

УДК 621.318:621.313

Г.А. Евдокунин, Е.Н. Попков

ПРИНЦИПЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

G.A. Evdokunin, E.N. Popkov

CONCEPTS OF SIMULATION MODELLING OF PROCESSES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Рассмотрены принципы имитационного моделирования в электроэнергетических системах. Показаны проблемы моделирования, связанные с комплексным учетом подсистем, составляющих технологический процесс производства, передачи и распределения электрической энергии.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ. СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР. ТРАНСФОРМАТОР. ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.

This paper covers concepts of simulation modelling in electric power systems, problems of modelling, connected to the complex calculation of transient processes in subsystems, that form the technological process of generation, transmission and distribution of electrical energy.

SIMULATION MODELLING. ELECTRIC POWER PLANT. SYNCHRONOUS GENERATOR. TRANSFORMER. ELECTRIC POWER LINE.

Имитационное моделирование является практически единственным способом исследования больших электроэнергетических систем. Получение имитационной модели системы, последующее изучение и корректировка ее свойств позволяет обойтись без дорогостоящего физического моделирования.

Электроэнергетические системы содержат хотя и обширный, но ограниченный набор типовых элементов, обеспечивающих производство, преобразование, передачу, распределение электрической энергии и ее использование. С учетом возможного набора элементов имитационная модель электроэнергетической системы должна обеспечивать совместное моделирование процессов, протекающих как в силовой электрической части системы (в турбинах, генераторах, трансформаторах линиях электропередачи, нагрузках и др. оборудовании), так и в механических подсистемах, образованных соединением валопроводов вращающихся машин и приводных механизмов, подсистемах автоматики, управления и регулирования. Наличие транс-

форматорного оборудования предполагает необходимость совместного моделирования электрических процессов в силовой части и процессов в магнитных системах. Таким образом, имитационная модель электроэнергетической системы в общем случае должна допускать совместное моделирование процессов в силовой электрической части, в механических и магнитных подсистемах, в цепях регулирования и управления.

Получение имитационной модели системы весьма трудоемкий процесс, требующий высокой и всесторонней квалификации. В связи с этим заслуживают внимания работы, направленные на автоматизацию этого процесса [1].

Очевидно, что для успешного решения задачи получения имитационной модели необходима реализация принципа блочного построения имитационных моделей с использованием макромоделей типовых элементов электроэнергетических систем относительно внешних полюсов. При этом следует иметь в виду, что для одного и того же реального объекта в зависимости от решаемой задачи могут использоваться



различные макромодели. Так, например, синхронный генератор в моделируемой электроэнергетической системе может быть представлен как простейшим эквивалентом в виде системы соответствующих трехфазных электродвижущих сил за реактивностью, так и макромоделью, не имеющей других допущений по сравнению с полным описанием процессов в электрической машине, например, с использованием уравнений Парка–Горева. Получение макромодели синхронного генератора в последнем случае предполагает необходимость учета процессов в демпферных контурах, в обмотке возбуждения и моментов на валу. Напряжение возбуждения синхронного генератора может задаваться как воспроизведением подключенных устройств регулирования, так и алгоритмическим описанием регулятора. Аналогично, вращающий момент на валу генератора может задаваться либо моментно-скоростной характеристикой турбины, либо ее более подробной моделью с учетом необходимого регулирования. Отсюда следует, что в общем случае при разработке эквивалента типового элемента электроэнергетической системы могут использоваться схемы замещения, уравнения и алгоритмы.

