

Оптимизационные модели ближайших предельных режимов электрических систем

АЮЕВ Б.И., ДАВЫДОВ В.В., ЕРОХИН П.М.

Рассмотрена реализация оптимизационных моделей ближайших предельных режимов в l_1 , l_2 и l_∞ -векторных нормах.

Ключевые слова: электрическая система, предельный режим, оптимизационная модель

Оценка предельных режимов играет важную роль в анализе, планировании и управлении режимами электрических систем (ЭС). В [1] представлен обзор существующих подходов их определения и предложена оптимизационная модель предельных режимов, реализация которой позволяет повысить робастность алгоритмов, расширить спектр решаемых задач. В [2] рассмотрены оптимизационные модели предельных режимов в заданном направлении утяжеления. Поиск предельного режима в заданном направлении является стандартной практикой при решении задач анализа и управления режимами ЭС. Поскольку направление утяжеления выбирается технологами самостоятельно, от их квалификации и опыта зависит адекватность обеспечения безопасной и надежной работы ЭС. Знание ближайшего предельного режима позволяет повысить точность оценки тяжести режима ЭС и выработать наилучшее направление ввода режима в допустимую область. В статье представлена вычислительная модель, позволяющая определить оптимальное, согласованное с принципами диспетчерского управления режимами энергосистем, направление утяжеления, приводящее к ближайшему предельному режиму.

Для того чтобы сформулировать задачу поиска ближайшего предельного режима, требуется определиться с критерием «близости». В теории и практике управления ЭС близость режима к предельному оценивается запасом передаваемой мощности по контролируемым сечениям и напряжениям в узловых точках [3]. Вместе с тем, в качестве вычислительных моделей потокораспределения ЭС используют, как правило, узловые модели ЭС [4]. Потоки мощности по сечениям и модули напряжения являются функциями узловых параметров режима, поэтому близость режима к предельному может быть также оценена с помощью векторной нормы отклонения узловых параметров от предельного режима. Оптимизационная модель предельных режимов [1] позволяет использовать различ-

The construction of optimization models of closest marginal operating conditions in the l_1 , l_2 and l_∞ vector norms is considered.

Key words: electric system, marginal operating conditions, optimization model

ные целевые функции, в том числе векторные нормы. Наиболее часто в математике [5] и практике расчетов применяются l_1 , l_2 и l_∞ -векторные нормы:

$$\|Y\|_1 = \sum_k |Y_k|; \|Y\|_2 = \sqrt{\sum_k |Y_k|^2}; \|Y\|_\infty = \max_k \{|Y_k|\}, \quad (1)$$

которые являются частными случаями l_p -нормы Гельдера ($p \geq 1$):

$$\|Y\|_p = \sqrt[p]{\sum_k |Y_k|^p}. \quad (2)$$

Как любая норма, норма Гельдера является выпуклой функцией, поскольку неравенство треугольника и абсолютная однородность норм обеспечивают выполнение соотношения

$$\|aY + (1-a)Z\| \leq a\|Y\| + (1-a)\|Z\|$$

при $a \in [0, 1]$. Выпуклость векторной нормы гарантирует выпуклость множества $\|Y\| \leq 1$, поэтому согласно рис. 1 векторные нормы l_1 и l_∞ можно рассматривать как предельные представители семейства векторных норм. Как следствие, оптимизационные модели ближайших предельных режимов в l_1 , l_2 и l_∞ -векторных нормах позволяют оценить адекватность использования векторных норм для определения ближайшего предельного режима ЭС.

Евклидова l_2 -норма тесно связана с задачей наименьших квадратов и имеет давнюю традицию применения для решения задач анализа и управления режимами ЭС – оценка состояния, расчет УР, ввод режима в допустимую область и т.д. Наиболее часто ближайший предельный режим ассоциируют с кратчайшим расстоянием (наименьшей длиной вектора) до гиперповерхности предельных режимов [6]. Поскольку минимум l_2 -нормы отвечает минимуму ее квадрата, формулировку задачи поиска ближайшего предельного режима можно представить в виде

