

Определение управляющих воздействий в узлах при выходе режима за пределы области существования

А.В. ПАЗДЕРИН, С.В. ЮФЕРЕВ
УрФУ, УралЭНИН, кафедра АЭС
Россия
avpazderin@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Установившийся режим, предельный режим, область существования.

1 ВВЕДЕНИЕ

Задача расчета установившегося режима (УР) является базой, на основе которой решаются другие более сложные задачи управления функционированием и развитием электроэнергетических систем (ЭЭС). Сложность задачи расчета УР связана с нелинейностью системы уравнений УР и ее большой размерностью, что требует использования итерационных численных методов решения. Основной проблемой при расчете УР является вопрос существования решения и сходимости итерационного процесса. При наличии шин бесконечной мощности возможность расчета УР дает ответ на вопрос об устойчивости режима работы ЭЭС. Разработка методов и алгоритмов расчета УР, обеспечивающих надежную сходимость к решению, является по-прежнему актуальной задачей. Актуальность этого также связана с желанием гарантированного получения решения, которое находилось бы на границе области существования решения, в ситуации, когда заданные узловые мощности лежат за пределами области существования решения и требуется ввод режима в эту область. Особую актуальность для противоаварийного управления имеет задача расчета предельных по условиям устойчивости режимов ЭЭС. По мере утяжеления режима ухудшается степень обусловленности уравнений УР, что вызывает значительные вычислительные сложности. В действующих в настоящее время алгоритмах централизованной противоаварийной автоматики используются упрощенные методы оценки устойчивости и оценки ее запасов, так как вычислительные ресурсы современных ЭВМ не позволяют пока реализовать алгоритмы, использующие классические подходы к расчету предельных режимов.

В представленной статье рассматриваются возможности обобщенного метода Ньютона для задач расчета установившихся режимов, ввода режима в область существования по оптимальной траектории, расчета предельного режима, оценки запаса статической устойчивости УР.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Систему уравнений УР в общем виде можно записать как:

$$\bar{W} - W(X, Y) = 0, \quad (1)$$

где $\bar{W}$ - вектор заданных для расчета параметров режима. При расчете УР в каждом узле кроме балансирующего задается активная и реактивная мощность. В генераторных узлах может фиксироваться модуль напряжения. $W(X, Y)$ - нелинейная вектор-функция. Переменные Y определяют условно-постоянные параметры, связанные со схемой замещения электрической сети. Вектор X - искомый вектор состояния, в качестве которого обычно рассматриваются

комплексы узловых напряжений. Известны различные формы записи уравнений установившегося режима. Обычно это уравнения узловых напряжений в форме баланса мощностей или в форме баланса токов. Комплексные величины в этих уравнениях могут представляться в полярной или прямоугольной системе координат, что приводит к достаточно большому многообразию форм записи уравнений УР.

Другой путь решения задачи расчета УР связан с поиском нулевого минимума целевой функции суммы квадратов невязок уравнений УР [2]:

$$F = [\bar{W} - W(X, Y)]^T [\bar{W} - W(X, Y)] \quad (2)$$

Такая постановка задачи достаточно близка к задаче расчета УР по данным телеизмерений, то есть к задаче оценивания состояния (ОС) [3]. В задаче ОС целевая функция включает квадраты невязок не только узловых мощностей, но и уравнений для перетоков мощности по ветвям, токов и модулей узловых напряжений. Число квадратичных невязок, формирующих целевую функцию задачи ОС, может превосходить размерность вектора состояния X . Решение задачи ОС не обязательно связано с нулевым значением минимизируемой функции. В задаче расчета УР число квадратичных невязок в точности равно числу искомых переменных. В случае, когда исходные данные несовместны, то есть не существует решения (1) с нулевыми невязками, использование целевой функции (2) может позволить получить приближенное решение (1) с наименьшим несоответствием между расчетными $W(X, Y)$ и заданными $\bar{W}$ узловыми мощностями. Такое решение интересно тем, что позволяет оценить, насколько заданный вектор исходных данных выходит за границы области существования решения. Ненулевые невязки узловых мощностей можно рассматривать в качестве управляющих воздействий для перевода режима на границу области существования режима.

