

Сопоставительный анализ математических моделей оценивания состояния электроэнергетической системы

Ярцев С.Д.

ОАО ДРСК ФАО “Амурские центральные электрические сети”

Благовещенск. Россия

Вопросам моделирования электрических сетей энергосистемы уделяется пристальное внимание, начиная с момента появления первых автоматизированных систем проектирования (САПР) и автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ) на основе ЭВМ. Модели дают возможность проверять реальность и оптимальность проектных разработок по отдельным энергетическим объектам и энергосистеме в целом, а также проверять надежность функционирования работающей энергосистемы путем решения конкретных технологических задач. Это позволяет производить сравнительный анализ разных стратегий проектирования и оперативного управления для принятия решений на основании состояния параметров режима электрической сети [1].

Из множества моделей электрической сети энергосистемы в общем случае можно выделить два основных типа моделей, используемых при решении задач проектирования и оперативного управления режимами её работы.

Первый тип - это общепринятая графическая модель электрической схемы энергосистемы, описывающая в требуемом объеме и степени детализации оборудования электрической сети и отдельные объекты. Такой моделью, например, является электрическая схема сети энергосистемы или её фрагменты, представленные упрощенными или полными схемами первичных соединений электростанций и подстанций с элементами оборудования, на бумажных носителях, мозаичном диспетчерском щите или в электронном виде в ПЭВМ.

Второй тип это специализированные модели расчетных схем, описывающие максимально-упрощенную схему электрической сети энергосистемы без элементов оборудования на уровне требований применяемых математических методов и конкретных технологических задач, например, узловая расчетная схема электрической сети энергосистемы для решения задачи оценки установившегося режима или токов короткого замыкания.

С момента начала внедрения ЭВМ в электроэнергетику и до настоящего времени при решении технологических задач, в частности расчетов нормальных и аварийных режимов энергосистемы, применяются упрощенные расчетные модели второго типа, так называемые узловые модели, описываемые примитивами "узлы" и "ветви". За этими моделями при решении инженерных задач, как в проектировании, так и в эксплуатации энергосистем, сохраняется приоритет и по настоящее время. Такое положение объясняется требованиями формализации и алгоритмизации используемых математических методов, существующей

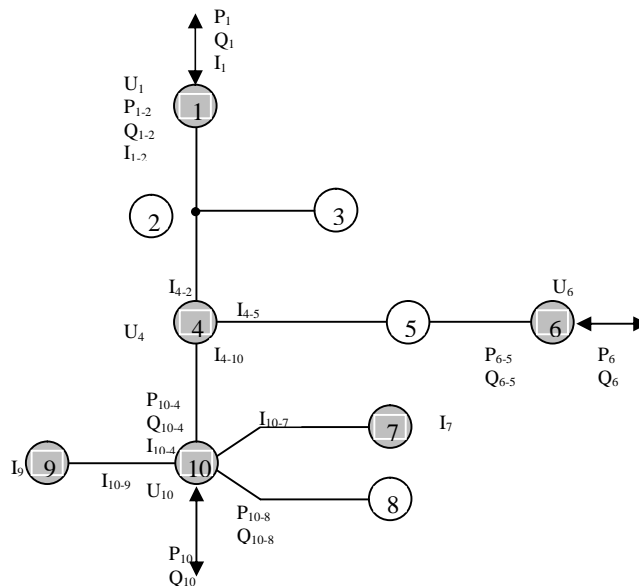
технологией расчетов, возможностями эксплуатируемой в проектировании и производстве вычислительной техники.

Современный уровень технических и программных средств позволяет реализовать задачу автоматического преобразования модели первого типа в расчетную модель второго типа для выполнения расчета, сохраняя при этом исходные параметры, состояние оборудования и коммутационных аппаратов рассматриваемого режима работы энергосистемы. Такая универсальная модель обеспечивает быстрое решение всего состава технологических задач, анализ полученных результатов и своевременную выработку последующей стратегии проектирования или оперативного управления.

В качестве исследуемого объекта для оценивания состояния в задаче определения режимной надежности рассматривается часть энергосистемы (рис.1), включающая в себя транзитные линии 110 кВ.

Рисунок 1

Структурная схема 110кВ. части энергосистемы с исходными данными телеметрии



- -Нетелемеханизированные подстанции 110кВ.
- -Телемеханизированные подстанции 110кВ.

Расчетная модель второго типа для решения задачи расчета установившегося режима основывается на решении УУР в форме баланса мощностей методом Ньютона или минимизации уравнений с применением весовых коэффициентов.

