УДК 621.311.1.004.13

АЛГОРИТМ УЧЕТА РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭДС В ВЕТВЯХ ПРИ РАСЧЕТЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

А.А. Кудашева, Б.Г. Булатов

Приведена матричная модель расчета режима сети с продольными ЭДС на основе узловых уравнений и алгоритм, реализованный в среде LabVIEW. Исследованы степени влияния на режим и возможности использования в сетях с активно-адаптивными элементами.

Ключевые слова: активно-адаптивная сеть, матричный метод, учет ЭДС ветвей.

В октябре 2011 по заказу ПАО «ФСК ЕЭС» была разработана концепция развития интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. Внедрение новых технологий на базе силовой электроники и полупроводниковых преобразователей является сегодня одной из основных задач электроэнергетики. Новейшие технологии, обеспечивающие адаптацию характеристик оборудования к режимной ситуации и позволяющие сетям активно взаимодействовать с генерацией и потребителями, создают эффективную функционирующую систему. Электрическая сеть, представляемая пассивным устройством транспорта и распределения электроэнергии, становится активным элементом, параметры которого могут регулироваться в соответствии с изменением состояния сети [1]. Сегодня на электрические сети возлагается задача обеспечения технических условий для обязательного выполнения договорных объемов поставок электроэнергии и мощности субъектам рынка.

Существующие программы анализа стационарных режимов, основанные на системе узловых уравнений, позволяют учитывать влияние на режим тех активно-адаптивных элементов, которые подключаются к узлам электрической сети. Так могут рассматриваться режимы работы сети с УШР, ИРМ, СТК и передачей постоянного тока [2].

Для оптимального управления потоками в ветвях электрической сети могут использоваться эффективные средства, влияющие на контурные потоки. Одним из таких устройств является управляемый регулятор мощности, который позволяет вводить ЭДС в линию и регулировать ее. Очевидный алгоритм учета таких ЭДС может строиться на базе контурных уравнений, дополняющих систему узловых уравнений.

Ниже рассмотрен матричный алгоритм, позволяющий учитывать действие ЭДС в ветвях эквивалентным действием узловых токов по концам ветви [3]. Алгоритм реализован для сети одного класса напряжения. В состав исходных данных для расчетов режима входят: количество узлов $n_{\text{узл}}$ и ветвей $n_{\text{ветв}}$, NK – двухмерный массив узлов начала и конца ветвей, $\dot{Z}_{\text{ветв}}$ – одномерный массив сопротивлений, $\dot{S}$ – одномерный массив узловых мощностей, u_0 – напряжение балансирующего узла, Ė – ЭДС в ветвях.

Алгоритм показан на рис. 1.

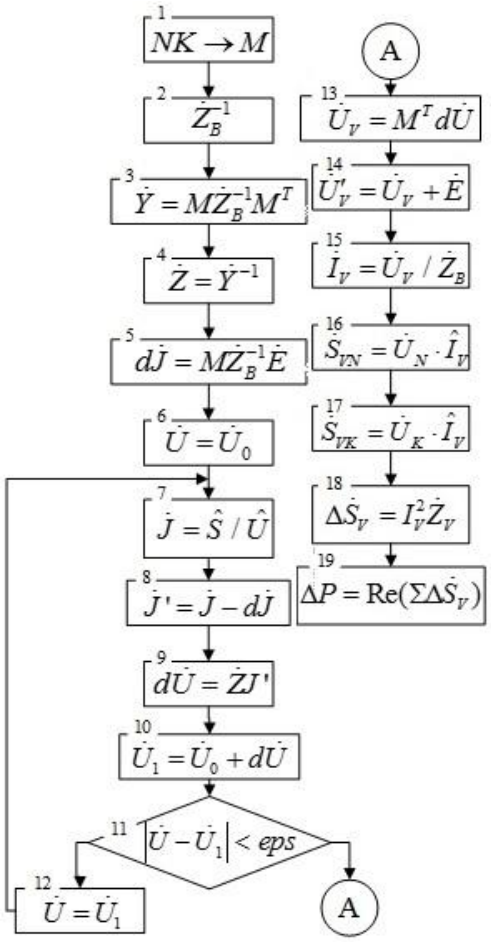

Рис. 1. Алгоритм учета ЭДС

Блоки алгоритма реализуют следующие функции:

1. Формирование матрицы *M*.
2. Формирование диагональной матрицы.
3. Формирование матрицы узловых проводимостей.
4. Обращение матрицы узловых проводимостей.
5. Замена $\dot{E}$ эквивалентными узловыми токами.
6. Исходное приближение узловых напряжений.
7. Замена S сопряженным током узлов.
8. Корректировка $\dot{J}$ для учета влияния ЭДС.
9. Определение напряжений относительно БУ.
10. Определение $\dot{U}_1$.
11. Сравнение полученного напряжения с напряжением на балансирующем узле.