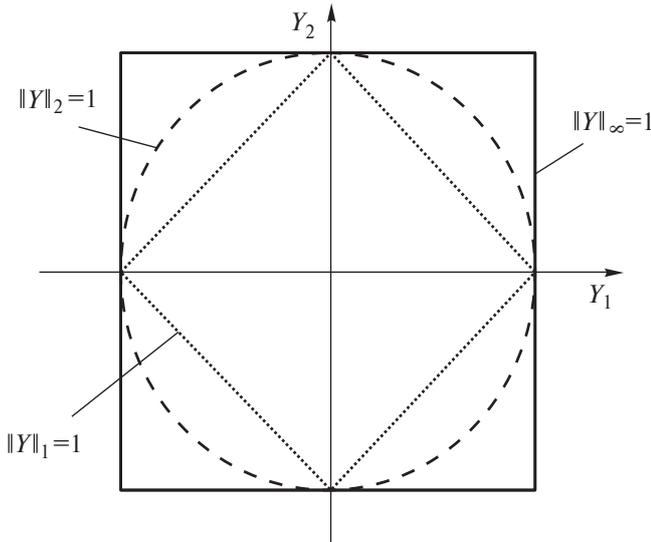


Рис. 1. Геометрическая иллюстрация l_1, l_2 и l_∞ -векторных форм

$$\frac{1}{2} \underset{k \hat{l} \text{ opt}}{\dot{a}} dY_k^2 \text{ @ min} \quad (3)$$

при условии

$$DF(X, Y + dY) = 0. \quad (4)$$

Здесь (4) – это уравнения установившегося режима (УУР); вектор X включает компоненты комплексов напряжений узлов и мощность балансирующего узла (зависимые переменные); вектор Y включает независимые переменные (мощности узлов); dY – его приращение до гиперповерхности предельных режимов.

Состав независимых переменных, $Y_k, k \hat{l} \text{ opt}$, по которым оценивается ближайший предельный режим, определяется условием решаемой эксплуатационной задачи. В дальнейшем для сокращения выкладок будем полагать, что УУР (4) представлены в форме баланса мощностей в полярной системе координат [4].

Следует отметить важное свойство задачи (3) и (4). Если задается исходный существующий режим с $DF(X, Y) = 0$, то решением будет $dY = 0$. Поскольку тривиальное решение не является предметом рассмотрения статьи, первоначально предположим, что при заданных значениях независимых переменных Y режим не существует $DF(X, Y) \neq 0$ и требуется ввести его в область существования (4) с минимальной евклидовой нормой управляющих воздействий (3) (рис. 2). Предполагается, что состав управляющих воздействий $k \hat{l} \text{ opt}$ обеспечивает совместность системы (4).

Сформируем функцию Лагранжа задачи (3) и (4):

$$L = \frac{1}{2} \underset{k \hat{l} \text{ opt}}{\dot{a}} dY_k^2 + DF(X, Y + dY)^T l. \quad (5)$$

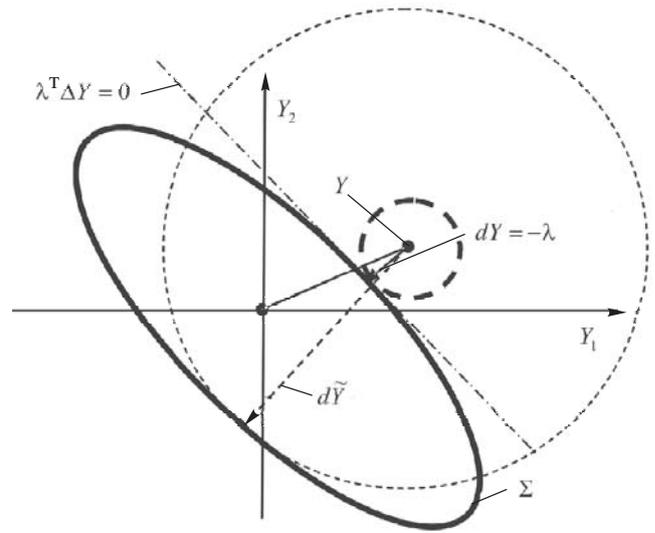


Рис. 2. Гиперповерхность предельных режимов S и ближайший предельный режим в l_2 -норме для трехугольной консервативной ЭС

Необходимым условием получения оптимального решения является равенство нулю градиента функции Лагранжа [7]:

$$\tilde{N}_l L = DF(X, Y + dY) = 0; \quad (6)$$

$$\tilde{N}_X L = \underset{\hat{b}}{\dot{e}} \frac{\partial DF}{\partial X} \underset{\hat{b}}{\dot{u}}^T l = 0; \quad (6a)$$

$$\tilde{N}_{dY_k} L = dY_k + l_k = 0, k \hat{l} \text{ opt}. \quad (6b)$$

Поскольку согласно принятому предположению исходный режим не существует, т.е. $dY \neq 0$, из (6b) следует $l \neq 0$, что совместно с (6a) определяет предельный по существованию режим [1].