Минимум функции (2) достигается в точке, где производные по всем искомым переменным равны нулю:

$$dF/dX = -2dW/dX \cdot [\bar{W} - W(X)]^T = 0. \quad (3)$$

Для решения задачи необходимо решать нелинейную систему уравнений (3). Если для решения (3) использовать метод Ньютона, то возникающая на каждом шаге итерационного процесса система линейных уравнений (СЛУ) будет содержать вторые производные от целевой функции $G = d^2F/dX^2$, то есть являться матрицей Гессе. Такой подход к задаче расчета УР, когда на каждой итерации решается СЛУ с матрицей Гессе, называется обобщенным методом Ньютона [1]

$$G \cdot \Delta X = -dF/dX. \quad (4)$$

В ходе работы были исследованы результаты сходимости ОМН с полной матрицей Гессе при расчете режимов, задаваемых узловыми мощностями, которые находились за пределами области существования решения. Расчеты проводились на основе программы Mathcad для сети из трех узлов, параметры которой представлены на рис.1. Модули напряжений в узлах 1 и 2 были зафиксированы, при этом $X = \{\delta_1, \delta_2\}$.

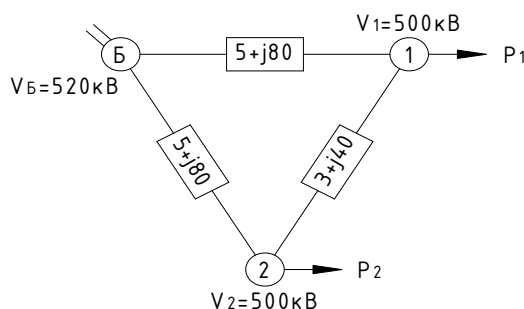


Рис. 1: Расчетная схема

На рис. 2 в координатах δ_1 - δ_2 представлена граница области существования решения УР, соответствующая положительному значению определителя матрицы Якоби:

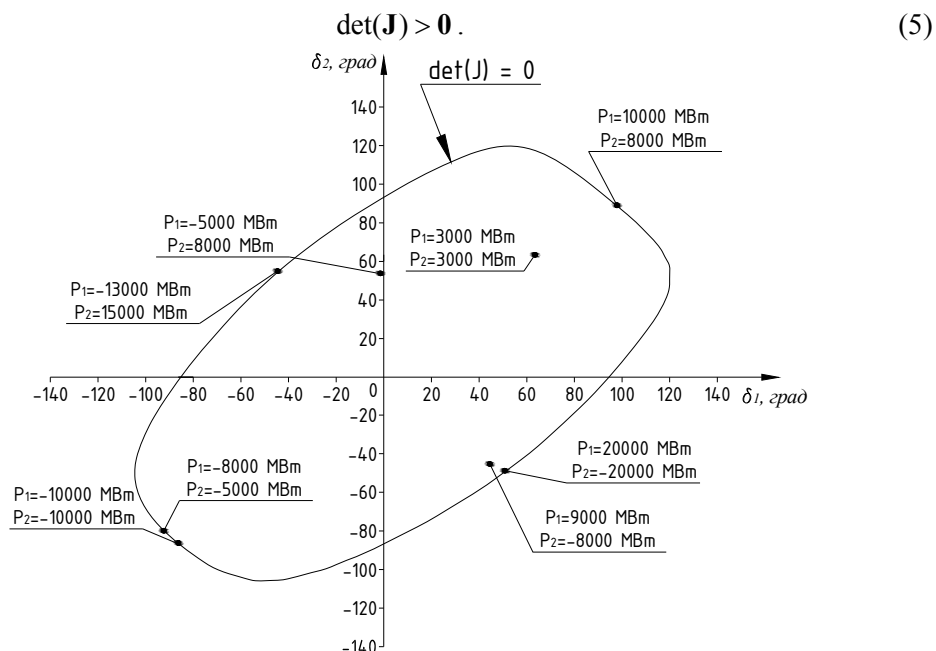


Рис. 2: Область устойчивости

В результате итерационного расчета УР на основе ОМН были получены значения углов, соответствующих заданным на рис.2 мощностям (генерация – положительная, нагрузка – отрицательная). Для режимов, находящихся внутри области существования, целевая функция (2) сводилась к нулю. Для режимов, находящихся на границе области существования, расчетные значения P_1 и P_2 отличались от заданных, которые выходили за пределы области существования, и целевая функция (2) до нуля сведена не была.

