

Проблемы расчёта потокораспределения при моделировании переходных процессов в электроэнергетических системах

- Тян Р.Л.¹, ЗАО “Монитор Электрик”
- Карасёв Е.Д., канд. техн. наук, ЗАО “Монитор Электрик”
- Будовский В.П., доктор техн. наук, ОАО “СО ЕЭС”

Сформулированы требования к режимному тренажёру диспетчера. Описаны принципы построения и сочетания динамических моделей энергосистемы для этапов интенсивных и вялых переходных процессов. Предложено расчёт режима электрической сети на начало тренировки и при вялотекущих процессах вести в пространстве логарифмов комплексных узловых напряжений. Расчёт токов в коммутационных аппаратах, объединённых в один расчётный узел, предложено свести к задаче минимизации длины вектора этих токов при условии соблюдения баланса токов в точках соединения полюсов аппаратов.

Ключевые слова: режимный тренажёр, электрическая сеть, расчёт режима, метод Ньютона, логарифмические полярные координаты, ток в выключателях.

В связи с увеличивающейся ролью Системного оператора в планировании и управлении режимами ЕЭС, обусловленной реструктуризацией энергетики России и переходом к рыночным формам взаимоотношений между участниками оптового рынка электроэнергии (ОРЭ), возрастает потребность в более качественных инструментах, облегчающих при отклонении режима от запланированного соблюдение интересов участников ОРЭ с учётом обеспечения потребителей электроэнергии в необходимом количестве и нужного качества.

Аварийное отключение станционного или сетевого оборудования, резкое изменение потребления, незапланированное изменение сроков ввода/вывода в ремонт и многое другое – причины, обуславливающие отклонение режима работы энергосистемы от запланированного. Роль диспетчеров Системного оператора в уменьшении ущерба от перечисленных неблагоприятных факторов сводится к быстроте и правильности действий по их устранению.

Реалии российского рынка электроэнергии требуют обязательного определения ущерба при каждом отклонении режима от запланированного для определения ответственности и степени возмещения ущерба.

Таким образом, минимизация ущерба от различных аварийных ситуаций претендует на то, чтобы стать объективным критерием качества работы диспетчеров Системного оператора. При этом, учитывая тот факт, что ситуаций, инициирующих отклонения режима, бесконечное множество, определить долю влияния Системного оператора на увеличение или снижение ущерба доста-

точно проблематично (исключая случаи явных и грубых ошибок диспетчерского персонала).

Этими факторами обусловлена необходимость применения Системным оператором новых технологий в подготовке диспетчерского персонала, в частности различных тренажёрных компьютерных систем, с большой степенью достоверности моделирующих переходные процессы в энергосистемах. Эти системы дают диспетчеру возможность рассмотреть на примере степень влияния различных, в том числе и очень редких, аварийных ситуаций на поведение контролируемой энергосистемы.

Кроме того, очень важно на этапе подготовки специалиста погружать его в учебную производственную среду, которая по возможности не должна отличаться от реальной производственной среды действующего диспетчерского центра.

С появлением диспетчерских тренажёров, с большой степенью достоверности моделирующих переходные процессы в энергосистемах большой размерности, предоставилась возможность проведения тренировочных занятий диспетчеров различных уровней иерархии диспетчерского управления, в которых диспетчеры совместно ликвидируют аварийную ситуацию, отрабатывая при этом вопросы взаимодействия и взаимопонимания.

Опыт проведения подобного рода тренировок показал, что сам оперативный персонал очень высоко оценивает их эффективность. В обычной оперативной работе диспетчеры разных уровней диспетчерского управления не имеют возможности наблюдать работу коллег, особенно более высоких уровней управления. В межсистемных тренировках, когда диспетчеры собираются для проведения занятия в центре тренажёрной подготовки, они

¹ Тян Роман Леонидович: tyan@monitel.ru



Рис. 1. Центры тренажёрной подготовки персонала Системного оператора (а) и ОДУ Волги (б), Запада (в), Сибири (г), Центра (д), Юга (е)

знакомятся с методами работы, логикой, тактикой и стратегией работы коллег, что улучшает взаимопонимание в ходе выполнения оперативной работы и, как следствие, приводит к более эффективной работе при ликвидации как тренировочных, так и реальных аварийных ситуаций в энергосистемах.

Исходя из опыта работы центров тренажёрной подготовки Системного оператора (рис. 1), можно сказать, что к важнейшим элементам “искусственной” рабочей среды учебного диспетчерского пункта следует отнести развитую имитационную

модель энергосистемы в диспетчерском тренажёре, которая позволяет моделировать все основные оперативные состояния энергосистемы, встречающиеся в противоаварийных тренировках. Для её создания необходимо включение в имитационную математическую модель энергосистемы тренажёра алгоритмов расчёта: установившихся электрических режимов энергосистемы; длительной (“медленной”) динамики, связанной с изменением частоты в энергосистеме; электромеханических переходных процессов.

