

Определение оптимальных управляющих воздействий для обеспечения динамической устойчивости на основе данных реального времени

В.Г. НЕУЙМИН, Е.В. МАШАЛОВ, Д.М. МАКСИМЕНКО

ОАО «НТЦ ЕЭС»

Россия

ustas@niipt-ems.ru

В докладе представлен разработанный ОАО «НТЦ ЕЭС» для ОАО «СО ЕЭС» программный комплекс, предназначенный для ввода текущего электрического режима в допустимую область (ПК ВРДО). Комплекс может работать в режиме как реального времени (на текущем электрическом режиме), так и изучения (на электрическом режиме, сформированном технологом). Разработано несколько сценариев использования ПК ВРДО, связанных с различными задачами, решаемыми технологом или диспетчером.

Первый сценарий использования связан с оптимизацией по реактивной мощности с учетом ограничений по напряжению. Для регулирования напряжения используются источники реактивной мощности (ИРМ) – синхронные машины, СТК, УШР, трансформаторы с РПН и ВДТ. Дополнительно можно управлять состоянием реакторов или БСК. При изменении положения анцапфы РПН возможно учитывать изменение реактивного сопротивления автотрансформатора, задаваемое квадратичной зависимостью. Для синхронных машин учитываются ограничения по току ротора и статора, причем выбираются наиболее «жесткие» для данного напряжения. При выполнении ВРДО по этому сценарию есть возможность задавать различные критерии оптимизации:

- минимум управляющих воздействий, необходимых для ВРДО;
- оптимальный профиль напряжений (например, минимальная сумма модулей напряжения или квадратов отклонений напряжения от номинального);
- оптимальный профиль реактивной мощности в ИРМ (например, обеспечение необходимого резерва регулирования реактивной генерации);
- минимум потерь активной мощности.

Второй сценарий использования связан с устранением перегрузок активной мощности в заданных сечениях электрической сети. Для устранения таких перегрузок используется либо плавное регулирование мощности генераторов, либо ступенчатое изменение мощности генераторов и нагрузок (обычно объединяемых в нагрузочные группы). Последнее предназначено для моделирования их отключения средствами автоматики. В качестве критерия оптимизации можно использовать:

- минимальное перераспределение мощности генераторов. При этом каждому генератору ставится в соответствие своя цена регулирования или отключения;
- оптимальная загрузка сечений;
- обеспечение необходимого запаса мощности по перетокам в сечении.

Третий сценарий связан с устранением перегрузок по току в ЛЭП и трансформаторах. В этом случае для устранения токовых перегрузок сначала используется оптимизация источниками реактивной мощности, а при недостаточности этих мер – регулирование активных мощностей генераторов или даже их отключение.

ВРДО может выполняться как для одного режима, так и для совокупности режимов на интервале времени. При мульти-интервальной оптимизации дополнительно учитываются интегральные ограничения на скорость изменения мощности генераторов и на суммарную выработку.

Формулировка задачи ВРДО имеет вид:

$$\min F = \sum_i \alpha_i \left(P_i^{\text{зад}} - P_i(V, \delta) \right)^2$$

где α – «цена» ограничения; $P_i^{\text{зад}}$ – заданное значение режимного параметра (узловая и линейная активная и реактивная мощность, ток, модуль и угол напряжения); $P_i(V, \delta)$ – нелинейная функция, выражающая режимный параметр через неизвестные модуль и угол напряжения.

Квадратичная целевая функция, минимизирующая сумму квадратов отклонений, имеет существенный недостаток, связанный с появлением эффекта «размазывания» – невозможностью точного ВРДО по большинству параметров и появлением большого числа незначительно нарушенных ограничений.

Другим вариантом целевой функции ВРДО может быть:

$$\min F = \sum_i [\alpha_i |P_i^{\text{зад}} - P_i(V, \delta)|].$$

В этом случае нарушение ограничений осуществляется только по нескольким «малоценным» параметрам (т.е. параметрам с наименьшей ценой) и большинство ограничений остается выдержанными точно.

В ПК ВРДО используется объединённый подход, позволяющий задавать оба варианта целевой функции, а также их комбинацию для большинства физических параметров.

На рисунке 1 показаны основные виды составляющих целевых функций для отдельных параметров режима, дополненные физическими ограничениями на изменение параметра. Такие составляющие удобно отображать в виде зависимости от производной целевой функции. Вариант 1а соответствует первой ЦФ, 1б – второй, 1в, 1г – их комбинациям. В зависимости 1г присутствуют опциональные «мягкие» ограничения, задаваемые диапазоном $x^{\text{зад}, \text{min}} - x^{\text{зад}, \text{max}}$ и позволяющие задать дополнительную «желаемую» границу изменения параметров с возможностью нарушения (в отличие от физической – без возможности нарушения).