Известно, что в предельном режиме вектор множителей Лагранжа l в условии (6a) является вектором нормали к гиперповерхности предельных режимов [8]. Действительно, линеаризация УУР в предельном режиме

$$\underset{\hat{b}}{\dot{e}} \frac{\partial DF}{\partial X} \underset{\hat{b}}{\dot{u}}^T DX + DY = 0 \quad (7)$$

и умножение полученного соотношения слева на вектор-строку множителей Лагранжа с учетом (6a) дает уравнение касательной гиперплоскости к гиперповерхности предельных режимов в пространстве независимых переменных Y : $l^T DY = 0$, что и определяет вектор l как вектор нормали к гиперповерхности предельных режимов. Поэтому условие (6b) говорит о том, что предельный режим является «ближайшим», поскольку вектор dY , коллинеарный вектору нормали, к гиперповерхности

предельных режимов в подпространстве $k \hat{1}$ opt (рис. 2).

Следует отметить, что при вводе режима в область существования большое значение имеет начальное приближение зависимых переменных. Так например, если начальное приближение на рис. 2 выбрано в противоположном квадранте вблизи гиперповерхности предельных режимов [9], решением задачи будет вектор $d\tilde{Y}$. Это объясняется тем, что условие (6а) в явном виде включает только зависимые переменные, а поэтому вычислительная модель (6)–(6б) будет вести режим к предельному, ближайшему к точке начального приближения вектора комплекса напряжений в пространстве мощностей узлов управления. Чтобы обеспечить получение глобального минимума, необходимо должным образом задать начальное приближение. Одним из подходов является использование в качестве стартового алгоритма метода Ньютона по параметру. Известно, что при расчете несуществующего режима итерационный процесс метода Ньютона по параметру сходится к гиперповерхности предельных режимов [4]. Метод Ньютона по параметру не использует условие (6а) в явном виде, поэтому в случае выпуклой области существования предельных режимов дает надлежащую и быструю оценку. Так например, для поиска ближайшего предельного режима тестовой схемы [9], отвечающего глобальному минимуму, потребовалось четыре итерации метода Ньютона по параметру и три итерации модели (6)–(6б).

Компоненты вектора dY задачи (3)–(6б) можно интерпретировать как компоненты вектора небаланса мощностей в узлах, а саму задачу – как модель наименьших квадратов УУР [4]. Расчет существующего режима на основе модели наименьших квадратов по вычислительным характеристикам заметно уступает решению УУР методом Ньютона [10]. Чтобы с помощью модели наименьших квадратов для существующего режима получить предельный, можно, например, задать начальное приближение комплекса напряжений близким к гиперповерхности предельных режимов [11]. При этом, как и при вводе режима в область существования, будет получен предельный режим, ближайший к начальному приближению комплексов напряжений в пространстве утяжеляемых параметров [9, 11].

Чтобы гарантированно получить предельный режим для существующего исходного, необходимо обеспечить выполнение условия $l^1 0$ в (6а) и (6б). Это можно сделать различными способами, например зафиксировав одну из компонент вектора l [8]. Однако заранее неизвестно, какая компонента в предельном режиме будет ненулевая, поэтому луч-

ше отстроить норму вектора множителей Лагранжа (или вектора управляющих воздействий) от нуля и ввести новую переменную t (рис. 3). При этом (6) примет вид

$$DF(X, Y + t dY) = 0 \quad (8)$$

и появится дополнительное уравнение

$$(1 - \frac{\dot{a}}{k \hat{1} \text{ opt}} dY_k^2) / 2 = 0$$

или

$$(1 - \frac{\dot{a}}{k \hat{1} \text{ opt}} dY_k^2) / 2 = 0. \quad (9)$$

Дополнение оптимизационной модели (6)–(6б) алгебраическим уравнением (9) не позволяет в полном объеме использовать аппарат нелинейного программирования. Поэтому переформулируем задачу (3) и (4): $t \text{ @ min}$ при условии (8) и (9).

