

ПЛАЩАНСКИЙ Л.А. (НИТУ «МИСиС»)

ХОЛМОГОРОВ М.М. (НИТУ «МИСиС»)

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Крупные потребители электрической энергии – горные предприятия – наряду с активной мощностью потребляют реактивную мощность, создавая сетевые перетоки. Вопросы компенсации реактивной мощности и рациональное размещение компенсирующих устройств приобретают весьма актуальное значение в свете энергосберегающей политики. Особенно важна компенсация при оптимизации режимов напряжения и электропотребления в целях снижения активных потерь и повышения качества электроэнергии. Эффективным мероприятием по снижению потерь в электрических сетях является установка в них устройств компенсации реактивной мощности (КРМ). При анализе методов расчета оптимальной мощности и определении местоположения компенсирующих устройств учитывалась специфика горных предприятий, а именно необходимость разделения электрических сетей на подземные и поверхностные. Сформулирована целевая функция на основе годовых приведенных затрат и выявлена система ограничений, при которых рассматривается целевая функция. Анализ целевой функции показал, что она сепарабельна и задача может быть решена методами дискретного программирования.

Ключевые слова: горные предприятия, реактивная мощность, компенсация, целевая функция, ограничения, функция затрат, минимизация, дискретное программирование, эквивалентная характеристика.

Горные предприятия, в особенности горно-обогатительные комбинаты, характеризуются большой установленной мощностью потребителей, сложной и разветвленной структурой электрических сетей, характерным режимом работы, а также некоторыми специфическими особенностями взаимодействия с энергосистемами. В связи с этим вопросы КРМ и определение рационального местоположения компенсирующих устройств для таких предприятий приобретает весьма актуальное значение в свете энергосберегающей политики. Особенно важна компенсация при оптимизации режимов напряжения и электропотребления в целях снижения активных потерь и повышения качества электроэнергии. Эффективным мероприятием по снижению потерь в электрических сетях является установка в них устройств КРМ [1]. При переходе на энергосберегающий путь развития и с учетом роста цен на электроэнергию данная проблема приобретает еще большую актуальность.

Анализ существующих методов расчета оптимальной мощности и определение местоположения компенсирующих устройств показали, что наиболее приемлемым для горных предприятий является метод дискретного программирования (ДП) решения задачи

оптимальной компенсации реактивной нагрузки (КРН), позволяющий построить модель КРН с учетом специфики электрических сетей горных предприятий (разделение на подземные и поверхностные сети), а также получить простые и эффективные алгоритмы решения задачи [2, 4].

Номинальную мощность компенсирующих устройств Q_{ki} (для сетей напряжением до и выше 1 кВ) и реактивную мощность, генерируемую синхронными электродвигателями (СД), можно определить целевой функцией на основе минимума приведенных затрат:

$$Z = \sum_{k=1}^N Z_{ki} Q_{ki} + Z_3 \quad (1)$$

где $Z_{ki} Q_{ki}$ – капитальные затраты, связанные с установкой конденсаторной установки (КУ) мощностью Q_{ki} ; N – количество компенсирующих устройств (СД и КУ); Z_3 – функция затрат на компенсацию реактивной мощности.

Функцию затрат Z_3 удобно представить в виде

$$Z_3 = c_0 \Delta P_M = \frac{c_0}{U^2} \|\bar{Q} - \bar{Q}_k\| R \|\bar{Q} - \bar{Q}_k\|$$

где c_0 – удельная стоимость потерь мощности и энергии, приведенная к стоимости потерь



активной мощности; ΔP_M – потери активной мощности; U – напряжение сети; \bar{Q} – вектор расчетных максимальных реактивных нагрузок узлов сети; \bar{Q}_k – вектор мощностей компенсирующих устройств; R – матрица узловых активных сопротивлений сети напряжением 6–10 кВ относительно главной понизительной подстанции (ГПП).