Степень соответствия поведения имитационной математической модели энергосистемы процессам, происходящим в реальной энергосистеме, во многом определяет уровень “искусственной” рабочей среды тренажёрного комплекса. Требуется тщательная проработка технических требований к имитационной модели энергосистемы диспетчерского тренажёра и её элементам в части определения состава модели, типов процессов и оперативных состояний, которые необходимо моделировать, и, наконец, точности моделирования отдельных процессов, имитируемых в диспетчерской тренировке.

Опыт эксплуатации режимного диспетчерского тренажёра показывает, что моделирование уставившихся электрических режимов энергосистем должно выполняться особенно тщательно и точность должна быть такой, как у основных промышленных программ расчёта электрических режимов, применяемых Системным оператором. Наиболее часто в этих программах используются вычислительные процедуры на основе метода Ньютона, в котором установившийся электрический режим энергосистемы описывается уравнениями узловых напряжений в форме баланса как токов, так и мощностей. Нагрузка задаётся статической характеристикой^{*} мощности по напряжению: $S(|U|) = P + jQ = IU$. Функции модуля и сопряжения являются неаналитическими, поэтому вектор небалансов невозможно продифференцировать по вектору напряжения. Это вынуждает в методах второго порядка переходить на формулы с действительными и мнимыми частями, модулями и фазами напряжений. Они громоздки, изобилуют тригонометрическими функциями, на их вычисление уходит значительное процессорное время.

В данной работе предлагается использовать в качестве искомых переменных не комплексы узловых напряжений, а логарифмы от них – $\ln(U)$. Это упрощает формулы, предоставляет возможность выполнять значительную часть расчётов в комплексном виде.

Условимся впредь измерять напряжение каждого узла волях его номинального значения. Напряжение в киловольтах U_{abc} связем с напряжением в относительных единицах U формулой $U_{abc} = UV_n = V_n U$, где V_n – диагональная матрица номинальных напряжений. Введённые таким способом относительные единицы гарантируют близость к единице расчётных значений уровней напряжения в нормальных режимах.

Обозначив $Y = V_n UV_n$ и $I = V_n I_{abc}$, получим уравнение баланса в форме

$$\Delta I = YU - I.$$

Размерность матрицы Y и вектора токов I в этом уравнении – мегавольт-амперы.

Фаза θ напряжения U – это мнимая часть его логарифма, модуль – экспонента от вещественной части той же аналитической функции:

$$E = \ln(U) = v + j\theta = \ln(U) + j\arg(U).$$

Таким образом, если вместо модуля напряжения использовать его логарифм, то переход к такого рода полярным координатам из декартовых будет задаваться аналитической функцией. Назовём эти координаты логарифмическими полярными.

Плоскому старту в этой системе координат соответствует $E = 0$. В логарифмических полярных координатах сетевая мощность YU становится дифференцируемой функцией искомых переменных E :

$$\Delta(YU) = \Delta(Ye^E) = Y\Delta(e^E) = Ye^E_{\text{диаг}} \Delta E = YU_{\text{диаг}} \Delta E.$$

Мощность нагрузки, определяющая ток инъекции, – это дифференцируемая функция от $\text{Re}(E)$, а не от E , поэтому её нельзя проинтегрировать по искомой переменной E . Все компоненты формулы небаланса рассматриваются не как комплексные числа, а как вещественные, причём каждое комплексное число векторе токов, напряжений, мощностей в матрице проводимостей можно заменить 2×2 блоком вида:

$$\begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_I a + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_J b = Ia + jb$$

Алгебра матриц такого вида изоморфна алгебре комплексных чисел $a + jb$ (где a и b – вещественные скаляры).

Тригонометрические функции в выражениях для расчёта режима при таком подходе отсутствуют. Вместо них для каждого узлового напряжения нужно рассчитать $U = e^E$, т.е. вычислить единственную комплексную экспоненту, что требует гораздо меньшего времени, чем расчёт матрицы Якоби в обычных полярных координатах (там тригонометрические функции пришлось бы вычислять и для недиагональных блоков).

