

Развитие технологического алгоритма системы мониторинга запасов статической устойчивости (СМЗУ) с учетом действия локальной противоаварийной автоматики

ЖУКОВ А. В.
ОАО «СО ЕЭС», Россия
НЕУЙМИН В. Г., АЛЕКСАНДРОВ А. С.
ОАО «НТЦ ЕЭС», Россия

В докладе представлен алгоритм расчёта текущих значений максимальных допустимых перетоков активной мощности (МДП) в заданных контролируемых (КС) и найденных опасных сечениях (ОС) с учетом рассмотрения заданного перечня аварийных отключений и действия локальной автоматики предотвращения нарушения устойчивости, а также его реализация в программном комплексе «Система мониторинга запасов устойчивости» (ПК «СМЗУ»). Разработка ведется на основе используемого в промышленной эксплуатации ОАО «СО ЕЭС» программного комплекса RastrWin3.

Модуль расчета МДП использует текущий оцененный режим, заданный набор векторов изменения режима (ВИР), связанных с контролируруемыми сечениями, а также заданный набор аварийных ситуаций и связанных с ними действий локальной противоаварийной автоматики.

Общий алгоритм работы модуля МДП реализует следующие функции:

- Инициализация и проверка исходного режима.

Опроверка отсутствия перегрузок по току и нарушений ограничений по напряжению в контрольных точках;

Опроверка исходного режима по критерию N-1: проверка существования установившегося послеаварийного режима (УР);

Окоррекция исходного режима при появлении несуществующего режима по N-1.

- Цикл по ВИР

Оутяжеление исходного режима до предельного по текущему ВИР;

Овыявление ОС, идентификация признака достижения предельного режима (по активной мощности в сечении (по углу), по напряжению в узлах нагрузки);

Опроверка соответствия найденного ОС и КС для данного ВИР, выбор лучшего из двух сечений (на основании анализа коэффициентов влияния ВИР–сечение);

Орасчет нерегулярных колебаний (НК);

Оослабление на 20 % по ВИР перетока выбранного сечения (ОС или КС) +НК;

Опроверка наличия перегрузок по току и нарушений ограничений по напряжению в контрольных точках. При необходимости – ослабление по антиВИР до устранения перегрузок тока и нарушений ограничений по напряжению;

Офиксация модуля ВИР (k_{mdp}), соответствующего найденному режиму и являющегося кандидатом на МДП;

Оцикл по всем пусковым органам (N-1):

Орасчет управляющих воздействий (УВ) локальной противоаварийной автоматики, соответствующих данному пусковому органу;

- расчет послеаварийного УР;

- если режим не существует:

- ослабление режима по текущему ВИР до получения сбалансированного режима с запасом 8 %;

- коррекция модуля ВИР (k_{mdp}), расчет УР;

- если режим существует:

– утяжеление режима по текущему ВИР по критерию 8 % запаса, т. е. окончание утяжеления при соблюдении одного из условий:

- найден предельный режим;

- найден режим, по отношению к которому послеаварийный УР имеет запас, превышающий 8%;

- если найден предельный режим (т. е. запас послеаварийного режима меньше 8 %):

- ослабление послеаварийного режима по текущему ВИР до получения режима с требуемым запасом;

- коррекция модуля ВИР (K_{mdp}), расчет УР;

■ проверка режима, полученного с учетом возможного его ослабления, на отсутствие перегрузок по току и нарушений ограничений по напряжению в контрольных точках (опционально). Если перегрузка тока и нарушения ограничений по напряжению существуют:

- ослабление послеаварийного режима по текущему антиВИР до получения режима с отсутствием перегрузок и нарушений ограничений по напряжению;

- коррекция модуля ВИР (K_{mdp}), расчет УР.

ОКонец цикла по ПОР.

ОЗапоминается:

■ модуль ВИР (K_{mdp});

■ выявленное ОС;

■ соответствующий ОС и КС МДП, полученный на основе найденного K_{mdp} ;

■ весь УР (опционально).

• Конец цикла по ВИР.

• Выбор наименьшего МДП из всех МДП по ВИР, связанных с одним сечением.

• Формирование отчета о работе.

Рассмотрим более подробно наиболее важные блоки алгоритма:

Формирование и проверка исходного режима.

Объем расчетной модели должен быть достаточным для проведения адекватных расчетов устойчивости методом утяжеления при изменении нагрузок и генераций узлов, кроме того, должен предоставлять возможность адекватного моделирования аварийных возмущений и соответствующих послеаварийных режимов. Для улучшения сходимости расчетных методов рекомендуется удалять из схемы ветви с «малым» (объединять узлы) или «большим» (удалять ветви) сопротивлением. Исходный режим формируется по данным текущих телеизмерений в ПО «Оценивание состояния». Для корректного утяжеления контролируется отсутствие отрицательной нагрузки в узлах, входящих в ВИР. Оцененный исходный режим должен быть в допустимых границах по напряжению и реактивной мощности.

Расчет предельного режима по заданному ВИР.

Модуль утяжеления режима осуществляет расчет серии установившихся режимов (УР) по заданному ВИР при увеличении его модуля до достижения одного из критериев окончания расчета. В качестве критерия окончания используется либо сходимость расчета УР, либо смена знака определителя матрицы Якоби УР [1].

Для утяжеления используется ВИР, изменяющий узловые мощности (P) на каждом шаге утяжеления по формуле:

где K – модуль ВИР, МВт; ΔP – вектор изменения режима (ВИР); P_0 – вектор исходных узловых инъекций (генерация минус нагрузка). Каждый заданный ВИР автоматически нормируется и балансируется таким образом, чтобы сумма положительных компонент равнялась единице, а сумма отрицательных – минус единице.