Все параметры режима связаны в каждый момент времени системой уравнений установившегося режима:

$$\begin{cases} P_k - g_{kk} U_k^2 - U_k \sum U_j [\cos d_k (g_{kj} \cos d_j + b_{kj} \sin d_j) + \sin d_k (g_{kj} \sin d_j + b_{kj} \cos d_j)] = 0 \\ Q_k - b_{kk} U_k^2 - U_k \sum U_j [\cos d_k (g_{kj} \cos d_j - b_{kj} \sin d_j) + \sin d_k (g_{kj} \sin d_j + b_{kj} \cos d_j)] = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Из вектора измерений для приведенной схемы можно выделить базисный состав (мощности нагрузок, генерирующих узлов, напряжение базисного узла) и избыточный вектор (I_{4-2} , I_{4-5} , I_{4-10} , P_{10-4} , Q_{10-4} , напряжения узлов).

При этом контрольные уравнения для избыточных измерений будут выглядеть как:

$$\begin{aligned}
 wI_{4-2} &= I_{4-2} - \frac{(U_4 \cdot \cos(d_4) + U_2 \cdot \cos(d_2)) \cdot g_{4-2} - (U_4 \cdot \sin(d_4) + U_2 \cdot \sin(d_2)) \cdot b_{4-2}}{\sqrt{3}}; \\
 wI_{4-5} &= I_{4-5} - \frac{(U_4 \cdot \cos(d_4) + U_5 \cdot \cos(d_5)) \cdot g_{4-2} - (U_4 \cdot \sin(d_4) + U_5 \cdot \sin(d_5)) \cdot b_{4-2}}{\sqrt{3}}; \\
 wI_{4-10} &= I_{4-10} - \frac{(U_4 \cdot \cos(d_4) + U_5 \cdot \cos(d_5)) \cdot g_{4-10} - (U_4 \cdot \sin(d_4) + U_5 \cdot \sin(d_5)) \cdot b_{4-10}}{\sqrt{3}} = 0; \\
 wP_{10-4} &= U_{10} g_{10-2} [(U_{10} - U_4 \cos(d_4) \cos(d_{10}) - U_4 \sin(d_4) \sin(d_{10}))] + \\
 &U_{10} b_{10-2} [(-U_4 \cos(d_4) \sin(d_{10}) + U_4 \sin(d_4) \cos(d_{10}))] - P_{10-4}; \\
 wQ_{10-4} &= U_{10} b_{10-2} [(U_{10} - U_4 \cos(d_4) \cos(d_{10}) - U_4 \sin(d_4) \sin(d_{10}))] + \\
 &U_{10} g_{10-2} [(U_4 \cos(d_4) \sin(d_{10}) - U_4 \sin(d_4) \cos(d_{10}))] - Q_{10-4}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

График нагрузки каждого потребителя, значения которой являются случайными величинами, можно считать случайным процессом. Применяв регрессионный анализ измеренных значений в соответствии со временем, можно получить аналитическую функцию для нагрузки потребителей или для мощностей и токов проходящих в транзитных линиях энергосистемы.

Модель линейной регрессии имеет вид:

$y = mx + b$ или $y = m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + b$ в случае для многомерной линейной регрессии, где зависимое значение y является функцией независимого значения x . Значения m - это коэффициенты, соответствующие каждой независимой переменной x , а b - постоянная.

Модель линейной регрессии нагрузки потребителя относительно временного интервала будет выглядеть так:

