1. Руднік А.А., Дубровський В.В. Основні напрямки розвитку газотранспортної системи України. Нафтова і газова промисловість. 1999. №4. 2. Волков М.М., Михеев А.Л., Конев К.А. Справочник работника газовой промышленности - М. 1989. 3. Банди Б. Методы оптимизации - М. 1988.

УДК 215.111.

А. Тевяшев, Т. Тимофеева, О. Синельникова
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ В РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

© Тевяшев А., Тимофеева Т., Синельникова О., 2002

Розглянута проблема мінімізації втрат потужності в сталому режимі електроенергетичної системи. Побудовано алгоритм вирішення задачі оптимізації режиму функціонування електроенергетичної системи, який враховує існуючі режимні обмеження щодо вимог надійності режиму і якості електроенергії, а також обмеження на діапазон зміни регульованих параметрів режиму відповідно до технічних норм.

In the given work is considered a problem of minimization of watt losses in steady state mode of electrical power system. Algorithm of the decision of a problem of optimization of a mode of functioning of electrical power system is constructed which takes into account operating of restriction, proceeding from the requirements of reliability of a mode and quality of the electric power, and also restriction on a range of change of adjustable parameters of a mode, according to technical norms.

Введение

В настоящее время наметилась тенденция внедрения новых технологий в систему управления электроэнергетическими комплексами. Основной стратегией новых технологий является минимизация экономических потерь, связанных с производством, передачей и потреблением электроэнергии. Внедрение ресурсосберегающих технологий направлено на минимизацию затрат топливных, водных и других видов ресурсов, а также на оптимизацию режима ЭЭС. Оптимальное управление режимом ЭЭС позволяет снизить технические потери мощности, связанные с передачей электроэнергии. В этой работе предлагается алгоритм минимизации потерь мощности в установившемся режиме функционирования региональной электрической сети.

Постановка задачи

Анализ оптимальности функционирования электроэнергетической системы осуществляется для установившегося режима ЭЭС. Модель текущего состояния системы включает: топологию сети, т.е. состав узлов и связей расчетной схемы ЭЭС, соответствующей положению коммутационной аппаратуры на текущий момент времени; параметры элементов расчетной схемы (сопротивления, проводимости, коэффициенты трансформации, коэффициенты статических нагрузок и генераторов и т. д.). Расчитывая установившийся режим ЭЭС, определяют параметры режима: напряжения и фазы во всех узлах расчетной схемы; перетоки активной и реактивной мощности и токи в элементах рабочей схемы (в связях); мощности генерации и потребления (токи) в узлах расчетной схемы; статистические характеристики и динамику изменения этих параметров.

В качестве критерия оптимальности режима рассматривается критерий минимума потерь активной мощности. При этом критерии оптимизировать режим можно с помощью таких управляющих воздействий, как реактивные мощности генерирующих узлов, коэффициенты трансформации регулируемых трансформаторов, мощности синхронных компенсаторов (СК) и количество включенных блоков статических конденсаторов.

Таким образом, для стационарного режима целевую функцию задачи оптимизации режима можно записать в таком виде:

$$\Delta P_{\Sigma}\left(\overline{X};\overline{Y};M\overline{Z}\right) \to \min_{\overline{X}\in\Omega},$$

где $\Delta P_{\Sigma}\left(\overline{X};\overline{Y};M\overline{Z}\right)$ – суммарные потери активной мощности в сети; $\overline{X}$ – вектор управления электросетью; $\overline{Y}$ – вектор детерминированных параметров режима; $\overline{Z}(\omega)$ – вектор случайных параметров режима (активная и реактивная мощности нагрузки). В такой постановке задачи оптимизации режима ЭЭС для расчетов установившегося режима, используются математические ожидания величины активной и реактивной мощностей нагрузки.