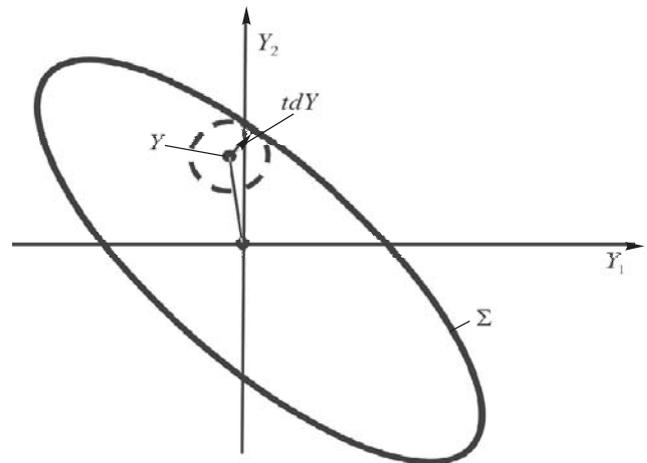


Рис. 3. Гиперповерхность предельных режимов Σ и ближайший предельный режим в l_2 -норме для трехузловой консервативной ЭС

Сформируем функцию Лагранжа для задачи $t \text{ @ min}$ при условии (8) и (9):

$$L = t + DF(X, Y + t dY)^T l + \frac{1}{2} (1 - \frac{\dot{a}}{k \hat{1} \text{ opt}} dY_k^2) m \quad (10)$$

и запишем необходимые условия оптимальности:

$$\tilde{N}_l L = DF(X, Y + t dY) = 0; \quad (11)$$

$$\tilde{N}_X L = \frac{\dot{e}}{\hat{g}} \frac{\partial DF}{\partial X} \dot{u}^T l = 0; \quad (11a)$$

$$\tilde{N}_{dY_k} L = t l_k - m dY_k = 0; \quad (11b)$$

задачи, поэтому для получения ближайшего предельного режима необходимо использовать подход, аналогичный уравнениям (8) и (9). Включение этих уравнений в оптимизационную модель (14) при условии (4) не влияет на характеристики ближайшего предельного режима, но существенно увеличивает объем выкладок. Поэтому будем считать условие $dY \neq 0$ выполненным, например, надлежащим выбором начального приближения вектора зависимых переменных.

Целевая функция (14) не дифференцируема. Чтобы воспользоваться аппаратом нелинейного программирования, переформируем задачу (14) и (4), следуя рекомендациям [14]: $t \rightarrow \min$ при условиях (4) и

$$dY_k - t \in 0, k \in \hat{m} \text{ opt}; \quad (15)$$

$$-dY_k - t \in 0, k \in \hat{m} \text{ opt}. \quad (15a)$$

Сформируем функцию Лагранжа:

$$L = t + DF(X, Y + t dY)^T + \sum_{k \in \hat{m} \text{ opt}} \lambda_k^+ (dY_k - t) + \sum_{k \in \hat{m} \text{ opt}} \lambda_k^- (-dY_k - t). \quad (16)$$

Необходимым условием получения оптимального решения является равенство нулю градиента функции Лагранжа:

$$\tilde{N}_t L = DF(X, Y + dY) = 0; \quad (17)$$

$$\tilde{N}_X L = \frac{\partial DF}{\partial X} = 0; \quad (17a)$$

$$\tilde{N}_{dY_k} L = \lambda_k^+ - \lambda_k^- = 0, k \in \hat{m} \text{ opt}; \quad (17b)$$

$$\tilde{N}_Y L = \lambda_k^+ - \lambda_k^- = 0 \quad (17b)$$

и выполнение соотношений:

$$\lambda_k^+, \lambda_k^- \geq 0; \quad \lambda_k^+ (dY_k - t) = 0; \quad \lambda_k^- (-dY_k - t) = 0; \quad k \in \hat{m} \text{ opt}. \quad (18)$$

Согласно (18) множители $\lambda_k^+ = \lambda_k^- = 0$ для $|dY_k| < \max_{k \in \hat{m} \text{ opt}} |dY_k|$. В этом случае из (17b) следует $\lambda_k^+ = \lambda_k^- = 0$. Такое сочетание компонент у вектора нормали к гиперповерхности предельных режимов является конечным числом, поэтому имеет (лебегову) меру нуль на гиперповерхности предельных режимов. Так например, для классической трехузловой

консервативной ЭС этому отвечают всего четыре точки на линии предельных режимов (рис. 4). В терминах теории вероятности это означает, что вероятность таких событий равна нулю. Поэтому решению задачи (14)–(18) будут отвечать только равные по абсолютному значению компоненты вектора dY , т.е. $|dY_m| = |dY_k|, k, m \in \hat{m} \text{ opt}$. Действительно, параметры каждого узла влияют на режим всей ЭС. Поскольку в l_∞ -векторной норме в расчет принимается только максимальная абсолютная компонента, то $|dY_v| < \max_{k \in \hat{m} \text{ opt}} |dY_k|$ не влияет на целевую