Целевая функция (1) рассматривается при ограничениях:

$$\sum_1^N Q_{ki} = Q_k, \quad Q_{k\min i} \leq Q_{ki} \leq Q_{k\max i} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$Q_{ki} \in Q_{kn} \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

Функцию затрат на компенсирующие устройства $Z_{ki} Q_{ki}$ целесообразно, в силу специфики подземных и поверхностных сетей, представить отдельно для сетей напряжением до и выше 1 кВ:

• i -й нагрузочный узел напряжением до 1 кВ:

$$Z_{ki} Q_{ki} = e [Z_{\text{НКБ}} Q_{ki} + Z_{\text{ТПи}} Q_{ki}] + c_0 \rho_n Q_{ki}$$

• i -й нагрузочный узел напряжением 6–10 кВ:

$$Z_{ki} Q_{ki} = e Z_{\text{ВКБ}} Q_{ki} + c_0 \rho_v Q_{ki},$$

где e – ежегодные отчисления от капитальных затрат, включая нормативный коэффициент; $Z_{\text{НКБ}} Q_{ki}$ – затраты на низковольтные батареи; $Z_{\text{ТПи}} Q_{ki}$ – снижение затрат на i -ю трансформаторную подстанцию (ТП) при установке КУ напряжением до 1 кВ мощностью Q_{ki} ; $Z_{\text{ВКБ}} Q_{ki}$ – затраты на высоковольтные батареи; ρ_n, ρ_v – удельные потери активной мощности в КУ напряжением до и выше 1 кВ.

Стоимость КУ напряжением до и выше 1 кВ определяется выражением:

$$Z_{\text{КБi}} Q_{ki} = A_i K'_{0i} + \sum_{j=1}^{A_i} B_{ij} K_{0i} + k_{\text{уди}} Q_{ki},$$

где $Z_{\text{КБi}}$ – затраты на конденсаторную батарею; A_i, B_{ij} – число секций ТП и число КУ в секции; K'_{0i}, K_{0i} – стоимость коммутирующего и регулирующего оборудования соответственно для одной

секции и одной КУ; $k_{\text{уди}}$ – удельная стоимость КУ.

Для горных предприятий характерно питание технологических участков по одно- и двухтрансформаторной схеме в зависимости от категории надежности электропотребителей. Поэтому при установке КУ на стороне низшего напряжения распределительных трансформаторов возможно снижение мощности ТП (но не их количества) на ступень стандартных мощностей. Тогда

$$Z_{\text{ТПi}} Q_{ki} = \begin{cases} Z_{\text{ТП}} S'_{\text{НОМi}} - Z_{\text{ТП}} S_{\text{НОМi}}, & \text{при } Q_{kmi} \leq Q_{ki} \\ 0 & \text{при } Q_{ki} < Q_{kmi} \end{cases}$$

где $S'_{\text{НОМi}}$ – номинальная мощность ТП $S_{\text{НОМi}}$ на ступень ниже установленной мощности i -й ТП $S_{\text{НОМi}}$; $Z_{\text{ТП}} S_{\text{НОМi}}, Z_{\text{ТП}} S'_{\text{НОМi}}$ – стоимость ТП соответственно мощностью $S_{\text{НОМi}}$ и $S'_{\text{НОМi}}$.

Максимальную и минимальную мощности КУ, в пределах которых возможно снижение установленной мощности ТП, можно определить по формулам:

$$Q_{k\min i} = Q_i - \sqrt{S'_{\text{НОМi}}{}^2 - P_i^2};$$

$$Q_{k\max i} = Q_i + \sqrt{S'_{\text{НОМi}}{}^2 - P_i^2}.$$

Функция затрат $Z_{ki} Q_{ki}$ для группы однотипных СД определяется выражением

$$Z_{ki} Q_{ki} = e K_p m + \left[\frac{D_{1i}}{Q_{\text{НОМi}}} Q_{ki} + \frac{D_{2i}}{m Q_{\text{НОМi}}^2} Q_{ki}^2 \right] c_0,$$

где K_p – стоимость регулятора возбуждения СД; $m = N - n$ – количество СД в группе; D_{1i}, D_{2i} – постоянные величины, определяемые номинальными параметрами двигателя [3].