Вектор управления режимом имеет вид:

$$\overline{X} = \left\{\overline{K}_{TR}, \overline{Q}_{ГЕН}, \overline{S}_{КОМП}, \overline{N}_{КОНД}\right\},$$

где $\overline{K}_{TR}$ – вектор значений коэффициентов трансформации, $\overline{Q}_{ГЕН}$ – вектор количества выработки генераторами реактивной мощности, $\overline{S}_{КОМП}$ – вектор мощностей СК, $\overline{N}_{КОНД}$ – вектор количества включенных блоков статических конденсаторов. В этой работе рассмотрен алгоритм минимизации потерь активной мощности при управлении коэффициентами трансформации регулируемых трансформаторов.

Согласно математическим моделям физических процессов, проходящих в электроэнергетической системе, суммарные потери активной мощности определяются по таким формулам:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\Delta P_{ij}\left(\overline{X}\right),$$

$$\Delta P_{ij}(\overline{X}) = \sqrt{3}U_k\left(\cos(\delta_k)I_a + \sin(\delta_k)I_r\right) + \sqrt{3}U_j\left(\cos(\delta_j)I_a - \sin(\delta_j)I_r\right)$$

$$I_a = -\frac{1}{\sqrt{3}}\left(U_k\cos(\delta_k) - U_j\cos(\delta_j)\right)g_{kj}\left(\overline{X}\right) - \frac{1}{\sqrt{3}}\left(U_k\sin(\delta_k) - U_j\sin(\delta_j)\right)b_{kj}\left(\overline{X}\right)$$

$$I_r = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(U_k\cos(\delta_k) - U_j\cos(\delta_j)\right)b_{kj}\left(\overline{X}\right) - \frac{1}{\sqrt{3}}\left(U_k\sin(\delta_k) - U_j\sin(\delta_j)\right)g_{kj}\left(\overline{X}\right)$$

$$i,j,k = \overline{1,m},$$

где m – количество узлов сети; δ_j, δ_k – фаза напряжения в узлах i и k, соответственно; I_a, I_r – токи в сети; g_{ij}, b_{ij} – активные и реактивные проводимости связи ij.

Ограничениями в данной задаче минимизации потерь является выполнение уравнений балансов по активной и реактивной мощностях в узлах сети, которые являются математической моделью системы в стационарном режиме. Уравнения балансов имеют вид:

$$\varphi_k = P_k - g_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j \\ j\neq k}} U_j \left(g_{kj}\cos(\delta_k - \delta_j) - b_{kj}\sin(\delta_k - \delta_j)\right) = 0,$$

$$\psi_k = Q_k - b_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j \\ j\neq k}} U_j \left(b_{kj}\cos(\delta_k - \delta_j) + g_{kj}\sin(\delta_k - \delta_j)\right) = 0,\ j,k = \overline{1,m}\ .$$

Кроме того, на переменные накладываются такие ограничения:

А) Ограничения на регулируемые параметры режима – коэффициенты трансформации трансформаторов

$$K'_{tr_j} \le K_{tr_j} \le K''_{tr_j}\ ,$$

где j – количество регулировочных трансформаторов, K'_{tr_j}, K''_{tr_j} – нижний и верхний пределы изменения коэффициентов трансформации, определяемые в зависимости от типа трансформатора в соответствии с учетом технического состояния оборудования и показателей надежности.

Б) Для соблюдения условий надежности электроснабжения и качества электроэнергии рассматриваются такие режимные ограничения:

$$U'_k \le U_k(\overline{K}_{tr}) \le U''_k\ ,$$

где к – количество узлов в энергосистеме, U'_k, U''_k – предельные значения модулей узловых напряжений.

В результате структуризации и анализа задачи оптимизации режима функционирования электроэнергетической системы сформирована общая задача математического программирования.

Алгоритм решения

Для решения этой задачи наиболее целесообразно применять дифференциальный алгоритм. Основной метода является анализ частных производных целевой функции по регулируемым переменным, с учетом динамики изменения зависимых параметров. Дифференциальный алгоритм, учитывая специфику задачи, достаточно прост в реализации, обеспечивает получение решения при любой структуре и параметрах системы за сравнительно небольшое время, что существенно выделяет его из группы подобных методов, при выборе метода для создания программного обеспечения для управления ЭЭС.