функцию, но при надлежащем изменении утяжеляет режим. Поэтому, с точки зрения целевой функции (14), оптимальным решением является $|dY_m| = \max_{k \in \hat{m} \text{ opt}} |dY_k|$ для всех $m \in \hat{m} \text{ opt}$. Ближайший предельный режим в l_∞ -норме соответствует предельному режиму в направлении утяжеления $dY_k = \pm 1$, т.е. загрузке или разгрузке всех узлов управления на одно и то же значение (абсолютное), что не отвечает практике диспетчерского управления.

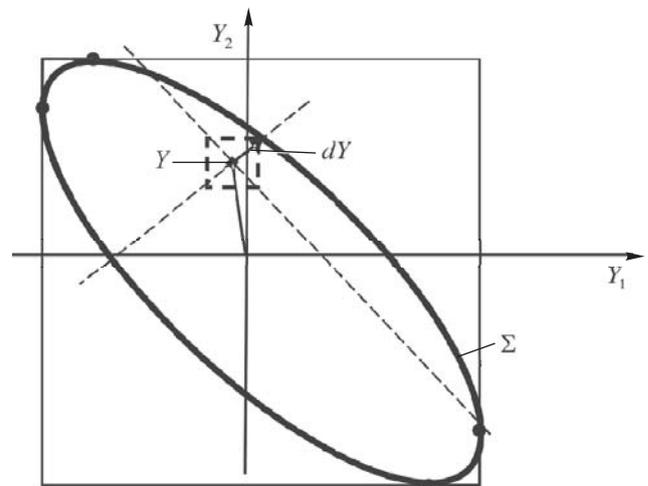


Рис. 4. Гиперповерхность предельных режимов S и ближайший предельный режим в l_∞ -норме

Рассмотрим оптимизационную модель ближайшего предельного режима в l_1 -векторной норме

$$\min_{k \in \hat{m} \text{ opt}} |dY_k| \quad (19)$$

при условии (4).

Для функции цели (19) частные производные для нулевых значений dY_k не определены. Чтобы воспользоваться математическим аппаратом нелинейного программирования, выполним замену переменных

$$dY_k = dY_k^+ - dY_k^-; \quad dY_k^+, dY_k^- \geq 0$$

и переформулируем задачу (19) и (4) следующим образом:

$$\hat{a} (dY_k^+ + dY_k^-) \textcircled{R} \min_{k \hat{1} \text{ opt}} \quad (20)$$

при условии

$$DF(X, Y + dY^+ - dY^-) = 0; \quad (21)$$

$$- dY^+ \leq 0; \quad (21a)$$

$$- dY^- \leq 0. \quad (21б)$$

Сформируем функцию Лагранжа системы (20)–(21б)

$$L = \hat{a} (dY_k^+ + dY_k^-) + DF(X, Y + dY^+ - dY^-)^T | + \sum_{k \hat{1} \text{ opt}} \hat{a} m_k^+ (-dY_k^+) + \sum_{k \hat{1} \text{ opt}} \hat{a} \bar{m}_k (-dY_k^-) \quad (22)$$

и запишем необходимые условия оптимальности:

$$\tilde{N}_l L = DF(X, Y + dY^+ - dY^-) = 0; \quad (23)$$

$$\tilde{N}_X L = \frac{\partial DF}{\partial X} \hat{u}^T = 0; \quad (23a)$$

$$\tilde{N}_{dY_k^+} L = 1 + |m_k^+| = 0, \quad k \hat{1} \text{ opt}; \quad (23б)$$

$$\tilde{N}_{dY_k^-} L = 1 - |m_k^-| = 0, \quad k \hat{1} \text{ opt}; \quad (23в)$$

$$m_k^+ \geq 0, \quad m_k^+ dY_k^+ = 0; \quad (23г)$$

$$m_k^- \geq 0, \quad m_k^- dY_k^- = 0. \quad (23д)$$

Условие (23а) при $l \neq 0$ определяет предельный режим [1]. Из (23г) и (23д) следует, что в случае $dY_k^+ \neq 0$ ($dY_k^- \neq 0$) множители m_k^+ (m_k^-) должны принимать нулевые значения. Если в предельном режиме ряд компонент векторов dY^+ (dY^-) не равны нулю, то согласно (23б)–(23в) для каждой из них должно выполняться соотношение

$$|m_k| = \pm 1 \text{ " } dY_k^+ \neq 0 \text{ или } dY_k^- \neq 0.$$

Следовательно, компоненты с $dY_k^+ \neq 0$ ($dY_k^- \neq 0$) должны иметь равные по модулю значения соответствующих компонент множителей Лагранжа l . Как и в случае l_∞ -векторной нормы, такое сочетание компонент у вектора нормали к гиперповерх-