Следующая проблема моделирования режима энергосистемы связана с тем, что на разных этапах противоаварийной тренировки переходные процессы в электроэнергетической системе характеризуются различной интенсивностью [2]. Так, пока частоты вращения генераторов близки, их различием можно пренебречь, считая, что все машины синхронной зоны ускоряются в равной мере из-за несоответствия генерации в энергосистеме потреблению. Для воспроизведения перед диспетчером спокойного поведения энергосистемы можно отказаться и от описания динамики регулирования возбуждения синхронных машин. Такие процессы быстротечны, и можно считать, что характеризующие их переменные успевают меняться син-

хронно с медленным изменением частоты, состояния первичных двигателей и систем управления расходом энергоносителя в них. Эти известные приёмы значительно упрощают дифференциальные уравнения динамики, позволяя кратко усокрить расчёты.

Когда же переходные процессы интенсивны, такого рода упрощения неприемлемы. Они, например, не позволяют воссоздать асинхронный ход, когда частоты вращения машин различны по определению.

Рост вычислительной сложности задачи может сделать невозможным воспроизведение в реальном времени процессов в системе, содержащей несколько тысяч расчётных узлов, поэтому оправдано сочетание в тренажёре одновременно двух моделей: упрощённой, где это возможно, и более полной, когда того требует ситуация. Электрическая сеть в каждой модели описывается различными уравнениями, методы расчёта режима которых также существенно различаются.

При вялотекущих процессах механическая мощность, развиваемая турбиной, преобразуется в электрическую мощность лишь частично, другая доля уходит на изменение кинетической энергии вращающихся масс ротора. Условие баланса моментов на валу ротора синхронной машины имеет вид:

$$Jd\omega/dt = M_t - M_s,$$

где ω – угловая скорость машины; J – момент инерции вращающихся масс; M_t – момент, развиваемый турбиной; M_s – момент электромагнитного торможения током нагрузки.

Перейдём к традиционно используемой в электроэнергетике системе единиц и параметров: момент инерции J заменим пропорциональной ему постоянной времени T_J ; ускоряющие моменты – мощностями; угловую скорость ω – частотой f , измеряемой в долях номинальной, $-\omega/\omega_{\text{ном}} = f/f_{\text{ном}}$.

$$\left(\frac{J\omega_{\text{ном}}^2}{S} \right) \overbrace{\omega}^{T_J} \frac{d}{dt} \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{P_t}{\omega M_t} - \frac{P_s}{\omega M_s};$$

$$\underbrace{S_{\text{ном}} T_J f}_{k} \overbrace{\frac{df}{dt}}^{\varepsilon} = k\varepsilon = P_t - P_s.$$

В стационарном режиме $\varepsilon = 0$ и вся вырабатываемая генератором мощность поступает в сеть. В переходных режимах на каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений вычисляется мощность P_t , развивающаяся турбиной, и именно она, а не $P_s = \text{Re}(UI)$ задаётся при расчёте режима сети.

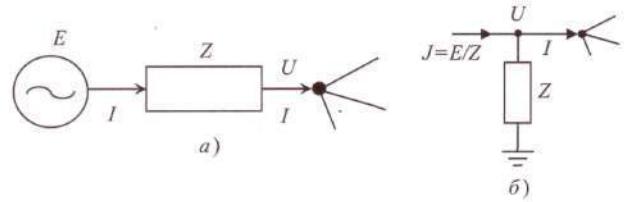


Рис. 2. Схемы замещения синхронных машин при интенсивных переходных процессах

Общее уравнение баланса мощностей в узлах сети можно записать в виде:

$$k\varepsilon = \overset{*}{S} - \overset{*}{U}_{\text{diag}} YU,$$

где Y – матрица узловых проводимостей сети; U – вектор узловых напряжений; $\overset{*}{S}$ – вектор сопротяжённых мощностей инъекции в узлы (генерация минус нагрузка), в котором активная мощность генераторных узлов заменена суммарной мощностью турбин энергоагрегатов, генераторы которых подключены к соответствующим узлам; для негенераторного узла i $k_i = 0$.

Единое для всех синхронных машин ускорение ε при расчёте режима выполняет ту же функцию, что и частота f , когда за счёт чувствительности к ней оборудования балансируется режим. Режим рассчитывается методом Гаусса – Ньютона.

При интенсивных переходных процессах синхронные машины представляются сверхпереходной ЭДС за сверхпереходным сопротивлением, как показано на рис. 2, *a*, или, что эквивалентно, источником тока, как показано на рис. 2, *б*. Считается, за время между расчётами режима сети E и J не успевают измениться.

Ограничения по реактивной мощности для синхронных машин в пределах шага интегрирования не контролируются – ограничивающее воздействие регулятора учитывается пересчётом ЭДС на этапе решения дифференциальных уравнений.