12. Если условие не выполнятся: $\dot{U}_1$ принимается как базисное и цикл повторяется.
13. Если «да»: определение напряжения ветвей.
14. Выделение в ветви с ЭДС ΔU на Z_V.
15. Определение токов ветвей.
16. Определение мощности в начале ветви.
17. Определение мощности в конце ветви.
18. Потери мощности в ветвях.
19. Общие потери активной мощности.

Алгоритм реализован в программной среде LabVIEW. Для проверки алгоритма рассмотрена простейшая тестовая сеть (рис. 2).

Фронтальная панель виртуального устройства показана на рис. 3.

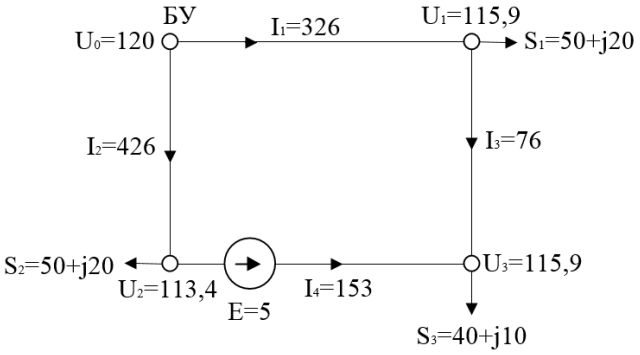

Рис. 2. Схема тестовой сети

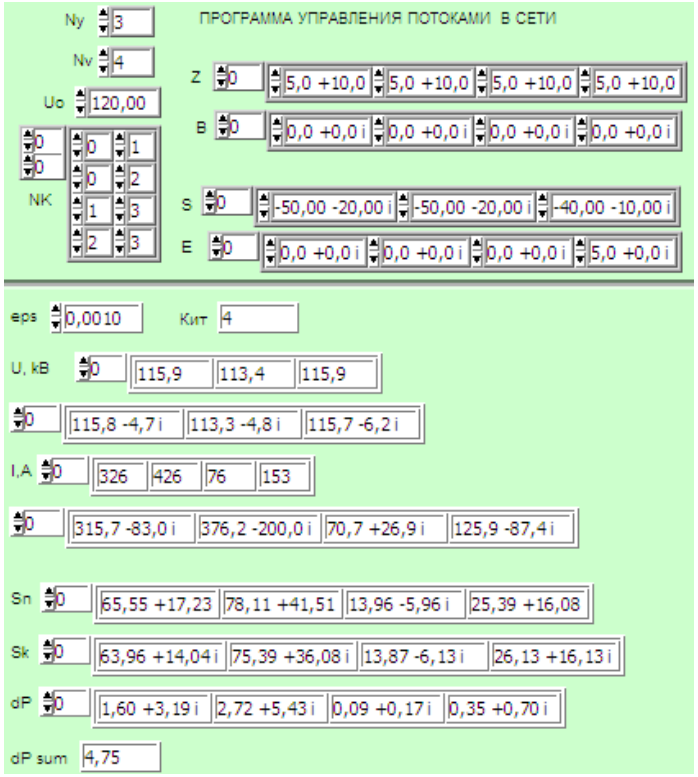

Рис. 3. Фронтальная панель

В верхней части панели показаны исходные данные для этой тестовой сети. Массив NK определяет конфигурацию сети, узловые мощности для генерации положительны, для нагрузок отрицательны. ЭДС E_4=5+0i включена только в одной ветви.

В нижней части приведены результаты расчета режима: напряжения в узлах, токи ветвей, потоки мощности в начале и конце ветвей, потери.