ности предельных режимов имеет (лебегову) меру нуль на гиперповерхности предельных режимов. Так, для трехузловой ЭС этому также соответствуют четыре точки на линии предельных режимов (рис. 5). Поэтому решению задачи (19), (4), (20)–(23д) будет отвечать только одна ненулевая компонента вектора dY , все остальные равны нулю. Это соответствует стандартной практике утяжеления режима в заданном направлении при изменении мощности только в одном из узлов. При этом утяжеляться будет узел $k \hat{1} \text{ opt}$, наиболее критичный для режима ЭС, и в предельном режиме в одном из сечений ЭС, разделяющем балансирующий и утяжеляемый узел, будет достигнут предельный поток мощности. Такое сечение, называемое критическим [15], определяется на основе анализа компонент правого собственного вектора матрицы Якоби УУР, отвечающего нулевому собственному значению, или вектора множителей Лагранжа l . По критическому сечению легко находится коэффициент запаса мощности. Ближайший предельный режим в l_1 -векторной норме соответствует минимальному запасу мощности ЭС.

Полученные соотношения справедливы также

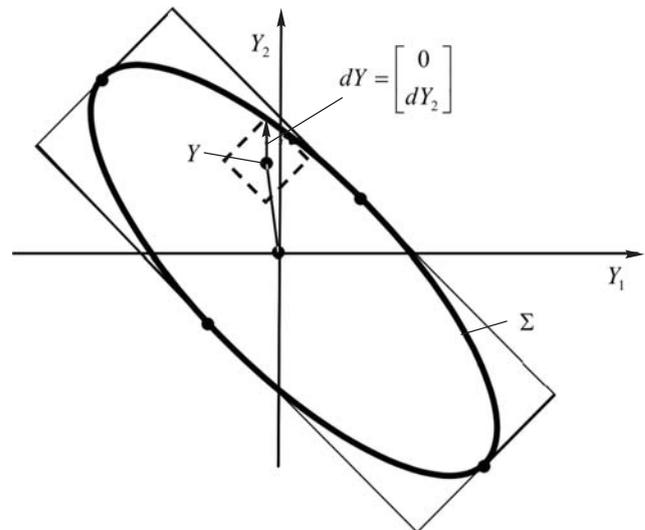


Рис. 5. Гиперповерхность предельных режимов Σ и ближайший предельный режим в l_1 -норме

для ввода режима в область существования, когда в качестве dY_k будет отключаемая мощность нагрузки или генерации. Оптимальному решению будет соответствовать разгрузка мощности в наиболее критичном для режима ЭС узле. Такому узлу отвечает наибольшая по абсолютному значению компонента вектора множителей Лагранжа $|l_m| = \max_{k \hat{1} \text{ opt}} |l_k| = 1$. Действительно, для нулевых компонент вектора dY_k из (23б)–(23д) следует

$l_k = -1 + \eta_k^+ > -1$ и $l_k = 1 - \eta_k^- < 1$, что дает $|l_k| < 1 = |l_m|$. Если мощности узла будут недостаточно, разгрузится следующий наиболее критичный для режима ЭС узел с наибольшей по абсолютному значению компонентой вектора l и т.д. В результате ввода режима в область существования будет отключено минимально возможное значение мощности. Всегда предпочтительнее отдавать минимум команд, контролируя выполнение, тем более что это повышает оперативность реагирования. Оптимизационная модель ближайшего предельного режима в l_1 -векторной норме обеспечивает выдачу управляющего воздействия только на один узел, а при нехватке дозировки — на ограниченное число узлов, при этом гарантируется минимально возможная разгрузка по мощности. Таким образом, эта модель отвечает требованиям диспетчерского управления режимами ЭС. Качественная характеристика ближайшего предельного режима не изменится, если задача (20), (21)—(21б) будет сформирована с учетом стоимости управляющих воздействий и допустимого диапазона их изменения.