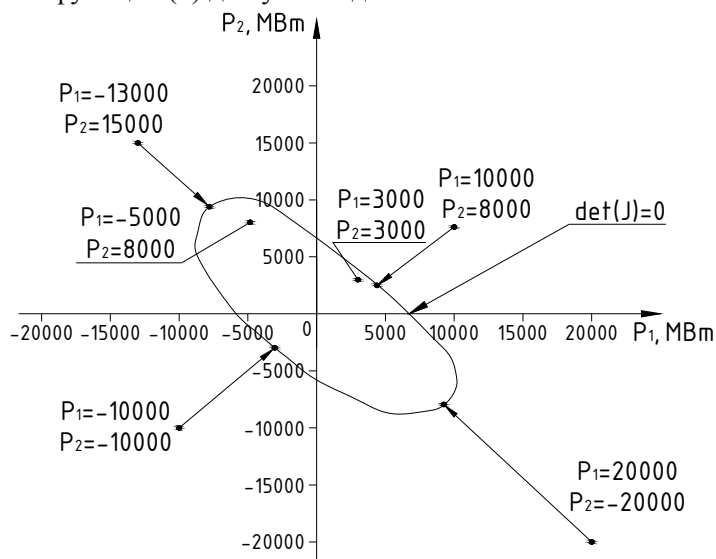


Рис. 3: Границы области существования решения

На рис.3 представлено отображение области существования, соответствующей условию (5), и всех девяти режимов из координат δ_1 - δ_2 в координаты P_1 - P_2 . Режимы, которые попали на предельную поверхность (5), были заданы мощностями, находящимися за пределами области существования. В результате расчета УР на основе ОМН, когда на каждой итерации решается СЛУ (4) с полной матрицей Гессе, итерационный процесс автоматически сходится к ближайшему предельному режиму. Замечательным свойством матрицы Гессе является то, что она не является вырожденной на границе области существования режима. Там, где определитель матрицы Якоби равен нулю или даже отрицателен, определитель матрицы Гессе является положительным. Это обстоятельство позволяет производить расчет УР для узловых

мощностей, выходящих за пределы области существования. Итерационный процесс на основе решения СЛУ (4) устойчиво сходился к предельному режиму за 3-5 итераций, так как в точке предельного режима матрица Гессе положительно определена. Естественно, что итерационный процесс на основе метода Ньютона-Рафсона для таких запредельных режимов является расходящимся.

Была исследована область сходимости рассматриваемого метода. Имеется в виду, что не все запредельные режимы будут выводиться на границу области существования. После превышения определенного порога итерационный процесс начинал сходиться к мнимому решению. Следует отметить, что при использовании уравнений УР в прямоугольных координатах область сходимости стремится к бесконечности, то есть итерационный процесс устойчиво сходился к режиму с $\det(\mathbf{J}) = 0$ для узловых мощностей, которые в десятки и сотни раз превышали предельные значения. Было выявлено, что в ОМН использование уравнений УР в прямоугольных координатах требует большее число итераций для получения решения по сравнению с полярными координатами.

В ходе экспериментов исследовалась область притяжения к решению для ОМН. Было выявлено, что эта область для ОМН является уже, чем для метода Ньютона-Рафсона, что подтверждается [3]. Известно, что ОМН устойчиво сходится к решению при выполнении условия:

$$\det(\mathbf{G}) > 0. \quad (6)$$

В координатах углов были построены линии нулевого уровня для определителя матрицы Гессе. Эти линии ограничивают область начального (нулевого) приближения из которой итерационный процесс на основе ОМН будет сходиться к правильному решению. На рис.4а,б,в,г представлены области смены знака определителей матриц Якоби и Гессе в координатах δ_1 - δ_2 для четырех ранее рассчитанных УР.