Наличие в общем случае в составе электроэнергетической системы вентильных преобразовательных устройств, работающих совместно, например, с вращающимися машинами, предъявляет специфические требования к моделированию электрических машин. Поскольку для правильного отражения работы преобразователей необходимо определение мгновенных значений токов и напряжений для вентильных элементов, то при макромоделировании электрических машин нецелесообразно использовать традиционные $d, q, 0$ -координаты. Для исключения преобразования результатов численного решения уравнений, описывающих процессы в электрических машинах, и обеспечения возможности подключения к силовым электрическим полюсам машин любых других элементов моделируемой электроэнергетической системы естественным является использование фазных координат и получение эквивалента относитель-

но внешних выводов статорных обмоток. При таком подходе процессы в роторных контурах описываются дифференциальными уравнениями первого порядка, вид и способ решения которых не зависит от внешней схемы. Использование такой модели предполагает алгоритмический учет системы возбуждения. Если предполагается подключение устройств системы возбуждения, то макромодель электрической машины должна иметь выводы обмотки возбуждения. Потребность моделирования многомашинных агрегатов, протяженных валопроводов, а также двигателей в совокупности с приводными механизмами порождает образование механической подсистемы. С учетом электромеханической аналогии для моделирования процессов в механических подсистемах могут использоваться электрические схемы замещения с внешними полюсами возможного подключения макромоделей других элементов, содержащих механические подсистемы. Таким образом, макромодель электрической машины в общем случае может содержать схему замещения силовой подсистемы, систему дифференциальных уравнений и схему замещения механической подсистемы.

Если говорить о макромоделях трансформаторного оборудования электроэнергетических систем (повышающие и понижающие трансформаторы, трансформаторы с РПН, автотрансформаторы, управляемые шунтирующие реакторы различной конструкции и принципа действия, фазопоротные трансформаторы и др.), то они также должны быть реализованы в фазных координатах относительно внешних полюсов и допускать, если необходимо, задание нужной схемы и группы соединения обмоток. Могут использоваться как макромодели трехфазных групп однофазных трансформаторов, так и трехфазных трансформаторов с магнитной связью между обмотками. Необходимость воспроизведения различных режимов работы трансформаторного оборудования, включая и режимы, связанные с учетом насыщения магнитной системы, требует подробного учета конфигурации и состояния магнитопровода. Один из возможных способов такого уч-

та — совместное использование уравнений электрических цепей и схем замещения магнитной системы [2].

Моделирование линий электропередачи наиболее удобно проводить с использованием модальных преобразований, позволяющих моделировать процессы в независимых модальных каналах [3]. Поскольку процессы в линиях электропередачи имеют волновой характер, то метод «бегущих» волн является наиболее предпочтительным для анализа процессов в них. Алгоритм оперирует волнами тока и напряжения, движущимися в противоположных направлениях. Комбинация этих волн в каждом сечении линии определяет токи и напряжения, изменяющиеся во времени. Для граничных сечений токи и напряжения характеризуются взаимодействием входящих волн с подключенными электроэнергетическими объектами. Отсюда следует, что процессы, протекающие в линиях электропередачи и подключенных в граничных сечениях электроэнергетических объектах, не могут рассматриваться независимо. Поскольку макромодели электроэнергетических объектов, как следует из сказанного выше, имеют схемы замещения с сосредоточенными параметрами, то для воспроизведения влияния линий электропередачи в граничных сечениях целесообразно также использовать специальные схемы замещения, следующие из метода бегущих волн. Таким образом, макромодели линий электропередачи должны содержать схемы замещения для учета граничных сечений и алгоритмы, описывающие движение волн.

Соединение внешних полюсов макромоделей элементов исследуемой электроэнергетической системы приводит в общем случае к образованию расчетных схем силовой электрической, механической, магнитной подсистем и цепей регулирования.

Для расчетных схем силовой электрической подсистемы свойственна высокая степень идеализации. Как правило, в расчетных схемах не указываются активные сопротивления токоведущих частей, паразитные емкости оборудования, индуктивности ошиновки. Это с одной стороны облегчает

проведение анализа, поскольку позволяет пренебрегать малозначимыми процессами, а с другой стороны в системах с преобразовательными устройствами, содержащими идеальные ключи, приводит к новым проблемам.