Потери активной мощности можно представить в виде

$$\Delta P_M = \Delta P_0 + \sum_1^{N-1} a_i Q_{ki}^2 + b_i Q_{ki} + \frac{2}{U^2} \sum_{i=1}^{N-1} Q_{ki} \sum_{j=i+1}^N a_{kj} b_{ij}, \quad (2)$$

где $\Delta P_0 = \frac{1}{U^2} \bar{Q} R Q$; a_i и b_i – коэффициенты, связанные с установкой и монтажом КУ:



$$a_i = \frac{1}{U^2} R_i; \quad b_i = -\frac{2}{U^2} \bar{Q} R_i \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, N;$$

$$\sum_1^N R_i = \begin{pmatrix} R_{1i} \\ R_{2i} \\ \vdots \\ R_{Ni} \end{pmatrix} - i\text{-й столбец матрицы } N.$$

Если i -ю квадратичную функцию, стоящую в скобках, отнести к затратам на КУ в i -м нагрузочном узле $Z_{ki} Q_{ki}$, то функцию затрат Z можно представить выражением

$$Z = c_0 \Delta P_0 + \sum_{i=1}^N Z_i Q_{ki} + \frac{2c_0}{U^2} \sum_{i=1}^{N-1} Q_{ki} \sum_{j=i+1}^N Q_{kj} R_{ij}, \quad (3)$$

где $Z_i Q_{ki} = Z_{ki} Q_{ki} + c_0 a_i Q_{ki}^2 + c_0 b_i Q_{ki}$ – функция затрат i -го нагрузочного узла или затраты, связанные с размещением в i -м узле КУ мощностью Q_{ki} .

Анализ целевой функции (2) показывает, что при $R_{ij} = 0$ для всех $i = 1, 2, \dots, N-1$ и $j = i+1, i+2, \dots, N$ она сепарабельна (separability of funkcion), т.е.

$$Z = c_0 \Delta P_0 + \sum_{i=1}^N Z_i Q_{ki} \quad \text{при } \sum_{i=1}^N Q_{ki} = Q_k, \quad (4)$$

и задачу без затруднений можно решить методами дискретного программирования (ДП) [5, 6].

Однако условию $R_{ij} = 0$ удовлетворяют только радиальные сети, что ограничивает возможность применения алгоритмов ДП для произвольной разомкнутой сети в его классической постановке.

Несепарабельность целевой функции КРН преодолевается путем многократного уточнения режима электропотребления в сети в ходе расчета и определения дополнительных потерь мощности на общих ветвях схемы от двух переменных нагрузок. Вместе с тем многократного уточнения режимов можно избежать, приведя целевую функцию (4) к детерминированному виду.

Принимая нумерацию узлов упорядоченной с конца магистрали и учитывая свойства матрицы узловых сопротивлений, получаем последнее слагаемое целевой функции (3) в виде

$$\frac{2c_0}{U^2} \sum_{i=1}^{N-1} Q_{ki} \sum_{j=i+1}^N Q_{kj} R_{ij} = \frac{2c_0}{U^2} \left[Q_{k1} Q_{k2} R_2 + Q_{k1} + Q_{k2} Q_{k3} R_3 + \dots \right] \quad (8)$$

$$\text{где } R_2 = R_{12}, \quad R_3 = R_{13} = R_{23}, \quad \dots, \\ R_N = R_{1N} = R_{2N} = \dots = R_{N-1,N}.$$

Обозначим суммарную мощность КУ, расположенных в i -м нагрузочном узле через

$$Q_k^i = \sum_{j=1}^i Q_{kj}$$

выражение (3) примет вид

$$Z = \sum_{i=1}^N \left[Z_i Q_{k1} + \frac{2c_0 R_i}{U^2} Q_k^{i-1} Q_{ki} \right]. \quad (5)$$