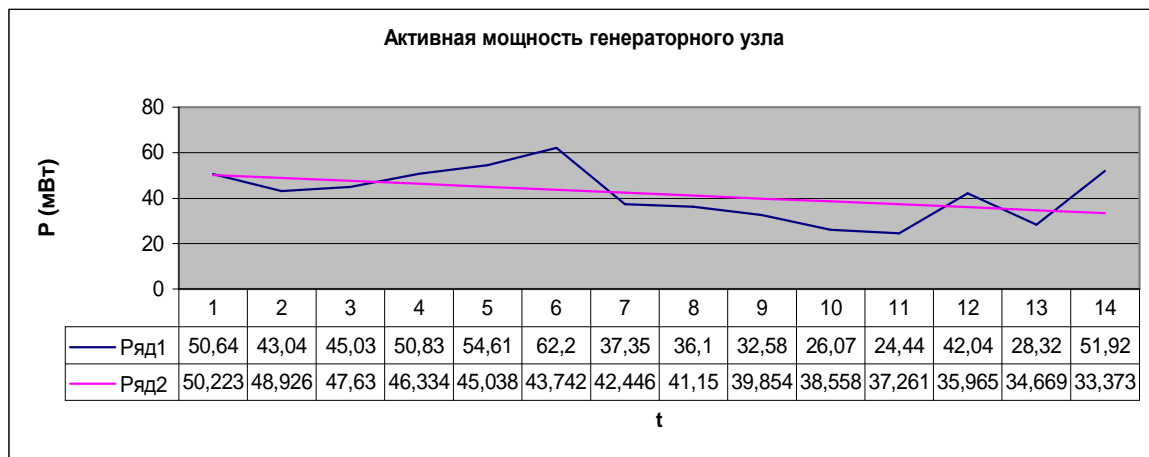
$$P(t) = mt + b.$$

В случае нормального закона распределения статистической информации:

$$m = \frac{n \sum t_i P_i - \sum t_i \sum P_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2}, \quad b = \frac{\sum t_i^2 P_i - \sum t_i \sum t_i P_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2}$$

Для примера на рисунке 2 представлен график аппроксимирующей функции и активной мощности узла 1 с выборкой по рабочему дню недели (среда) в течение двух месяцев.

Рисунок 2



Для оценки ошибки аппроксимации используются регрессионная и остаточная сумма квадратов.

Эти величины являются мерами разброса данных относительно среднего значения и линии регрессии.

Произведя расчет системы уравнений (1) и сравнив значения избыточных переменных с вычисленными значениями, можно судить о наличии ошибок, их локализации, а затем выполнить процедуры по их уменьшению.

Процедура обнаружения грубых ошибок сводится к проверке статистической гипотезы: невязка расчетных и измеренных значений должна принадлежать выборке среднеквадратического отклонения от регрессионной линии для предшествующего момента времени. Если эта гипотеза не принимается, то значит измеренные значения содержат грубую ошибку.

Измерения, входящие в контрольные уравнения с относительно малой невязкой, для которой выполняются условие

$$|s_i|/k > w_i, \quad k \approx 2 \div 3,$$

объявляются достоверными, т.е. их точность считается соответствующей априорным представлениям.

Имея статистический ряд расчетных параметров для схемы (рис. 1), на основе линейной регрессии можно составить таблицу среднеквадратического отклонения и дисперсию выборки (таблица 1,2).

Таблица 1 Среднеквадратическое отклонение и дисперсия выборки параметров линий

Линия	4-2	4-5	4-10	10-4
S Активной мощности P	–	–	–	10,87
S^2 Активной мощности P	–	–	–	118,11
S Реактивной мощности Q	–	–	–	2,2

S^2 Реактивной мощности Q	-	-	-	4,85
S Тока I	53,78	12,4	53,58	-
S^2 Тока I	2892,07	153,75	2870,59	-

Таблица 2 Среднеквадратическое отклонение и дисперсия выборки параметров узлов

№ узла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S угла фаз d	0,014	0,012	0,012	0,0081	0,0084	0,0092	0,0005	0,0009	0,0004	0
S^2 угла фаз d	0,00019	0,00014	0,00014	6,57E-05	6,9E4-05	8,47E-05	2,11E-07	8,3E-07	1,3E-07	0
S напряжения U	0,68	0,64	0,64	0,58	0,54	0,48	0,73	0,72	0,73	0,65
S^2 напряжения U	0,47	0,41	0,41	0,34	0,3	0,23	0,53	0,51	0,53	0,42
S P	10,56	0	1,87	0,87	1,79	3,5	1,1	1,13	0,79	11,8
S^2 P	111,66	0	3,51	0,78	3,2	12,29	1,21	1,28	0,61	139
S Q	5,03	0	0,51	0,18	0,33	2,37	0,22	0,39	0,23	2,26
S^2 Q	25,35	0	0,26	0,032	0,11	5,64	0,048	0,15	0,05	5,1

На основании регрессионного анализа составляется ковариационная матрица погрешностей вектора измерений, которая определяет априорную погрешность вектора измерений. Обычно полагается, что ковариационная матрица R_v – диагональная, т.е. погрешности двух различных измерений некоррелированы.

Математическая задача оценивания состояния заключается в том, что по измеренным параметрам режима U и P определить такие значения модулей и фаз напряжений в узлах, при которых обеспечиваются минимальные отклонения измеренных значений параметров U от значений тех же параметров $U(x)$, вычисленных при найденных модулях и фазах напряжений.