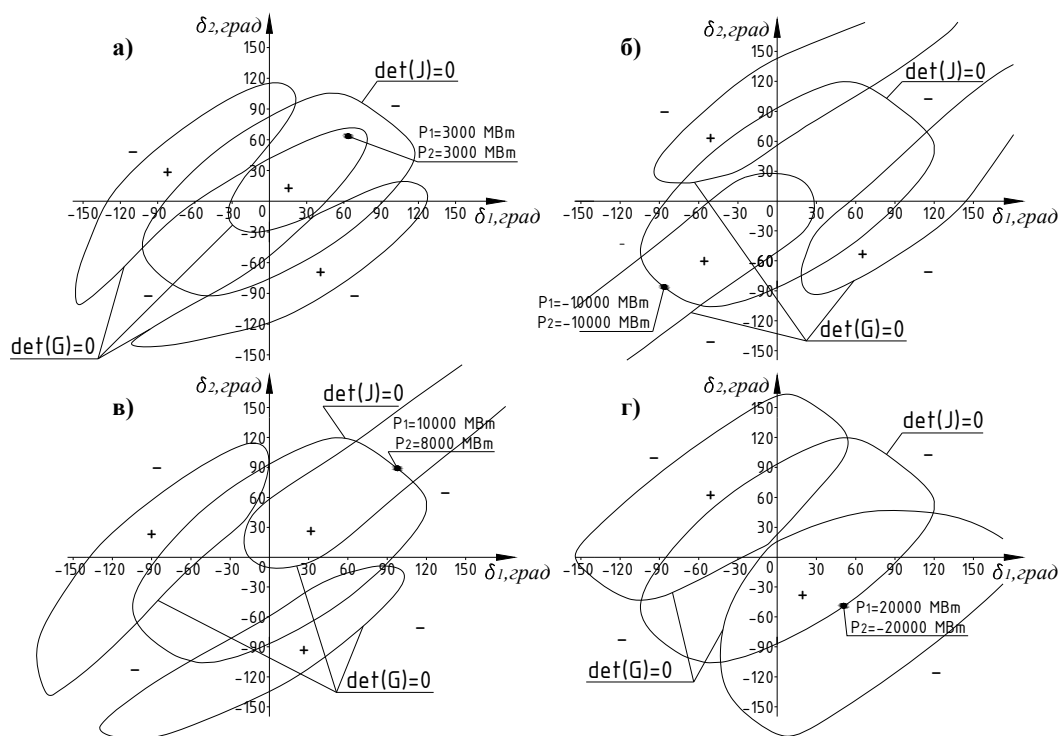


Рис. 4: Положительные области Якобиана и Гессеана

Рис. 4а относится к режиму с нулевыми мощностями и лежит в самом центре области существования. Как видно из рис. 4а область (6) существенно отлична от области (5). Расчеты подтвердили, что область (6) является областью, из которой итерационный процесс ОМН сходится к нулевому минимуму. Если расчет режима на рис. 4,а начать с приближения, расположенного за пределами области (6), то итерационный процесс будет сходиться к режиму

на предельной поверхности $\det(\mathbf{J})=0$. Так для этого режима расчет ОМН с начального приближения $\delta_1 = 83^\circ$ и $\delta_2 = 83^\circ$, которое не принадлежит области (6), сходится к точке $\delta_1 = 93,6^\circ$ и $\delta_2 = 93,6^\circ$ ($P_1 = 3438$ МВт и $P_2 = 3438$ МВт), находящейся на границе области существования (5). Скатывание итерационного процесса минимизации (2) к точке с нулевым значением Якобиана отмечалось в [2] и связано с неудачным начальным приближением. Данное, казалось бы, отрицательное свойство ОМН можно выгодно использовать для расчета предельного режима, расположенного на минимальном в смысле (2) расстоянии от заданного режима. Это обеспечивает не только расчет предельного режима, но и поиск самого короткого, то есть самого опасного направления утяжеления для исследуемого режима.