Для удобства вычислительной процедуры выражение (5) с учетом, что $Q_{ki} = Q_k^i - Q_k^{i-1}$, удобнее представить в виде

$$Z = \sum_{i=1}^N \left[Z_i Q_k^i - Q_k^{i-1} + \frac{2c_0 R_i}{U^2} Q_k^{i-1} Q_k^i - Q_k^{i-1} \right],$$

при ограничениях:

$$Q_k^0 = 0, \quad Q_k^N = Q_k, \\ Q_{k \min}^{i-1} \leq Q_k^{i-1} \leq Q_{k \max}^{i-1}, \\ Q_{k \min}^i \leq Q_k^i \leq Q_{k \max}^i.$$

Вычислительная процедура сводится к отысканию абсолютного минимума Z^* по переменным Q_k^i, Q_k^j при фиксированных значениях других переменных множества $Q_k = Q_k^i, Q_k^j$, от которых зависит функция Z .

Выбрав значение Q_k^{N-1} суммарной мощностью $N-1$ КУ и зафиксировав его, минимизируют по всем остальным переменным Q_k^1, Q_k^2, Q_k^{N-2} .

После выполнения всех вычислительных процедур минимум функции может быть представлен в виде

$$Z^* = \min \left\{ Z_N Q_k^N - Q_k^{N-1} + \frac{2c_0}{U^2} R_N Q_k^{N-1} Q_k^N - Q_k^{N-1} + \dots + Z_{N-1}^{\ominus} Q_k^{N-1} \right\},$$

где Q_k^{N-1} может принимать дискретные значения от $Q_{k \min}^{N-1}$ до $Q_{k \max}^{N-1}$, а

$$Z_{N-1}^{\ominus} Q_k^{N-1} = \sum_{i=1}^{N-1} \left[Z_i Q_k^i - Q_k^{i-1} + \frac{2c_0}{U^2} R_i Q_k^{i-1} Q_k^i - Q_k^{i-1} \right]$$



Эквивалентной данная функция может быть определена в зависимости от Q_k^{\ominus} :

$$Z_{N-1}^{\ominus} Q_k^{\ominus} = \min \left\{ Z_{N-1} Q_k^{\ominus} - Q_k^{N-2} + \frac{2c_0}{U^2} R_{N-1} Q_k^{N-2} Q_k^{\ominus} - Q_k^{N-2} + \sum_{i=1}^{N-2} \left[Z_i Q_k^i - Q_k^{i-1} + \frac{2c_0}{U^2} R_i Q_k^{i-1} Q_k^i - Q_k^{i-1} \right] \right\}$$

Аналогичным образом получают функцию $Z_{N-2}^{\ominus} Q_k^{N-2}$ и т.д. Этот процесс продолжается до тех пор, пока на последнем шаге не приходят к выражению

$$Z_1^{\ominus} Q_k^{\ominus} = Z_1 Q_k^1,$$

где $Q_{k \min}^1 \leq Q_k^{\ominus} = Q_k^1 \leq Q_{k \max}^1$; $Z_1 Q_k^1$ – функция затрат 1-го нагрузочного узла.

Минимизация выполняется для каждого фиксированного значения Q_k^{\ominus} из интервала $[Q_{k \min}^i; Q_{k \max}^i]$ перебором значений мощностей Q_k^{i-1} , для которых выполняется условие $Q_{k \min}^{i-1} \leq Q_k^{i-1} \leq Q_{k \max}^{i-1}$. Переменные Q_k^{i-1} принимают дискретные значения с наперед заданным шагом квантования h .

Эквивалентная характеристика затрат $Z_i^{\ominus} Q_k^{\ominus}$ определяет минимум затрат в магистральной электрической сети при оптимальном размещении источников реактивной мощности в i -х нагрузочных узлах суммарной мощностью Q_k^{\ominus} .