Применение метода Ньютона при оценивании состояния с необработанной телеметрией приводит к грубому, а в некоторых случаях и невозможному определению режима работы электрической сети [2]. Вследствие этого для нахождения минимального отклонения наиболее часто используется критерий минимума сумм взвешенных квадратов отклонений измеренных значений от вычисленных, т.е. определяется минимум функции:

$$F = \left[\bar{V} - V(x) \right]^T \cdot R^{-1} \cdot \left[\bar{V} - V(x) \right], \quad (3)$$

где $x = (u_1, \dots, u_n, d_1, \dots, d_{n-1})$ является вектором состояния, V_x - вектор нелинейных зависимостей, которыми могут быть УУР в форме баланса мощностей с контрольными уравнениями (ограничений в виде равенств), R – диагональная матрица, содержащая на диагонали дисперсии ошибок соответствующих измерений.

Соответственно величины $\frac{1}{S_i^2} (i = 1, \dots, m)$ выступают как весовые коэффициенты при слагаемых в критерии (3). В состав слагаемых критерия F следует вводить данные только тех измерений, для которых $S_i^2 \neq 0$.

Имея сбалансированный режим по телеизмерениям узлов 1 и 6, справедливо утверждение, что, $S_{P1}^2 = 0$, $S_{P6}^2 = 0$, $S_{Q1}^2 = 0$, $S_{Q6}^2 = 0$, а значит, в состав критерия весовые коэффициенты для указанных измерений вводиться не будут.

В то же время необходимо корректировать дорасчетные измерения мощности ненаблюдаемых узлов 3, 4 и расчетного узла 5 для которых $S_i^2 \neq 0$. В соответствии с этим для решения поставленной задачи главная диагональ матрицы весовых коэффициентов при минимизации функции методом наименьших квадратов без применения контрольных уравнений будет иметь ряд:

$$D_R = \{S_{d1}^2, \dots, S_{d9}^2, S_{U1}^2, \dots, S_{U9}^2, S_{P3}^2, S_{P4}^2, S_{P5}^2, S_{Q3}^2, S_{Q4}^2, S_{Q5}^2\}$$

Тогда задача $\min_v F$ при ограничении $w_k(v) = 0$ является типичной задачей нелинейного программирования

$$\begin{pmatrix} \Delta d_1 \\ \dots \\ \Delta d_9 \\ \Delta U_1 \\ \dots \\ \Delta U_9 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1^{uzm} \\ \dots \\ d_9^{uzm} \\ U_1^{uzm} \\ \dots \\ U_9^{uzm} \\ P_3^{uzm} \\ P_4^{uzm} \\ P_5^{uzm} \\ Q_3^{uzm} \\ Q_4^{uzm} \\ Q_5^{uzm} \end{pmatrix} - \left| R \right| \cdot \left| \frac{\partial w_k}{\partial x} \right|^T \cdot \left[\left| \frac{\partial w_k}{\partial x} \right| \cdot \left| R \right| \cdot \left| \frac{\partial w_k}{\partial x} \right|^T \right]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} w_{P1} \\ \dots \\ w_{P9} \\ w_{Q1} \\ \dots \\ w_{Q9} \end{pmatrix}.$$

При добавлении контрольных уравнений для параметров I_{4-2} , I_{4-5} , I_{4-10} , P_{10-4} , Q_{10-4} , главная диагональ матрицы весовых коэффициентов имеет ряд:

$$D_R = \{S_{d1}^2, \dots, S_{d9}^2, S_{U1}^2, \dots, S_{U9}^2, S_{I4-2}^2, S_{I4-5}^2, S_{I4-10}^2, S_{P10-4}^2, S_{Q10-4}^2, S_{P3}^2, S_{P4}^2, S_{P5}^2, S_{Q3}^2, S_{Q4}^2, S_{Q5}^2\}$$