Проводимость нагрузки рассчитывается с учётом её статической характеристики по формуле

$$y_n = \frac{\overset{*}{S}_n}{|U_n|^2}$$

не на каждом шаге интегрирования, а лишь эпизодически. Режим рассчитывается Z -методом. Проводимость нагрузки учитывается в матрице Y сети, а ток, не учтённый ею, рассматривается как ток инъекции, подлежащий уточнению по ходу итераций при расчёте режима. Именно наличием этого тока обусловлена нелинейность узловых уравнений и итеративный характер метода решения. Пока этот ток невелик, итерации сходятся быстро. Как только сходимость ухудшается, проводи-

ности нагрузки пересчитываются, и это сопровождается повторной факторизацией матрицы Y .

Переключение между моделями вялых и интенсивных переходных процессов позволяет использовать преимущества каждой из них, обеспечивая приёмлемый компромисс между надёжностью, точностью и быстродействием.

Ещё одна проблема при моделировании режимов – определение перетоков мощности и токов в коммутационных аппаратах (КА).

Исходными данными режимного тренажёра диспетчера является полная модель оборудования в формате CIM (Common Information Model). Ввиду того, что в процессе тренировки диспетчер производит много переключений, коммутационные схемы подстанций в модели практически полностью повторяют коммутационные схемы подстанций в реальной энергосистеме при практически полном отсутствии информации о характеристиках КА.

Этот факт приводит к сильному увеличению числа узлов и ветвей в расчётной модели шина-ветвь за счёт транзитных узлов и ветвей с близким к нулю сопротивлением.

Существует несколько подходов к расчёту режима по модели шина-ветвь, где присутствуют ветви с близким к нулю сопротивлением.

Ввиду того, что сопротивление коммутационных аппаратов близко к нулю и влияние этого сопротивления на режим незначительно, сопротивление КА принимается равным нулю и узлы, соединяемые КА, считаются узлами равного потенциала. Это даёт возможность исключить КА из расчётной модели и создать эквивалентный узел, инъекция мощности которого равна сумме инъекций мощности узлов исключаемого КА.

На практике, как правило, необходимо определять ток (переток мощности) в секционных или обходных выключателях подстанции.

Для расчёта токов по КА необходимо сформировать схему топологического узла, представив каждый коммутационный аппарат сопротивлением. Все сопротивления – одинаковы. Соотношения между R и X можно принять любыми. Значения тоже могут быть любыми. Положим

$$Z_{KA} = \text{Re}(Z) = R = 1 \text{ Ом.}$$

В схеме обязательно один из полюсов надо назначить базисно-балансирующим. Это может быть любой смежный с внешней сетью узел, даже тот, инъекция в который нулевая.

Уравнения для расчёта токов ветвей таковы:

$$\mathbf{I}_y = M\mathbf{I}_B;$$

$$\mathbf{U}_B = M'U_y;$$

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{U}_B,$$

где \mathbf{I}_B – токи ветвей; \mathbf{U}_B – напряжения ветвей; \mathbf{I}_y – токи инъекции в независимые узлы; \mathbf{U}_y – напряжения независимых узлов по отношению к базисному; M – матрица соединения ветвей в узлы; апострофом обозначено транспонирование.

Поскольку все проводимости приняты единичными, получаем:

$$\mathbf{I}_y = M\mathbf{U}_B;$$

$$\mathbf{I}_y = MM'\mathbf{U}_y;$$

$$\mathbf{U}_y = (MM')^{-1}\mathbf{I}_y;$$

$$\mathbf{I}_B = M'(MM')^{-1}\mathbf{I}_y = M^+\mathbf{I}_y;$$

$$M^+ = M'(MM')^{-1}.$$

Таким образом, токи ветвей можно получить путём формирования первой матрицы инцидентий, её псевдообращения и умножения на вектор токов инъекций в независимые узлы.

Эта операция может выполняться для любого числа топологических узлов и в любом порядке. Кроме того, матрица M^+ формируется один раз, при создании топологического узла, и используется многократно.

Предложенные методы были реализованы в режимном тренажёре диспетчера “Финист”. Промышленная и опытно-промышленная эксплуатация его в ОДУ и исполнительном аппарате Системного оператора ЕЭС России продемонстрировала высокую надёжность и скорость расчёта режима.

Список литературы

- Карасёв Е. Д., Тян Р. Л. Логарифмические полярные координаты для расчёта режима электрической сети процедурами ньютоновского типа. – Сборник трудов XI Международной научной конференции “Системы компьютерной математики и их приложения”. Смоленск, 2010.
- Карасёв Е. Д., Тян Р. Л. Адаптация расчёта режима сети к разнотемповости процессов в энергосистеме для режимного тренажёра диспетчера “Финист”. – Оперативное управление в электроэнергетике, 2011, № 6.