Для удобства изложения метода, решения сформулированной задачи математического программирования введем обозначения, в терминах которых рассматриваемая задача примет вид:

$$F(\overline{X},\overline{U}) \to \min_{\overline{X}\in\Omega\subset R^n}\ ,$$

$$\Omega:\{\varphi_k(\overline{X},\overline{U})=0,$$
$$\psi_k(\overline{X},\overline{U})=0,$$
$$X_i^{+}\le X_i\le X_i^{++}$$
$$U_k^{+}\le U_k(\overline{X})\le U_k^{++}$$

$$k=\overline{1,m},\, i=\overline{1,n}\}.$$

Рассмотрим основные положения, необходимые для выполнения шагов дифференциального алгоритма.

Необходимые условия для точки локального минимума.

Учитывая, что точка $\vec{X}^*$ – точка минимума целевой функции может находиться как внутри, так и на границе области Ω. Необходимые условия будут иметь вид:

$$\text{если } X_j^*=X_j^+,\ \text{то } \left(\frac{\delta F}{\delta X_j}\right)^*\ge 0;$$

$$\text{если } X_j^*=X_j^{++},\ \text{то } \left(\frac{\delta F}{\delta X_j}\right)^*\le 0;$$

$$\text{если } X_j^+\le X_j^*\le X_j^{++},\ \text{то } \left(\frac{\delta F}{\delta X_j}\right)^*=0;\ j=\overline{1,n}.$$

Здесь

$$\left(\frac{\delta F}{\delta\overline{U}}\right)'=\left(\frac{\partial F}{\partial\overline{X}}\right)'+\left(\frac{\partial F}{\partial\overline{U}}\right)'\frac{\partial\overline{U}}{\partial\overline{X}},\quad \frac{\partial\overline{U}}{\partial\overline{X}}=-W^{-1}C,$$

где $\partial F/\partial\overline{X}$ – n-мерный вектор производных целевой функции по переменным $\overline{X}$; $\dfrac{\partial\overline{U}}{\partial\overline{X}}$ – матрица производных (размерности $m\times n$) вектора $\overline{U}$ по вектору $\overline{X}$; W и C – матрицы Якоби, имеющие такой вид:

$$W=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\varphi_1}{\partial U_1} & \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial U_2} & \dots & \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial U_m}\\ \dfrac{\partial\psi_1}{\partial U_1} & \dfrac{\partial\psi_1}{\partial U_2} & \dots & \dfrac{\partial\psi_1}{\partial U_m}\\ \dots & \dots & \dots & \dots\\ \dfrac{\partial\varphi_m}{\partial U_1} & \dfrac{\partial\varphi_m}{\partial U_2} & \dots & \dfrac{\partial\varphi_m}{\partial U_m}\\ \dfrac{\partial\psi_m}{\partial U_1} & \dfrac{\partial\psi_m}{\partial U_2} & \dots & \dfrac{\partial\psi_m}{\partial U_m}\end{bmatrix};\qquad C=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial\varphi_1}{\partial X_1} & \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial X_2} & \dots & \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial X_n}\\ \dfrac{\partial\psi_1}{\partial X_1} & \dfrac{\partial\psi_1}{\partial X_2} & \dots & \dfrac{\partial\psi_1}{\partial X_n}\\ \dots & \dots & \dots & \dots\\ \dfrac{\partial\varphi_m}{\partial X_1} & \dfrac{\partial\varphi_m}{\partial X_2} & \dots & \dfrac{\partial\varphi_m}{\partial X_n}\\ \dfrac{\partial\psi_m}{\partial X_1} & \dfrac{\partial\psi_m}{\partial X_2} & \dots & \dfrac{\partial\psi_m}{\partial X_n}\end{bmatrix}$$

Достаточные условия для точки локального минимума.

1. $\left(\frac{\delta F}{\delta X_j}\right)^* > 0,$ при $X_j^* = X_j^+$;

2. $\left(\frac{\delta F}{\delta X_j}\right)^* < 0,$ при $X_j^* = X_j^{++}$;

3. Положительная определенность подматрицы Гессе S^*, при $\left(\frac{\delta F}{\delta X_j}\right)^* = 0$, $j = \overline{1,n}$.