В этом случае задача нелинейного программирования сводится к решению уравнения:

$$\begin{pmatrix} \Delta d_1 \\ \dots \\ \Delta d_9 \\ \Delta U_1 \\ \dots \\ \Delta U_9 \\ \Delta I_{4-2} \\ \Delta I_{4-5} \\ \Delta I_{4-10} \\ \Delta P_{10-4} \\ \Delta Q_{10-4} \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1^{u3M} \\ \dots \\ d_9^{u3M} \\ U_1^{u3M} \\ \dots \\ U_9^{u3M} \\ I_{4-2}^{u3M} \\ I_{4-5}^{u3M} \\ I_{4-10}^{u3M} \\ P_{10-4}^{u3M} \\ Q_{10-4}^{u3M} \\ P_3^{u3M} \\ P_4^{u3M} \\ P_5^{u3M} \\ Q_3^{u3M} \\ Q_4^{u3M} \\ Q_5^{u3M} \end{pmatrix} - |R| \cdot \left| \frac{\partial w_k}{\partial x} \right|^T \cdot \left[\left| \frac{\partial w_k}{\partial x} \right| \cdot |R| \cdot \left| \frac{\partial w_k}{\partial x} \right|^T \right]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} W_{P1} \\ \dots \\ W_{P9} \\ W_{Q2} \\ \dots \\ W_{Q9} \\ W_{I4-2} \\ W_{I4-5} \\ W_{I4-10} \\ W_{P10-4} \\ W_{Q10-4} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$\left| \frac{\partial w_k}{\partial x} \right| = \begin{pmatrix} \frac{dwP_1}{dd_1} & \dots & \frac{dwP_1}{dd_9} & \frac{dwP_1}{dU_1} & \dots & \frac{dwP_1}{dU_9} & \frac{dwP_1}{dI_{4-2}} & \frac{dwP_1}{dI_{4-5}} & \frac{dwP_1}{dI_{4-10}} & \frac{dwP_1}{dP_{10-4}} & \frac{dwP_1}{dQ_{10-4}} & \frac{dwP_1}{dP_3} & \dots & \frac{dwP_1}{dQ_5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dwP_9}{dd_1} & \dots & \frac{dwP_9}{dd_9} & \frac{dwP_9}{dU_1} & \dots & \frac{dwP_9}{dU_9} & \frac{dwP_9}{dI_{4-2}} & \frac{dwP_9}{dI_{4-5}} & \frac{dwP_9}{dI_{4-10}} & \frac{dwP_9}{dP_{10-4}} & \frac{dwP_9}{dQ_{10-4}} & \frac{dwP_9}{dP_3} & \dots & \frac{dwP_9}{dQ_5} \\ \frac{dwQ_1}{dd_1} & \dots & \frac{dwQ_1}{dd_9} & \frac{dwQ_1}{dU_1} & \dots & \frac{dwQ_1}{dU_9} & \frac{dwQ_1}{dI_{4-2}} & \frac{dwQ_1}{dI_{4-5}} & \frac{dwQ_1}{dI_{4-10}} & \frac{dwQ_1}{dP_{10-4}} & \frac{dwQ_1}{dQ_{10-4}} & \frac{dwQ_1}{dP_3} & \dots & \frac{dwQ_1}{dQ_5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dwQ_9}{dd_1} & \dots & \frac{dwQ_9}{dd_9} & \frac{dwQ_9}{dU_1} & \dots & \frac{dwQ_9}{dU_9} & \frac{dwQ_9}{dI_{4-2}} & \frac{dwQ_9}{dI_{4-5}} & \frac{dwQ_9}{dI_{4-10}} & \frac{dwQ_9}{dP_{10-4}} & \frac{dwQ_9}{dQ_{10-4}} & \frac{dwQ_9}{dP_3} & \dots & \frac{dwQ_9}{dQ_5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dwI_{4-2}}{dd_1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{dwI_{4-2}}{dQ_5} \\ \frac{dwI_{4-5}}{dd_1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{dwI_{4-5}}{dQ_5} \\ \frac{dwI_{4-10}}{dd_1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{dwI_{4-10}}{dQ_5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dwP_{10-4}}{dd_1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{dwP_{10-4}}{dQ_5} \\ \frac{dwQ_{10-4}}{dd_1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{dwQ_{10-4}}{dQ_5} \end{pmatrix}$$

Результаты небалансов пяти итераций для уравнений установившегося режима и контрольных уравнений приведены в таблицах (3,4)

Таблица 3 Небалансы уравнений установившегося режима

Параметр/№ узла	1	2	3	4	5	6	7	8	9
wP I итерация	0,1395	-0,1179	1,0206	0,0123	0,004	0,0007	0,0035	0,0415	0,0033
wP II итерация	-0,0027	-0,2242	0,0231	0,0004	0,0001	0	0	0	0
wP III итерация	0,0012	0,0376	0,0192	0,0001	0	0	0	0	0
wP IV итерация	0,0001	0,0056	-0,0004	0	0	0	0	0	0
wP V итерация	0	0,0004	-0,0002	0	0	0	0	0	0
wQ I итерация	0,051	0,5446	-0,3739	0,0107	0,001	0,0008	0,0052	0,0511	0,0046
wQ II итерация	-0,0002	-0,144	-0,0375	0,0008	0	0	0	0	0
wQ III итерация	-0,0007	-0,0345	0,0095	0,0001	0	0	0	0	0
wQ IV итерация	0	0,0057	0,003	0	0	0	0	0	0
wQ V итерация	0	-0,0009	0,0005	0	0	0	0	0	0