Использование балансирующего узла в оптимизационной модели ЭС является искусственным приемом, чтобы гарантировано получить предельный режим или отстроиться от него. Расплатой за это является загрузка в первую очередь балансирующего узла, поскольку для него цена управляющих воздействий равна нулю [1]. Предельный режим характеризуется исчерпанием возможности балансировки режима балансирующим узлом. Так например, использование данной модели для ликвидации аварии, произошедшей на Саяно-Шушенской ГЭС, привело бы в первую очередь к загрузке удаленного балансирующего узла, а не к отключению ближайшего алюминиевого завода.

Возможной альтернативой является использование концепции распределенного балансирующего узла [1] или районов управления, по аналогии с областями регулирования, за счет дополнения оптимизационной модели уравнениями баланса управляющих воздействий районов управления. В последнем случае балансирующий узел будет покрывать только потери активной мощности, вызванные управляющими воздействиями. Стандартная оптимизационная модель ЭС использует только базисный узел, а балансировку режима выполняют все задействованные в оптимизации узлы. Поскольку решением задачи является сбалансированный режим, отвечающий минимуму функции цели, то кажется правомерным ее использование для ввода режима в область существования по сравнению с оптимизационной моделью предельных ре-

жимов. Для прояснения ситуации рассмотрим двухузловую систему с PV-узлами (рис. 6).

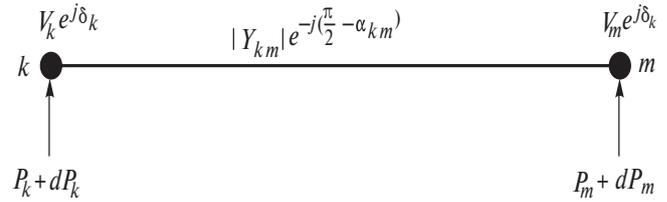


Рис. 6. Схема двухузловой системы

Для стандартной оптимизационной модели условия оптимальности будут аналогичны оптимизационной модели предельных режимов за исключением вырожденности матрицы Якоби, вместо которой для двухузловой схемы будет использоваться уравнение

$$-V_k V_m |Y_{km}| \cos(d_{km} - a_{km}) l_k + V_k V_m |Y_{km}| \cos(d_{km} + a_{km}) l_m = 0, \quad (24)$$

где $|Y_{km}|$ — модуль проводимости ветви, соединяющей узлы k и m ; $a_{km} = \arctg(R_{km} / X_{km})$ — угол потерь полного сопротивления ветви km .

Предположим, что в узлах k и m имеются генераторы и нагрузка и в текущем режиме поток мощности по линии направлен в сторону узла m . Проанализируем две ситуации возникновения предельного потока мощности по линии: 1) отключение одной из параллельной линии ветви km ; 2) отключение части нагрузки в узле k .

В первом случае управляющими воздействиями будут снижение генерации в узле k и нагрузки в узле m , т.е. разного знака. Согласно полученным ранее соотношениям знаки управляющих воздействий определяются знаками множителей Лагранжа, что в соответствии с (24) дает $\frac{p}{2} - a_{km} < d_{km} < \frac{p}{2} + a_{km}$.

Во втором случае управляющими воздействиями будут снижение генерации в узлах k и m , т.е. одного знака. Из (24) можно получить

$$\operatorname{tg}(d_{km} - a_{km}) = - \frac{l_k / l_m - \cos 2a_{km}}{\sin 2a_{km}}. \quad (25)$$

Для евклидовой нормы управляющие воздействия равны с противоположным знаком, соответствующим множителям Лагранжа. Как правило, в узле возмущения интенсивность управляющих воздействий больше, чем в других узлах. Поскольку $\cos 2a_{km} \in [-1, 1]$ и $\sin 2a_{km} \neq 0$, то согласно (25) $\operatorname{tg}(d_{km} - a_{km}) < 0$ и, следовательно,

$$d_{km} > \frac{p}{2} + a_{km}. \quad (26)$$

Это также справедливо для l_1 -векторной нормы, для которой множители Лагранжа равны единице.

Таким образом, в обеих рассмотренных ситуациях сбалансированный режим ЭС не будет предельным, причем при вводе режима в область существования в зависимости от начальных условий и аварийного возмущения стандартная оптимизационная модель может дать недопустимый аварийный режим (26).