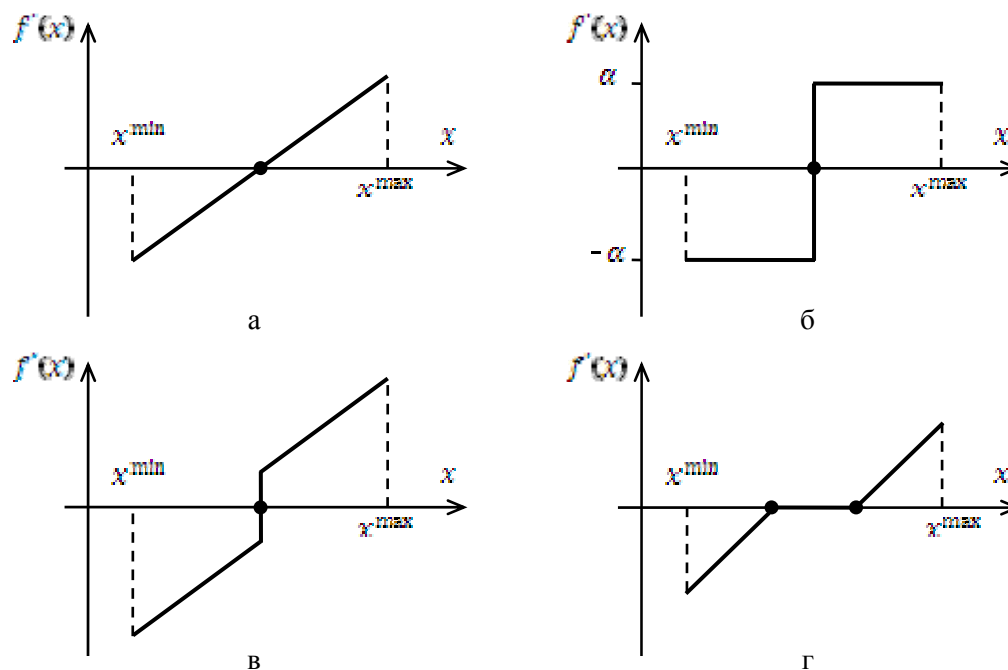


Рис. 1. Производные целевых функций

Конкретными ограничениями, входящими в целевую функцию, могут быть:

1. Баланс активной и реактивной мощности в каждом узле электрической системы. Уравнения записываются для всех узлов – отсутствует выделенный балансирующий узел. Поэтому должен быть по крайней мере один регулируемый генератор и один регулируемый источник реактивной мощности. При оптимизации по реактивной мощности (первый сценарий) программа автоматически создает регулируемый генератор с целью минимизации генерации активной мощности в этом узле.
2. Ограничения на регулируемые генераторы. Для моделирования плавного регулирования ограничения задаются в виде 1а, для моделирования отключения генерации – в виде 1б.
3. Ограничения на группы генераторов, т.е. ограничения на суммарную мощность генерации, например для обеспечения резерва, задаются в виде 1г.
4. Ограничения, моделирующие отключение нагрузки. Представляются в виде «псевдогенератора» в виде 1б. Такой «псевдогенератор» имеет дополнительные особенности. Первая связана с тем, что при изменении активной нагрузки пропорционально изменяется ее реактивная мощность, вторая связана с тем, что при отключении нагрузки задаются группа узлов и доли мощности в них, которая одновременно отключается. Поэтому такой «псевдогенератор» должен быть подключен ко всем узлам, входящим в нагрузочную группу.
5. Ограничения на модуль напряжения задаются в виде 1г.
6. Источники реактивной мощности (генераторы, синхронные компенсаторы, УШР, СТК и т.д.) задаются в виде диапазона изменения реактивной мощности форме 1г.
7. Дискретное изменение реактивной мощности (отключение реакторов и СК) задается в форме 1б. Для окончательной балансировки таких ограничений используется приближенный алгоритм направленного перебора.
8. Моделирование РПН, ВДТ, фазоворотных трансформаторов осуществляется в виде ограничений 1г на независимое изменение продольных и поперечных составляющих коэффициентов трансформации. При ВРДО на интервале времени есть возможность задавать ограничения в виде 1в для моделирования

ограничений на число изменения положений регулирования. Для некоторых типов автотрансформаторов существует связь между положением регулятора и реактивным сопротивлением трансформатора. Такая связь может задаваться в виде квадратичной зависимости.

9. Моделирование ограничений на допустимый ток линии или трансформатора задается в форме 1г.
10. Ограничения на допустимый ток ротора и статора генератора задаются в форме 1г. Из двух ограничений выбирается наиболее «жесткое».
11. Ограничения на мощность сечения. Сечение задается набором линий, положительным направлением мощности в них и местом замера мощности на линии (для трансформатора – обмоткой, на которой измеряется мощность). Задается в форме 1г.
12. При ВРДО на интервале времени задаются ограничения на выработку и на скорость изменения мощности генераторов в форме 1г

Для решения задачи используется метод внутренней точки. Для обеспечения безусловной сходимости алгоритма в реальном времени схема дополняется фиктивными генераторами и источниками реактивной мощности в форме 1б с нулевой мощностью и ценой в несколько раз большей всех реальных генераторов. Это позволяет получить решение и определить величину и место дефицита или избытка активной и реактивной мощности даже в случае отсутствия реального решения.

