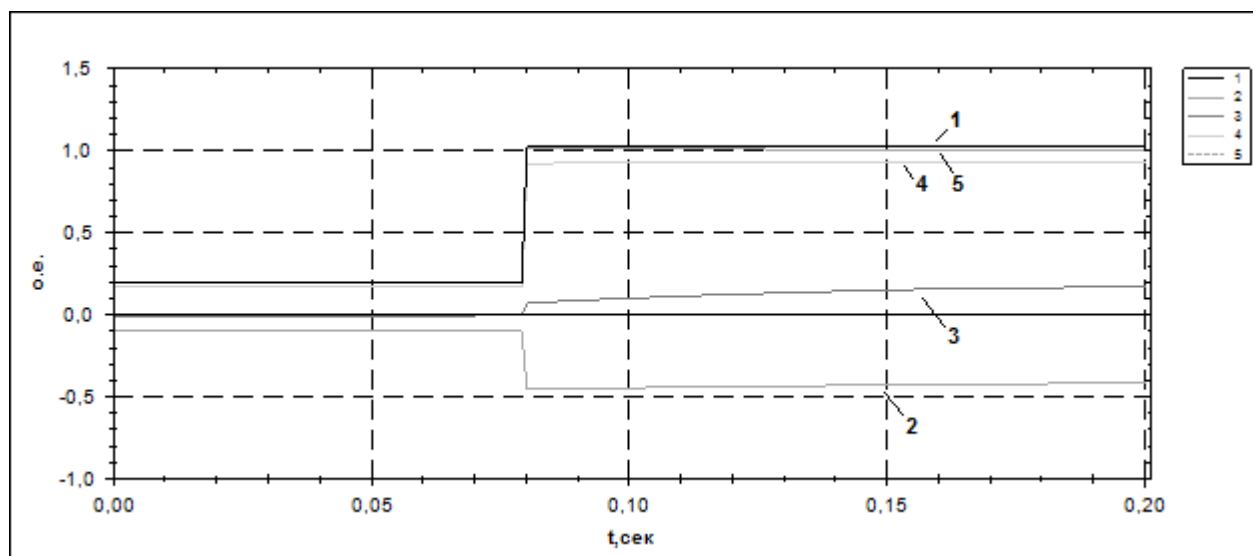


Рис. 3. Упрощенная модель электроэнергетической системы. КЗ в узле 7 (длительность КЗ – 0,08 с, шаг интегрирования – 0,0001 с): 1 – U_{δ} опорная машина Г1, опорная машина Г6; 2 – $U_{\delta\delta}$ опорная машина Г1; 3 – $U_{\delta\delta}$ опорная машина Г6; 4 – $U_{\delta\delta}$ опорная машина Г1; 5 – $U_{\delta\delta}$ опорная машина Г6

Это же относится и к расчетам длительных переходных процессов, в том числе с увеличенным шагом интегрирования.

Заключение

Путем проведения сопоставительных расчетов показано, что расхождения в результатах расчета электромеханических переходных процессов, вносимые переходом от одной опорной машины к другой при пренебрежении ЭДС трансформации в обмотках статора и элементах электрической сети, пренебрежимо малы (не превышают 0,1 %).

Список литературы

1. Строев В.А., Голов П.В. Модели для исследования переходных процессов в сложной регулируемой ЭЭС // Известия

Российской Академии наук. Энергетика. – 2010. – № 6. – С. 66–74.

2. Строев В.А. О взаимосвязи описаний электроэнергетических систем в исследованиях статической устойчивости // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1985. – № 3. – С. 41–49.

3. Жук Д.М., Маничев В.Б., Ильницкий А.О. Методы и алгоритмы решения дифференциально-алгебраических уравнений для моделирования систем и объектов во временной области // Информационные технологии. – 2010. – Ч. 1. – № 7. – С. 16–24; Ч. 2. – № 8. – С. 23–26.

4. Фомина Т.Ю. Расчет длительных переходных процессов в энергосистеме при моделировании регуляторов с помощью дискретной формы интеграла Дюамеля // Вестник МЭИ. – 2013. – № 4. – С. 83–89.

5. Недзельский И.С., Цукерник Л.В. Упрощенная методики расчета статической устойчивости энергосистемы с учетом вариации частоты. – Препринт 293. – Киев: ИЭД АН УССР 1982. – 33 с.

References

1. Stroeve, V.A., Golov, P.V. Modeli dlya issledovaniya perekhodnykh protsessov v slozhnoy reguliruemoy EES [Models for studying transients in complex regulated electric power systems]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 2010, issue 6, pp. 66–74.
2. Stroeve, V.A. O vzaimosvyazi opisaniy elektroenergeticheskikh sistem v issledovaniyakh staticheskoy ustoychivosti [On the link between the descriptions of electric power systems in static stability studies]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport*, 1985, issue 3, pp. 41–49.
3. Zhuk, D.M., Manichev, V.B., Il'nitskiy, A.O. Metody i algoritmy resheniya differentsial'no-algebraicheskikh uravneniy dlya modelirovaniya sistem i ob"ektov vo vremennoy oblasti [Methods and algorithms of solution of differential algebraic equations for modeling systems and objects in the time domain]. *Informatsionnye tekhnologii*, 2010, part 1, no. 7, pp. 16–24; part 2, no. 8, pp. 23–26.
4. Fomina, T.Yu. Raschet dlitel'nykh perekhodnykh protsessov v energosisteme pri modelirovanii regulyatorov s pomoshch'yu diskretnoy formy integrala Dyumelya [Calculation of long transients in electric power systems for modeling of regulators using the discrete form of the Duhamel integral]. *Vestnik MEI*, 2013, no. 4, pp. 83–89.
5. Nedzel'skiy, I.S., Tsukernik, L.V. *Uprashcheniya metodiki rascheta staticheskoy ustoychivosti energosistemy s uchetom variatsii chastoty* [Simplification of the calculation methods of static power system stability based on frequency variation]. Kiev, IED AN USSR, 1982. 33 p.

Фомина Татьяна Юрьевна,
ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»,
ведущий специалист инженерно-технического центра.
адрес: г. Москва, ул. Ткацкая, д. 1,
e-mail: fominatu@mail.ru