Выводы. 1. Оптимизационная модель ближайших предельных режимов в l_2 -векторной норме является расширением модели наименьших квадратов УУР. Ближайший предельный режим в евклидовой норме соответствует кратчайшему геометрическому расстоянию до гиперповерхности предельных режимов. В области диспетчерского управления данный показатель может быть использован в качестве косвенной оценки близости предельного режима и управляющих воздействий.

2. Оптимизационная модель ближайших предельных режимов в l_∞ -векторной норме не отвечает требованиям диспетчерского управления. Ближайший предельный режим в l_∞ -векторной норме соответствует утяжелению всех узлов управления с равными по абсолютному значению дозировками.

3. Оптимизационная модель ближайших предельных режимов в l_1 -векторной норме отвечает практике диспетчерского управления ЭС. Для текущего режима ближайший предельный соответствует утяжелению наиболее критичного узла ЭС, позволяет определить реальный запас мощности. При вводе режима в область существования модель обеспечивает минимальное отключение мощности в ЭС разгрузкой наиболее критичных узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М. Оптимизационная модель предельных режимов электрических систем. — Электричество, 2010, №11.
2. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М. Оптимизационные вычислительные модели предельных режимов электрических систем в заданном направлении утяжеления. — Электричество, 2010, №12.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.; Л.: Энергия, 1964.
4. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М., Неуймин В.Г. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах/Под. ред. П.И. Бартоломея. — М.: Флинта: Наука, 2008.
5. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. — М.: Мир, 1989.
6. Dobson I., Lu L. New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse. — IEEE Trans. on Power Systems, August 1993, vol. 8, № 3.
7. Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы/Пер. с англ. — М.: Мир, 1982.
8. Конторович А.М., Крюков А.В. Предельные режимы энергосистем (основы теории и методов расчета): Учебное пособие. — Иркутск: Иркутский ун-т, 1985.
9. Мотовилов С.И., Фишов А.Г. О вводе электрического режима энергосистемы в область статической аperiodической устойчивости. — Сб. докладов III Международ. научно-практической конф. «Энергосистема: управление, конкуренция, образование». — Екатеринбург: РИО ГОУ ВПО «УГТУ—УПИ», 2008.
10. Виноградов А.А., Идельчик В.И., Новиков А.С. Ввод в область существования решения уравнений установившегося режима при расчетах установившихся, допустимых и оптимальных режимов электрических систем. — Вопросы применения математических методов при управлении режимами и развитием электрических систем. — Иркутск: Иркутский политехнич. ин-т, 1975.
11. Паздерин А.В., Юферев С.В. Ввод режима в допустимую область на основе обобщенного метода Ньютона. — Сб. докладов III Международ. научно-практической конф. «Энергосистема: управление, конкуренция, образование». — Екатеринбург: РИО ГОУ ВПО «УГТУ—УПИ», 2008.
12. Makarov Y.V., Dong Z.Y., Hill D. J. On convex of power flow feasibility boundary — IEEE Trans. on Power Systems, May 2008, vol. 23, № 2.
13. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. — М.: Наука, 1984.
14. Boyd S., Vandenberghe L. Convex optimization. — Cambridge University Press, 2004.
15. Давыдов В.В., Неуймин В.Г., Сактоев В.Е. Определение критических сечений энергосистем в предельных режимах. — Изв. РАН. Энергетика, 1992, №1.

[19.11.10]

Авторы: Аюев Борис Ильич окончил в 1979 г. электротехнический факультет Уральского политехнического института (УПИ — ныне Уральский государственный технический университет УГТУ—УПИ). В 2008 г. защитил докторскую диссертацию «Методы и модели эффективного управления режимами Единой электроэнергетической системы России» в Новосибирском государственном техническом университете. Председатель Правления ОАО «СО ЕЭС».

Давыдов Виктор Васильевич окончил в 1979 г. электротехнический факультет Восточно-Сибирского технологического института (г. Улан-Удэ). В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию «Методы оперативного расчета потерь электрической энергии и компенсации реактивной мощности в больших энергосистемах» в УПИ. Ведущий специалист Филиала ОАО «СО ЕЭС» «Объединенное диспетчерское управление энергосистемами Сибири».

Ерохин Петр Михайлович окончил в 1969 г. электротехнический факультет УПИ. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию «Задачи и технологии оперативно-диспетчерского управления режимами ЭЭС в конкурентно-рыночной энергетике России». Генеральный директор Филиала ОАО «СО ЕЭС» «Объединенное диспетчерское управление энергосистемами Урала».