Реактивная мощность нагрузки меняется пропорционально тангенсу нагрузки исходного режима. В узле с генерацией задается сопротивление генератора (X_d). В исходном режиме рассчитывается э.д.с. E_d за сопротивлением генератора. В ходе расчета предела эта э.д.с. остается неизменной. Таким образом, приближенно учитываются ограничения по току статора генератора.

Процесс расчета предельного описывается следующим алгоритмом:

1. Принимается $i = 0$, $K = 0$

2. На каждом шаге i утяжеления осуществляется «пробное» изменение узловых мощностей на основании формулы:

(1)

3. Производится расчет установившегося режима для новых значений узловых мощностей.

4. При успешном завершении расчета УР производится пересчет модуля и шага ВИР:

$$k^{i+1} = k^i + \Delta k^i;$$

$$\Delta k^{i+1} = n \Delta k^i$$

и переход к п. 6 алгоритма.

5. При аварийном завершении расчета УР производится пересчет коэффициента изменения приращения шага (n) и шага ВИР:

$$n = 1/2;$$

$$\Delta k^{i+1} = n \Delta k^i.$$

6. Осуществляется контроль величины приращения шага модуля, если

$$\Delta k^{i+1} < \Delta k_{\min},$$

фиксируется нормальное окончание расчета.

Принимается $i = i + 1$ и осуществляется переход к п. 2

Нормально завершённым считается расчет установившегося режима, в котором баланс активной и реактивной мощности выдержан с заданной точностью и соблюдаются ограничения по реактивной мощности и модулю напряжения в узлах с фиксированным модулем напряжения.

При расчете предельного режима существует дополнительная возможность контроля смены знака якобиана (определителя матрицы Якоби). В этом случае в п. 3 алгоритма должен вычисляться якобиан. Если он сменил знак с момента предыдущего успешного расчета, то такой расчет считается аварийно завершённым.

Алгоритм выявления опасного ОС основан на анализе системы линеаризованных уравнений установившегося режима, связывающих между собой отклонения узловых мощностей ($\Delta P, \Delta Q$) и узловых напряжений ($\Delta V, \Delta \delta$):

$$J \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix},$$

где J – матрица Якоби.

В предельном режиме матрица Якоби является вырожденной (в практических расчетах – близкой к вырожденной) и, по крайней мере, одно из ее собственных чисел близко к нулю [2]. Следовательно, при любом малом возмущении узловых мощностей изменение модулей и углов напряжений совпадает с компонентами собственного вектора, соответствующего этому собственному числу. И, следовательно, приближенно

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \approx \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} h_\delta \\ h_V \end{bmatrix} s.$$

где λ – минимальное по модулю собственное число; $\begin{bmatrix} h_\delta \\ h_V \end{bmatrix}$ – соответствующий ему правый собственный вектор; s – скаляр, определяющийся из скалярного произведения левого собственного вектора и вектора отклонений узловых мощностей. Компоненты собственного вектора нормируются таким образом, чтобы $h_{\max} = 100$.

Для вычисления правого собственного вектора используется итерационный алгоритм, основанный на методе обратных итераций [3].

На основе компонент собственного вектора, связанных с отклонением угла напряжения (h_δ), формируются маркеры линий, представляющие собой разность компонент по концам этой линии и определяющие приращение угла по этой линии при малом возмущении узловых мощностей. Целесообразно формировать опасное сечение из линий с максимальными маркерами. Для этого используется топологический алгоритм [4]:

1. Находится ветвь с максимальным (по модулю) маркером ОС. Эта ветвь включается в ОС. Ветвь разрезается (т. е. исключается из топологического алгоритма).

2. Находится кратчайший путь (т. е. имеющий наименьшую алгебраическую сумму маркеров ветвей) между узлами начала и конца первой линии ОС.

3. На найденном кратчайшем пути выбирается ветвь с максимальным маркером. Ветвь включается в ОС. Ветвь разрезается. Осуществляется переход к п. 2.

4. Если пути между узлами начала и конца ветвей ОС не существует, то полное опасное сечение определено.

После определения ОС запоминается найденная в нем мощность () и осуществляется **ослабление предельного режима по антиВИР** до тех пор, пока мощность в ОС не станет равной

где K_p - коэффициент запаса устойчивости $K_p = 0,2$; - величина нерегулярных колебаний.

После ослабления предельного режима до величины МДП осуществляется его проверка по перечню аварийных ситуаций, в ходе которой реализуется аварийная ситуация (как правило, отключение линии); моделируется действие локальной ПА - в зависимости от текущей схемы и предаварийного режима осуществляется расчет необходимой величины дозировок управляющих воздействий. Найденный послеаварийный режим проверяется на необходимый запас устойчивости, соответствующий аварийно-допустимому перетоку. При отсутствии такого запаса корректируется МДП исходного режима.

Алгоритм реализован в составе СМЗУ, имеющей дополнительные функции по взаимодействию со SCADA-системой, оцениванию состояния, отображению полученных результатов. Реализация системы в целом позволит повысить точность определения МДП в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Estimation of electrical power system steady-State stability in load flow calculations / V. A. Venikov, V. A. Stroeve, V. I. Idelchick, V. I. Tarasov // IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 3, 1975. Pp. 1034–1041.
2. Определение критических сечений энергосистем в предельных режимах / В. В. Давыдов, В. Г. Неуймин, В. Е. Сактоев. М.: Изв. РАН. Энергетика, 1992, № 1. С. 74—80.
3. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений. Численные методы. М.: Мир, 1983. 384 с.
4. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.