Таблица 4 Небалансы контрольных уравнений

Итерация /Параметр	wI ₄₋₂	wI ₄₋₅	wI ₄₋₁₀	wP ₁₀₋₄	wQ ₁₀₋₄
I итерация	-0,0067	-0,0135	-0,0189	-0,0152	0,2686
II итерация	-0,0105	0,0019	-0,0011	0,0116	0,0153
III итерация	0,0022	-0,0004	0	-0,0022	0,0013
IV итерация	-0,0004	0,0001	0	0,0005	-0,0001
V итерация	0	0	0	0,0001	0

В результате расчетов решается задача сглаживания ошибок измерений (фильтрация). Именно эта задача называется оцениванием состояния, включающая в себя обнаружение грубых ошибок.

Перерывы или ограничения электроснабжения возможны при перегрузке отдельных элементов ЛЭП и трансформаторов, что определяет надежность электроснабжения потребителей. Увеличение тока, либо снижение напряжения за установленные пределы могут вызвать внезапное отключение противоаварийной автоматикой или ограничение нагрузки потребителя по указанию диспетчера. Контроль режима линий в реальном масштабе времени позволяет своевременно принять меры и предупредить аварийную ситуацию. При решении этой задачи для модели на рисунке (1) следует отметить параметры, контроль которых позволяет решить задачу определения статической устойчивости для транзитных линий и контроля напряжения узлов электрической системы:

$I_{1-2}, I_{4-2}, I_{4-5}, I_{6-5}, I_{4-10}, P_{10}, Q_{10}, U_1, U_4, U_{10}$,

где контрольные уравнения для $I_{1-2}, I_{4-2}, I_{4-5}, I_{6-5}, I_{4-10}$ уже определены, а для корректировки параметров P_{10}, Q_{10} базисного узла применяются УУН в форме балансов мощностей:

$$\begin{aligned}
 wP_{10} = & P_{10} - g_{10}U_{10}^2 - U_{10}U_4[\cos d_{10}(g_{10-4} \cos d_4 + b_{10-4} \sin d_4) + \sin d_{10}(g_{10-4} \sin d_4 + b_{10-4} \cos d_4)] - \\
 & U_{10}U_7[\cos d_{10}(g_{10-7} \cos d_7 + b_{10-7} \sin d_7) + \sin d_{10}(g_{10-7} \sin d_7 + b_{10-7} \cos d_7)] - \\
 & U_{10}U_8[\cos d_{10}(g_{10-8} \cos d_8 + b_{10-8} \sin d_8) + \sin d_{10}(g_{10-8} \sin d_8 + b_{10-8} \cos d_8)] - \\
 & U_{10}U_9[\cos d_{10}(g_{10-9} \cos d_9 + b_{10-9} \sin d_9) + \sin d_{10}(g_{10-9} \sin d_9 + b_{10-9} \cos d_9)];
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 wQ_{10} = & Q_{10} - b_{10}U_{10}^2 - U_{10}U_4[\cos d_{10}(g_{10-4} \cos d_4 - b_{10-4} \sin d_4) + \sin d_{10}(g_{10-4} \sin d_4 + b_{10-4} \cos d_4)] - \\
 & U_{10}U_7[\cos d_{10}(g_{10-7} \cos d_7 - b_{10-7} \sin d_7) + \sin d_{10}(g_{10-7} \sin d_7 + b_{10-7} \cos d_7)] - \\
 & U_{10}U_8[\cos d_{10}(g_{10-8} \cos d_8 - b_{10-8} \sin d_8) + \sin d_{10}(g_{10-8} \sin d_8 + b_{10-8} \cos d_8)] - \\
 & U_{10}U_9[\cos d_{10}(g_{10-9} \cos d_9 - b_{10-9} \sin d_9) + \sin d_{10}(g_{10-9} \sin d_9 + b_{10-9} \cos d_9)].
 \end{aligned} \tag{6}$$

Узлы 1, 6 имеют сбалансированные значения мощностей, что означает примерное равенство нулю дисперсий ошибок измерений и поэтому в дальнейшем I_{1-2} , I_{6-5} , при анализе режима рассматриваться не будут.