Процесс построения эквивалентной характеристики $Z_i^{\ominus} Q_k^{\ominus}$ означает замену i -х нагрузочных узлов с источником реактивной мощности (ИРМ) в каждом мощностью Q_k^{i-1} эквивалентным нагрузочным узлом с ИРМ

мощностью $Q_k^{\ominus} = Q_k^i = \sum_{j=1}^i Q_{kj}$, функция затрат которого определяется эквивалентной характеристикой $Z_i^{\ominus} Q_k^{\ominus}$.

Расчет проводится от конца магистрали ($i=1, 2, 3, \dots, N$) и продолжается до тех пор, пока все нагрузочные узлы магистральной линии не эквивалентируются в один нагрузочный узел и не будет определен оптимум затрат $Z_N^{\ominus} Q_k^{\ominus} = Z^*$.

Вывод. Предложен подход к определению рационального местоположения компенсирующих устройств в распределительных сетях горных предприятий методом дискретного программирования. Этот метод позволяет найти оптимальный вариант решения задачи при наложении на целевую функцию определенных ограничений и правил.

Библиографический список

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. Кротов В.Ф. Основы теории оптимального управления. – М.: Высш. шк., 1990. – 432 с.
3. Плащанский Л.А. Основы электроснабжения горных предприятий. Учебник для высших учебных заведений. – М.: Изд-во МГГУ, 2006. – 499 с.
4. Kirchmayer L.K. Economie Operation of Power Systems. Jon Welley a Suns, 1958.
5. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 1986. – 318 с.
6. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы/перевод с французского /. – М.: Наука, 1990. – 488 с.



“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2016, № 1, pp. 20–23	
Title:	Reactive power compensation in distribution networks of mining enterprises
Author 1	Name&Surname: Plashchanskiy L.A. Company: NUST «MISiS» Work Position: Professor Contacts: pla3768@yandex.ru
Author 2	Name&Surname: Kholmogorov M.M. Company: NUST «MISiS» Work Position: engineer
Abstract:	Large electricity consumers – mining companies – along with active power consumed reactive power, creating network flows. The issues of compensation of reactive power and rational placing of the compensating devices are becoming highly relevant in the light of energy saving policies. Compensation is particularly important when optimization of voltage and power consumption in order to reduce active losses and improve power quality. Effective action for reduction of losses in electric networks is installation of devices of reactive power compensation (RPC). In the analysis of methods of calculation of optimal power compensating devices, and location were taken into account the specificity of mining enterprises, namely the separation of electrical networks underground and surface. The objective function formulated on the basis of annual reduced costs and identified system limitation, when considered in the objective function. The analysis of the objective function showed that it separately and the problem can be solved by methods of discrete programming.
Keywords:	mining enterprise, reactive power compensation, objective function, constraints, cost function, minimization, discrete programming equivalent feature.
References:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Zhelezko Ju.S. Vybór meroprijatij po snizheniju poter' jelektrojenergii v jelektricheskikh setjah: Rukovodstvo dlja prakticheskikh raschetov [<i>Selection of measures to reduce energy losses in electric networks</i>]: Guide for practical calculations – M. Jenergoatomizdat, 1989. 176 p. 2. Krotov V.F. Osnovy teorii optimal'nogo upravlenija. [<i>Fundamentals of Optimal Control Theory</i>] – M.: Vyssh. shk., 1990. 432 p. 3. Plashchanskiy L.A. Osnovy jelektrosnabzhenija gornyh predpriyatij. [<i>Fundamentals of electricity mining enterprises.</i>] Textbook for higher educational institutions – M.: MGGU Publishing House, 2006. – 499 p. 4. Kirchmayer L.K. Economie Operation of Power Systems. Jon Welley a Suns, 1958. 5. Akulich I.L. Matematicheskoe programmirovanie v primerah i zadachah. [<i>Mathematical programming examples and problems</i>] Tutorial. – M.: Vyssh. shk., 1986 – 488 p. 6. Minu M. Matematicheskoe programmirovanie. Teorija i algoritmy [<i>Mathematical programming. Theory and Algorithms</i>] – M.: Nauka, 1990. – 488 p.