Матрица S – матрица вторых условных производных целевой функции по переменным

$$S = P_{xx} - P_{xu}W^{-1}C - (P_{xu}W^{-1}C)' + (W^{-1}C)'P_{uu}W^{-1}C,$$

$$P = H - \sum_{i=1}^{2m} \lambda_i H_i, \quad \overline{\lambda}' = \left(\frac{\partial F}{\partial \overline{U}}\right)' W^{-1},$$

где H – матрица Гессе, матрица вторых производных $\left\|\frac{\partial^2 F}{\partial X_i \partial X_j}\right\|$, матрицы H_i – также матрицы вторых производных, i-го уравнения ограничения.

Достаточные и необходимые условия составляют основу дифференциального алгоритма решения задачи условной минимизации с двусторонними ограничениями.

Суть алгоритма такая. В точке $\overline{X}^0$ – точке, соответствующей номинальным значениям параметров, проверяются необходимые условия точки минимума. Если какие-либо из условий по хотя бы одной из переменных не выполняются, то осуществляется шаг алгоритма. Каждый шаг дифференциального алгоритма состоит из двух этапов: формирование множества переменных, изменение которых улучшит значение целевой функции и определение шага изменения.

Из анализа видно, что выбор направления и шага будет осуществляться в соответствии с такими условиями.

Если $\left(\frac{\delta F}{\delta X_r}\right)^{(k)} > 0$, $X_r^{(k)} \neq X_r^+$, то $\Delta X_r^{(k)} < 0$;

$$\Delta X_r^{(k)} = \max_{\Delta X_r^{(k)} < 0} [X_r^+ - X_r^{(k)}; \quad \Delta X_r^{(k)}\Big|_{\frac{\delta F}{\delta X_r} = 0}; \quad \max_{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)} < 0} \frac{U_i^{++} - U_i^{(k)}}{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r^*}\right)^{(k)}}; \quad \max_{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)} > 0} \frac{U_i^+ - U_i^{(k)}}{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)}}].$$

$$\Delta X_r^{(k)} = \min_{\Delta X_r^{(k)}>0} [X_r^{++} - X_r^{(k)};\quad \Delta X_r^{(k)}\Big|_{\frac{\delta F}{\delta X_r}=0};\ \min_{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)}<0} \frac{U_i^{+} - U_i^{(k)}}{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)}};\ \min_{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)}>0} \frac{U_i^{++} - U_i^{(k)}}{\left(\frac{\delta U_i}{\delta X_r}\right)^{(k)}}].$$

Заключение

Алгоритм оптимизации режима ЭЭС тестируется реальной распределительной электросетью Нижневартовского предприятия электрических сетей. Результаты расчетов показали, что этот метод оптимизации режима функционирования ЭЭС:

– позволяет уменьшить суммарные потери мощности;

– можно применять в условиях реального времени; время вычислений 20 с.;

– обеспечивает решение, соответствующее всем техническим нормам режима ЭЭС;

– позволяет определять оптимальные регулируемые параметры системы (коэффициенты трансформации) для любой топологии и при различных параметрах системы, заданных оператором.

1. Евдокимов А.Г. Минимизация функций. Харьков. 1985. 2. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М. 1981. 3. Идельчик В.И., Новиков А.С., Паламарчук С.И. //Влияние погрешностей информации на расчеты оптимальных режимов// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 2. С. 22-30.

УДК 681.5.015

П. Шулик

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

© *Шулик П., 2002*

Пропонується ефективний алгоритм оцінювання параметрів елементів насосних станцій систем водопостачання і водовідведення. Наведена математична модель насосної станції в режимі натурного експерименту. Сформульована задача оцінювання параметрів енергетичних характеристик насосних агрегатів, гідравлічних опорів затворів та коефіцієнтів ефективності ділянок трубопроводу. Розглянуто приклад розв'язання цієї задачі на реальних даних.

The effective parameter estimation algorithm of pump stations members of water-supply and drainage systems is offered. The mathematical model of a pump station in a condition of a natural experiment is presented. The formulation of parameter estimation problem of performances of motor pumps, hydraulic resistances of shutters and effectiveness ratio of leases of the pipe line is given. The example of a solution of this problem on actual dates is reviewed.