Использование ВРДО в реальном режиме времени осуществляется циклически на текущем режиме, полученном в результате оценивания состояния. Результаты ВРДО выводятся в качестве рекомендаций по управлению режимом диспетчеру энергосистемы, а также сохраняются в архиве для определения длительных перегрузок.

Общая схема работы выглядит следующим образом. Для расчетной схемы формируются данные телеметрии (используется SCADA СК-2007), на сформированных телеизмерениях запускается оценка состояния (используется ПК КОСМОС), после конвертации формата файлов запускается расчет ВРДО. Схема представлена на рисунке 2.

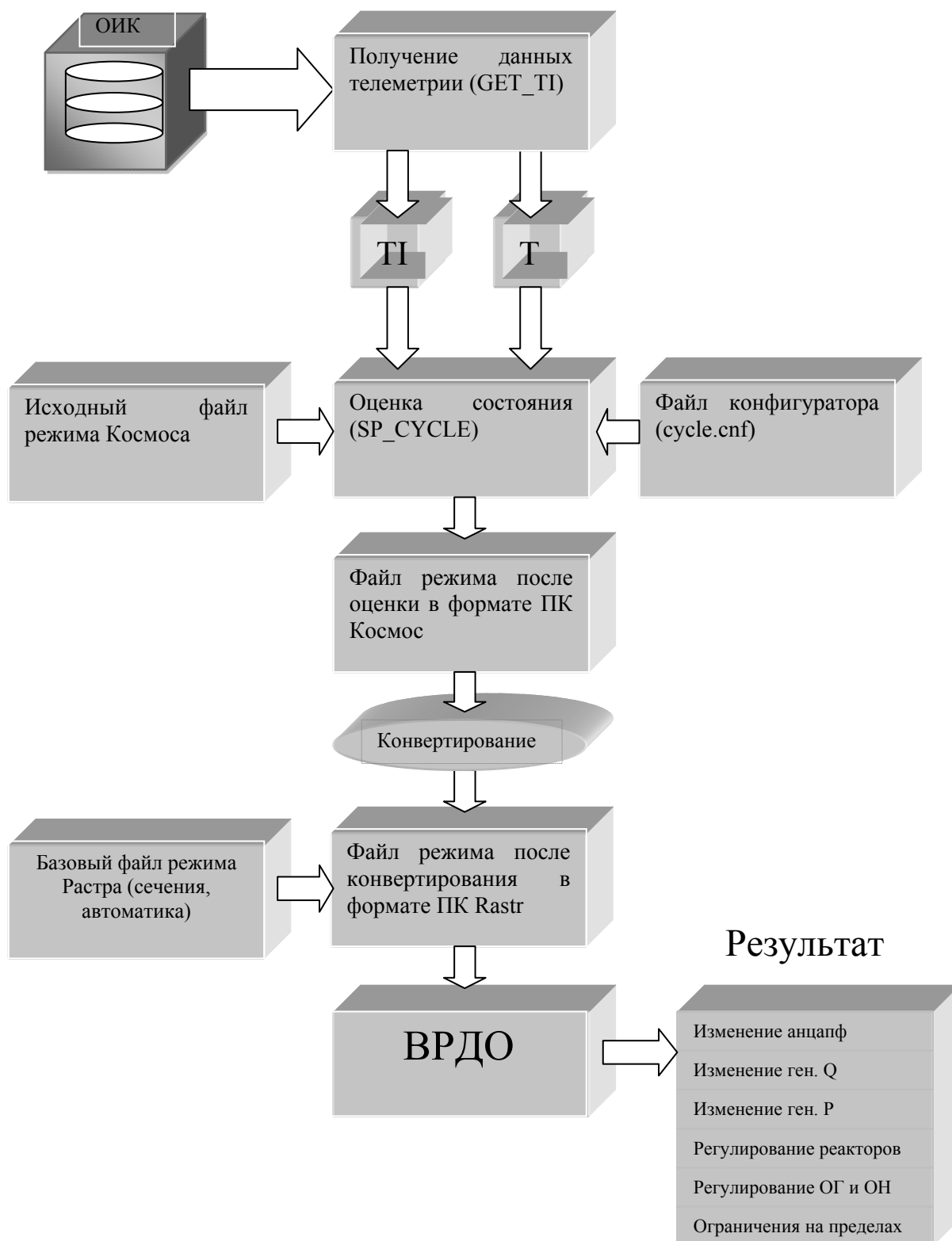


Рис. 2. Общая схема работы ВРДО

С 2012 года ПК ВРДО внедрен в промышленную эксплуатацию в ОАО «СО ЕЭС». В настоящее время проводится работа в основном в режиме изучения для оценки возможностей комплекса и необходимых доработок следующей версии.