В течение суток с интервалом в 12 минут проведена выборка ретроспективы телеизмерений. В каждый момент времени произведен расчет режима электрической системы методами Ньютона, квадратичной минимизации функции с применением весовых коэффициентов для мощностей узлов $P_3, P_4, P_5, Q_3, Q_4, Q_5$ и квадратичной минимизации, с применением контрольных уравнений для $I_{4-2}, I_{4-5}, I_{4-10}, P_{10}, Q_{10}$. Дисперсии ошибок соответствующих измерений (весовые коэффициенты) найдены по вышеприведенной методике.

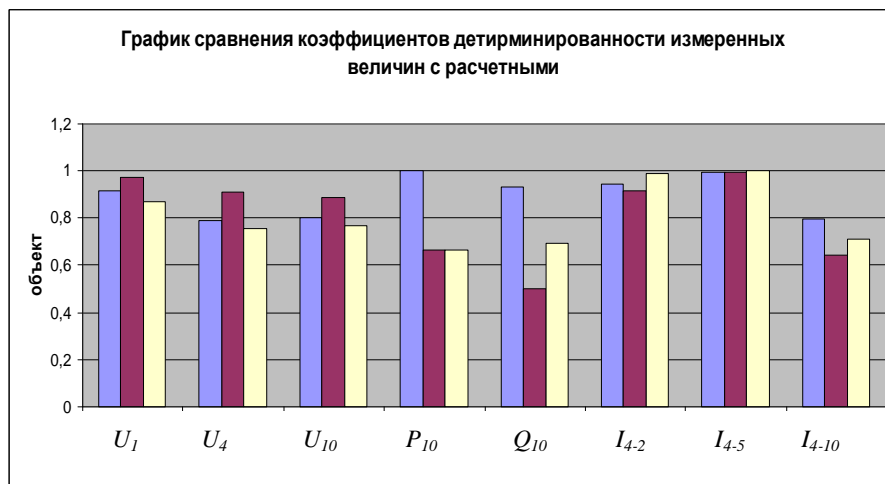
Анализ измеренных и расчетных параметров производится на основе коэффициента детерминированности r^2 (рис.3) и F-статистики (табл. 5).

Коэффициент детерминированности показывает, насколько хорошо уравнение, полученное с помощью регрессионного анализа, описывает фактические данные.

Коэффициент детерминированности может принимать значения от 0 до 1, причем 1 соответствует полному совпадению прогнозируемых и фактических данных. Хорошим приближением считается такое, при котором значение коэффициента больше 0,9.

F-статистика используется совместно с F-значениями для определения вероятности того, что данные действительно описываются указанным выражением или совпадение вызвано случайными флуктуациями.

Рисунок 3



■ - Минимизация функции методом наименьших квадратов с применением весовых коэффициентов и контрольных уравнений.

■ - Минимизация функции методом наименьших квадратов с применением весовых коэффициентов без контрольных уравнений.

□ - Расчет методом Ньютона.

Таблица 5 F-статистика ранее основных параметров электрической системы

Наименование параметра и объекта	Метод расчета		
	Метод Ньютона	Метод наименьших квадратов с применением весовых коэффициентов	Метод наименьших квадратов с применением весовых коэффициентов и контрольных уравнений
F-статистика U_1	153	784,7	250,3
F-статистика U_4	70,4	233,8	87
F-статистика U_6	75,5	180,4	94,5
F-статистика P_{10}	45,9	45,9	117818,8
F-статистика Q_{10}	23	23,1	308,6
F-статистика I_{4-2}	1775,1	245,9	374,2
F-статистика I_{4-5}	31622,5	5249	9165,9
F-статистика I_{4-10}	56,6	41,6	90,2
F-статистика табл.	4,27		

Анализируя данные рисунка 3 можно отметить, что параметры P_{10} и Q_{10} имеют малое значение коэффициента детерминированности в случае расчета режима по методу Ньютона и минимизации методом наименьших квадратов без применения контрольных уравнений. Это говорит о неточном описании уравнения регрессионного анализа фактических данных, что и надо было бы предполагать из-за того, что узел 10 является базисным и в этом случае расчетные значения мощности этого узла включают в себя погрешности измерений всех узлов электрической схемы. Добавление контрольных уравнений (2, 5, 6) позволяет более точно рассчитать эти параметры вследствие того, что ошибки измерений распределяются между узлами в зависимости от значения весового коэффициента заданного для каждого параметра.