Одна из проблем состоит в том, что в идеализированных расчетных схемах при коммутациях возможны мгновенные изменения напряжений конденсаторов и токов катушек индуктивности. Другая проблема состоит в появлении бесконечных по величине токов и напряжений, обусловленных коммутациями. Эти токи и напряжения учитывать необходимо, поскольку под их воздействием возможны каскадные коммутации ключевых элементов расчетной схемы.

Расчетные схемы механических подсистем, как правило, не велики по объему, отражают объединение элементов по валу и представлены совокупностью независимых компонент.

Расчетные схемы магнитных подсистем также представлены совокупностью независимых компонент и являются эквивалентами магнитопроводов трансформаторного оборудования. Для этих схем свойственна нелинейность некоторых ее элементов.

Цепи регулирования в общем случае представляются набором алгебраических и дифференциальных уравнений первого порядка относительно переменных состояния, вид и способ решения которых не зависит от схемы соединения макромоделей электроэнергетических объектов.

Опыт разработки макромоделей электроэнергетических объектов показывает, что расчетные схемы замещения подсистем могут быть построены из замкнутых и разомкнутых идеальных ключей, источников эдс и тока, резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и однофазных двухобмоточных идеальных трансформаторов. Поскольку расчетные схемы подсистем могут иметь произвольную структуру, то для получения математического описания процессов в них и в целом в исследуемой электроэнергетической системе следует использовать универсальную методику формирования уравнений [1].

На кафедре электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета под руководством и при непосредственном участии авторов разработаны как методики получения макромоделей типовых элементов электроэнергетических систем, так и универсальная методика формирования уравнений в расчетных схемах произволь-

ной конфигурации и на их основе создан вычислительный комплекс для имитационного моделирования процессов в электроэнергетических системах произвольной структуры из доступного набора макромоделей типовых элементов, который на протяжении ряда десятилетий успешно используется для исследования различных систем гражданского и специального назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коротков, Б.А.** Алгоритмы имитационного моделирования переходных процессов в электрических системах: Учеб. пособие [Текст] / Б.А. Коротков, Е.Н. Попков. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. — 280 с.
2. **Дмитриев, М.В.** Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы [Текст] / М.В. Дмитриев, А.С. Карпов, Е.Б. Шескин [и

др.]; Под ред. Г.А. Евдокунина. — СПб.: Родная Ладога, 2013. — 280 с.

3. **Евдокунин, Г.А.** Электрические системы и сети: Учеб. пособие для студентов электротехнических специальностей вузов [Текст] / Г.А. Евдокунин; Изд. 3-е, испр. и доп. — СПб.: ООО «Синтез Бук», 2011. — 288 с.

REFERENCES

1. **Korotkov B.A., Popkov E.N.** Algoritmyi imitatsionnogo modelirovaniya perehodnyih protsessov v elektricheskikh sistemah: Ucheb. posobie. — Leningrad: Izd-vo LGU, 1987. — 280 s. (rus)
2. **Dmitriev M.V., Karpov A.S., Sheskin E.B., Dolgoplov A.G., Kondratenko D.V.** Upravlyaemye podmagnichivaniem shuntiruyushchie reaktoryi; Pod

red. Evdokunina G.A. — St-Petersburg: Rodnaya Ladoga, 2013. — 280 s. (rus)

3. **Evdokunin G.A.** Elektricheskie sistemy i seti: Ucheb. posobie dlya studentov elektrotehnicheskikh spetsialnostey vuzov. — Izd. 3-e, ispr. i dop. — St-Petersburg: ООО «Sintez Buk», 2011. — 288 s. (rus)

ЕВДОКУНИН Георгий Анатольевич — профессор кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: evdg@telecom.spb.ru

EVDOKUNIN Georgy A. St. Petersburg State Polytechnical University.
195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

ПОПКОВ Евгений Николаевич — заведующий кафедрой электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, доцент.
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: ENPopkov@gmail.com

POPKOV Evgeny N. St. Petersburg State Polytechnical University.
195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.