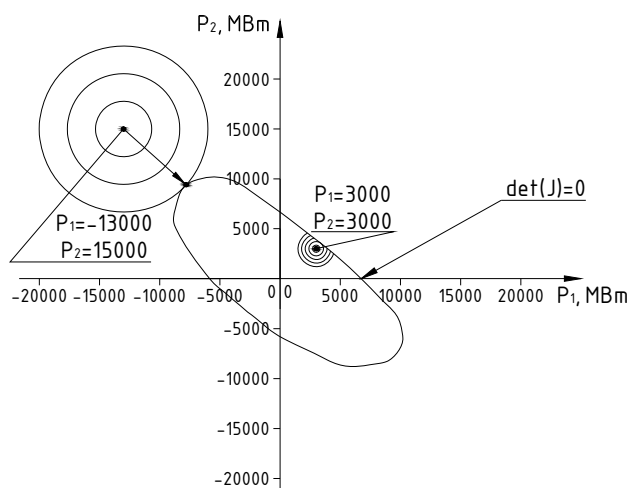


Рис. 5: Область существования решения в координатах углов

На рис.5 представлено отображение поверхности $\det(\mathbf{J})=0$ из координат δ_1 - δ_2 в координаты P_1 - P_2 для ранее рассмотренного примера на рис. 4,а. Кроме того, на рис.5 представлены поверхности равного уровня целевой функции (2), то есть правильные окружности с центром в точке с заданными узловыми мощностями. Следует отметить, что помимо глобального нулевого минимума ($P_1 = 3000$; $P_2 = 3000$), целевая функция (2) имеет и локальный минимум в точке ближайшего предельного режима ($P_1 = 3438$ МВт и $P_2 = 3438$ МВт). Во всех остальных точках предельной поверхности целевая функция имеет большее значение. За пределами поверхности $\det(\mathbf{J})=0$ режимы отсутствуют, там решений не существует и поверхности равного уровня прерваны. Таким образом, для существующего УР ОМН позволяет оценить расстояние до ближайшего предельного режима, то есть оценить запас устойчивости.

Если в точке начального приближения определитель матрицы Гессе положителен, то для режимов принадлежащих области существования итерационный процесс устойчиво сходится к нулевому значению целевой функции. Если в точке начального приближения определитель матрицы Гессе отрицателен, то итерационный процесс сходится к ближайшему предельному режиму.

Следует отметить, что элементы матрицы Гессе в отличие от элементов матрицы Якоби зависят не только от вектора искомых переменных, но и от вектора заданных узловых мощностей. В связи с этим конфигурации области притяжения к решению для разных исходных данных являются различными. На рис. 4б-г представлены конфигурации этих областей для трех запредельных режимов. На рис. 4б для $P_1 = -10000$ МВт и $P_2 = -10000$ МВт. На рис. 4в для $P_1 = 10000$ МВт и $P_2 = 8000$ МВт. На рис. 4г для $P_1 = 20000$ МВт и $P_2 = -20000$ МВт. Из данных рисунков видно, что искомый режим лежит в центре области притяжения к решению с $\det \mathbf{G} \geq 0$. Данная область меньше, чем область $\det \mathbf{J} \geq 0$.

Траектория коррекции узловых мощностей в пространстве P_1 - P_2 обеспечивает ввод УР в область существования решения по кратчайшей траектории, которая перпендикулярна границе области существования. Это открывает перспективы использования данного метода для поиска оптимальных дозровок управляющих воздействий в рамках алгоритмов противоаварийного

управления для ввода режима в допустимую область. Следует отметить, что для получения предельного режима в случае, когда исходные узловые мощности заданы за пределами области существования, нет необходимости выполнять расчет методом последовательных утяжелений (облегчений) режима, так как итерационный процесс автоматически сходится к ближайшему предельному режиму.