Ранее рассматривалось соответствие весовых коэффициентов при статистическом анализе за прошедший период времени. В дальнейшем приводится анализ применения весовых коэффициентов в реальном масштабе времени на основе рассмотрения коэффициента детерминированности и F - статистики.

По вышеприведенной методике производится сравнение расчетных режимных параметров реального времени, с применением весовых коэффициентов, полученных в результате регрессионного анализа:

- с интервалом в один час за предыдущие сутки;

- во время контрольного замера за два месяца до времени измерения;

В таблице 6 приведены значения весовых коэффициентов для перечисленных случаев.

Таблица 6

$\frac{1}{S^2}$ \ параметр	U_1	U_4	U_6	P_{10}	Q_{10}	I_{4-1}	I_{4-5}	I_{4-10}
$\frac{1}{S^2}$ за предыдущие сутки	2,85	2,28	2,06	0,03	5,35	547	5064	1152
$\frac{1}{S^2}$ при контрольном замере	1,59	1,73	1,85	0,13	5,4	3301	60887	4042

При минимизации функции методом наименьших квадратов получены результаты коэффициента детерминированности (табл. 7) и F-статистики (табл. 8) для случаев с коэффициентами полученными за время предыдущих суток и по контрольному замеру относительно измеренных параметров реального времени.

Таблица 7 Коэффициенты детерминированности

Наименование параметра и объекта	Метод расчета	
	Метод наименьших квадратов с применением весовых коэффициентов вычисленных во время предыдущих суток	Метод наименьших квадратов с применением весовых коэффициентов вычисленных во время контрольного замера
$r^2 U_1$	0,889352524	0,87507
$r^2 U_4$	0,695968925	0,712728
$r^2 U_6$	0,716275096	0,502085
$r^2 P_{10}$	0,999999867	0,900669
$r^2 Q_{10}$	0,991109903	0,592977
$r^2 I_{4-2}$	0,919463165	0,94425
$r^2 I_{4-5}$	0,999114172	0,999054
$r^2 I_{4-10}$	0,972086007	0,979682

Таблица 8 F-статистика

Наименование параметра и объекта	Метод расчета	
	Метод наименьших квадратов с применением весовых коэффициентов вычисленных во время предыдущих суток	Метод наименьших квадратов с применением весовых коэффициентов вычисленных во время контрольного замера
F-статистика U_1	184,867372	161,10312
F-статистика U_4	52,6501616	57,063428
F-статистика U_6	58,0644384	23,192586
F-статистика P_{10}	173423640	208,54888
F-статистика Q_{10}	2564,14828	23

F-статистика	I_{4-2}	262,583608	389,55945
F-статистика	I_{4-5}	25941,3946	24284,462
F-статистика	I_{4-10}	800,959507	1109,0166
F-статистика табл.		4,27	

Коэффициенты детерминированности при весовых коэффициентах за предыдущие сутки имеют большее значение, чем при коэффициентах доверия контрольного замера и в основном имеют величину больше 0,9. Кроме того по данным F- статистики (таблица 8) видно, что параметры P_{10} и Q_{10} имеют не только большее значение в первом случае по сравнению со вторым, но и превышают на несколько порядков.

На основе этого можно сделать вывод, что весовые коэффициенты, вычисленные за время предыдущих суток, лучше описывают значения измерений в реальном масштабе времени, чем коэффициенты, полученные во время контрольного замера. Применение контрольных уравнений для параметров I_{1-2} , I_{4-2} , I_{4-5} , I_{6-5} , I_{4-10} , P_{10} , Q_{10} позволяет максимально приблизить значения расчетных величин к измеренным и оптимально распределить ошибки измерений по всем узлам электрической системы в соответствии с коэффициентом доверия для каждого параметра в узлах схемы.

При сравнении методов расчета можно сказать, что количество итераций увеличивается при применении контрольных уравнений, но при этом увеличивается точность рассчитанных параметров электрической системы.

Литература

1. Гамм А.З., Гришин Ю.А., Окин А.А. Развитие АСДУ ЕЭС с учетом новых условий и механизмов управления. Энергетика России в переходный период: проблемы и научные основы развития и управления. - Новосибирск, Наука, 1996.
2. Фундаментальные исследования. № 9 2006 г. Москва. Международная научная конференция 1-8 октября 2006г. Греция (Лутраки). "Анализ надежности электроэнергетических систем с исходными данными телеметрии". Ярцев С.Д.