Алгоритм расчета строится как итерационный процесс определения напряжений в узлах, по которым рассчитываются узловые токи с учетом ЭДС ветвей и определяется очередное приближение вектора напряжения. Этот расчет оформлен в виде подпрограммы, алгоритм которой показан на рис. 4.

Алгоритм расчета режима приведен на рис. 5. Расчет начинается с формирования по введенной информации о параметрах сети матрицы M соединений узлы-ветви и диагональной обращенной матрицы сопротивлений ветвей. Затем в цикле с выходом по условию формируется итерационный процесс определения узловых напряжений. Критерием окончания является достижение точности eps.

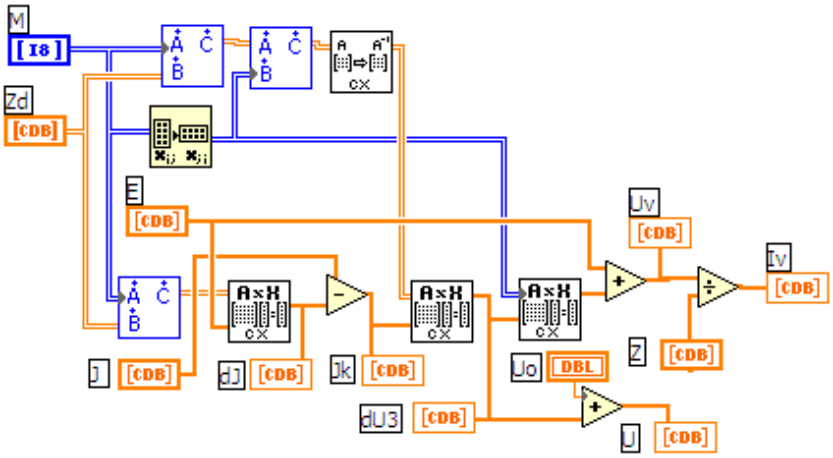

Рис. 4. Алгоритм расчета U по J

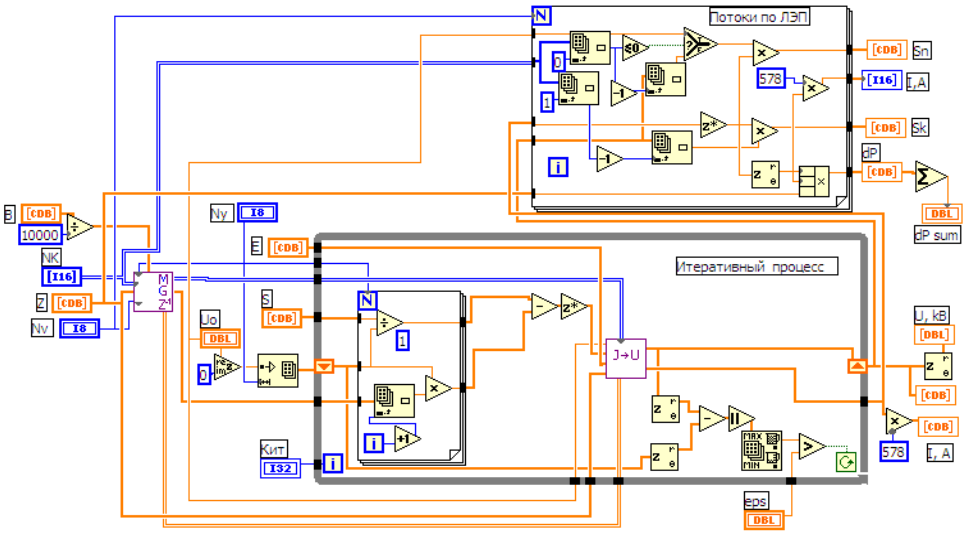

Рис. 5. Программа расчета режима сети с ЭДС

После выхода из итерационного процесса и выдачи данных по напряжениям в узлах формируется новый цикл определения параметров режима по ветвям.

Для тестовой сети, в которой изменены сопротивления с отношением $X/_R$ от 0,5 до 2,0, определены графики зависимостей уравнительных токов и потерь мощности от ЭДС. При регулировании ЭДС в интервале ±5 кВ ток меняется в диапазоне 0÷120 А, то есть существенно влияет на распределение потоков мощности. Диапазон изменения потерь при этом составляет около 12 % при регулировании действительной составляющей $\dot{E}_a$, а при мнимой $\dot{E}_\tau$ диапазон еще шире (рис. 6).