Если сравнивать ОМН для расчета УР с методом Ньютона-Рафсона, использующим матрицу Якоби, то вычислительные затраты на каждой итерации будут в несколько раз выше, так как заполненность матрицы Гессе ненулевыми элементами в 2,5-3 раза выше чем у матрицы Якоби. В матрице Якоби каждая строка, соответствующая какому-либо узлу, содержит ненулевые элементы соответствующие всем инцидентным узлам схемы. В матрице Гессе каждая строка содержит ненулевые элементы соответствующие не только соседним узлам, но и их соседям, то есть узлам первого и второго пояса. Однако данный недостаток можно скомпенсировать за счет сочетания при расчете УР метода Ньютона-Рафсона с ОМН. Это означает, что часть узлов в схеме сети может рассчитываться обычным методом Ньютона, а для оставшихся узлов будет использоваться обобщенный, то есть минимизационный метод Ньютона. В первую группу попадают пассивные узлы, в которых не возможно или не целесообразно изменение узловых мощностей. Так в рамках противоаварийного управления ввод управляющих воздействий возможен только в небольшой группе узлов, подключенных к каналам телеуправления. Основная масса узлов расчетной схемы, в том числе и чисто транзитные узлы, является пассивными. Активными узлами являются, в первую очередь, генераторные узлы в которых предусматриваются управляющие воздействия. Такой подход позволяет строго выдержать ограничения в виде равенств на узловые мощности для всех пассивных узлов схемы, расчет которых производится методом Ньютона-Рафсона. В активных узлах схемы, расчет которых производится ОМН, возможны отклонения от заданных значений узловых мощностей. Данные отклонения могут рассматриваться в качестве управляющих воздействий. Алгоритм расчета УР на основе сочетания обычного и минимизационного методов Ньютона можно представить в следующем виде [4]:

1. Для исходного приближения формируется СЛУ с матрицей Якоби для всех узлов расчетной схемы.
2. Методом Гаусса начинается процесс решения СЛУ с матрицей Якоби для всех пассивных узлов. Процесс решения СЛУ прерывается при исключении уравнений для всех пассивных узлов. Факторизованные уравнения запоминаются.
3. Из оставшейся (еще не факторизованной) части матрицы Якоби, соответствующей активным узлам, выделяется матрица узловых проводимостей, то есть определяются параметры сети для активного эквивалента.
4. Для активного эквивалента производится формирование СЛУ с матрицей Гессе на основе ОМН.
5. Производится решение СЛУ с матрицей Гессе и определяются приращения к независимым переменным для активных узлов.
6. Производится обратный ход по факторизованным в п.2 уравнениям пассивных узлов, и определяются приращения к независимым переменным для пассивных узлов схемы.
7. За счет полученных приращений корректируется вектор независимых переменных для всех узлов схемы.
8. Определяются новые узловые мощности во всех узлах сети, проверяются ограничения и в случае необходимости корректируется список активных узлов.
9. Осуществляется проверка сходимости итерационного процесса. При значительных приращениях переменных переход к п.1.

С учетом того, что число активных узлов в схеме сети достаточно мало вычислительные затраты такого алгоритма незначительно превышают затраты метода Ньютона-Рафсона.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Расчет установившегося режима электрической сети путем минимизации суммы квадратов невязок узловых мощностей на основе обобщенного метода Ньютона существенно повышает результативность получения решения для тяжелых по условиям устойчивости режимов и неустойчивых режимов, выходящих за границу области существования решения.

2. При расчете установившихся режимов определитель матрицы Гессе является положительным в области нулевого и даже отрицательного значения определителя матрицы Якоби. Это позволяет производить расчет режимов, заданных мощностями, которые выходят за пределы области существования. Итерационный процесс автоматически сходится к ближайшему предельному режиму.

3. Область притяжения к решению (область сходимости) обобщенного метода Ньютона ограничена положительным значением определителя матрицы Гессе. При расчете устойчивого режима с начального приближения, в котором определитель матрицы Гессе отрицателен, итерационный процесс сходится к ближайшему предельному режиму. Это позволяет оценить запас устойчивости установившегося режима и найти самую опасную траекторию утяжеления.

4. За счет комбинированного алгоритма расчета установившегося режима, в котором для основной массы узлов расчет производится методом Ньютона-Рафсона, а для остальных узлов обобщенным методом Ньютона, удается сохранить все преимущества последнего и обеспечить высокие скоростные характеристики.

4 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Арзамасцев Д.А., Бартоломей П.И., Холян А.М. АСУ и оптимизация режимов энергосистем. М.: Высшая школа, 1983.
- [2] Тарасов В.И. Нелинейные методы минимизации для расчета установившихся режимов электроэнергетических систем. Новосибирск: Наука, 2001. 214 с.
- [3] Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
- [4] Sergey Yuferev, Andrey Pazderin / Combined Newton's method for power flow calculation // Proceedings of the IASTED International Conference Power and Energy Systems (AsiaPES 2013) April 10 - 12, 2013 Phuket, Thailand. P. 104 – 107.