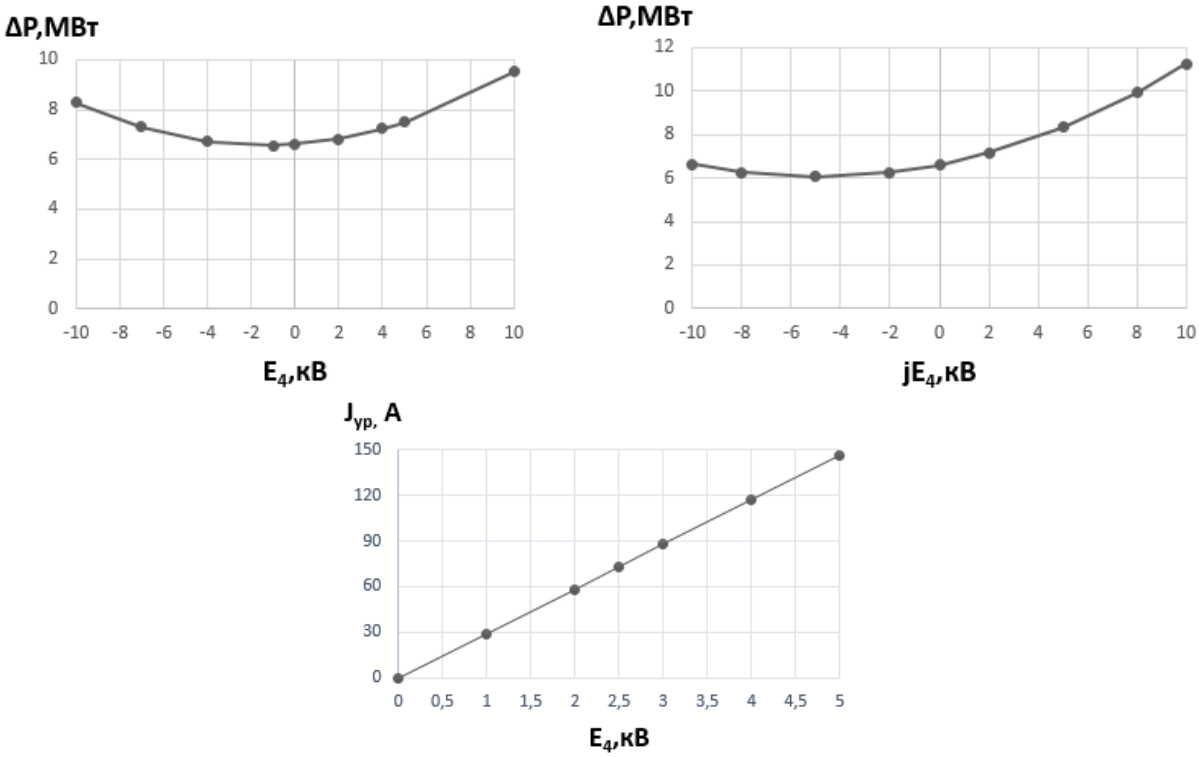

Рис. 6. Зависимости ΔP и $I_{УР}$ от ЭДС E_4

Заключение. Предложенный алгоритм позволяет учитывать влияние ЭДС в ветвях путем корректировки метода узловых уравнений без учета матрицы ветви-контуры. Алгоритм может использоваться для целей оптимизации режимов сети, для снятия перегрузки по току ветвей, для выбора мест размещения источников ЭДС и регуляторов мощности в электрических сетях.

Библиографический список

1. Веников, В.А. Электрические системы. Режимы работы электрических систем и сетей: учебное пособие для электроэнергетических вузов / В.А. Веников, Л.А. Жуков, Г.Е. Поспелов. – М.: Высшая школа, 1975. – 344 с.

2. Булатов, Б.Г. Моделирование передач и вставок постоянного тока на базе преобразователей напряжения в программах расчета длительных режимов энергосистем / Б.Г. Булатов, М.Е. Гольдштейн, Н.В. Корбухов // Электрические станции. – 2015. – № 9. – С. 49–52.

3. Мельников, Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей / Н.А. Мельников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1972. – 232 с.

К содержанию