

## ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В.И. Пантелеев, С.М. Зильберман, Г.А. Пилюгин, Е.Ю. Сизганова, М.М.Машуков  
Сибирский Федеральный университет, 79, Свободный пр., Красноярск, 660041, Россия

**Резюме. Цель.** В данной работе рассмотрена задача оптимизации распределения генерируемых реактивных мощностей синхронными двигателями в целях снижения потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения промышленного предприятия.

**Методы.** Задача оптимального распределения генерируемых реактивных мощностей синхронными двигателями в системах электроснабжения относится к классу нелинейного математического программирования и может быть решена методом неопределённых множителей Лагранжа. Метод Лагранжа позволяет свести задачу условной оптимизации (поиск относительного экстремума целевой функции при наличии некоторых ограничений) к более простой задаче безусловной оптимизации (поиск абсолютного экстремума).

**Результаты.** Получена полная математическая модель оптимизационной задачи рационального распределения генерируемой реактивной мощности синхронными двигателями с целью снижения потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения промышленного предприятия.

**Выводы.** Полученная математическая модель позволяет производить учет ряда ограничений, связанных как с режимом работы отдельных элементов системы электроснабжения, так и всей системы в целом.

*Ключевые слова:* синхронный двигатель, математическая модель, реактивная мощность, элементы системы электроснабжения, ограничения, энергосбережение, критерий оптимизации, целевая функция, коэффициент мощности, напряжение.

На сегодняшний день, энергосбережение и повышение энергетической эффективности электроэнергетических систем, в том числе систем электроснабжения промышленных предприятий, являются глобальными технико-экономическими задачами. В соответствии с распоряжением правительства РФ №1715-р от 13.11.2009 г., одно из приоритетных направлений в реализации мероприятий, предусмотренных «Энергетической стратегией России на период до 2030 г.»— это «повышение энергетической и экономической эффективности российской экономики и энергетики, в том числе за счёт структурных изменений и активизации технологического энергосбережения».

Компенсация реактивной мощности представляет собой один из возможных методов энергосбережения, результатом реализации которого является снижение потерь активной мощности в электрической сети, повышение пропускной способности её элементов, а также улучшение качества напряжения в узлах электрической сети. Компенсация может быть осуществлена с помощью различных устройств. В их число входят: батареи статических конденсаторов, синхронные компенсаторы, установки продольной ёмкостной компенсации, шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы и т. д. Наиболее широкое применение в промышленности находят синхронные двигатели, которые обладают возможностью генерировать реактивную мощность в узлах потребления электрической энергии. Синхронные двигатели используются в качестве привода для молотковых дробилок и шаровых мельниц горнорудных предприятий, магистральных насосов нефтеперекачивающих станций, непрерывных прокатных станов в металлургии и т. д. [1, 8].

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что задача оптимального распределения генерируемых реактивных мощностей синхронными двигателями в системах электроснабжения является значимой и актуальной. Такая задача относится к классу нелинейного математического программирования и может быть решена методом неопределённых множителей Лагранжа [2, 9].

Метод Лагранжа позволяет свести задачу условной оптимизации (поиск относительного экстремума целевой функции при наличии некоторых ограничений) к более простой задаче безусловной оптимизации (поиск абсолютного экстремума) [2]. Кроме того, анализ показывает [3], что по сравнению с градиентными методами нелинейной оптимизации, метод неопределённых множителей Лагранжа в наибольшей степени отвечает требованиям точности, полноты и удобства реализации для решения поставленной задачи.

Рассмотрим в общем виде систему электроснабжения промышленного предприятия, включающую в себя следующие элементы: силовой трансформатор ( $T$ ) главной понизительной подстанции (ГПП), кабельные линии электропередачи ( $W$ ), синхронные двигатели ( $MS$ ) и обобщённую нагрузку ( $N$ ), представленную на рисунке 1.

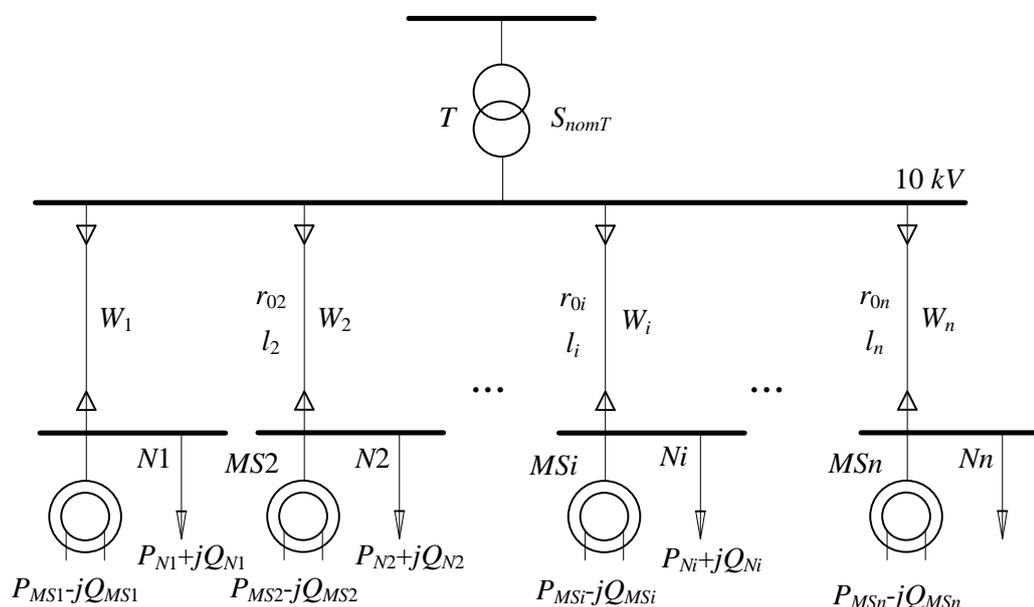


Рисунок 1 – Распределительная сеть промышленного предприятия

За критерий оптимизации, характеризующий эффективность передачи и потребления электроэнергии в рассматриваемой промышленной электрической сети, примем минимум суммарных потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения, кВт:

$$\Delta P \rightarrow \min \quad (1)$$

Сформулируем оптимизационную модель системы электроснабжения, исходя из целевой функции суммарных потерь активной мощности с учетом ограничений, обусловленных некоторыми технологическими условиями функционирования распределительной сети предприятия:

$$\Delta P = \Delta P_T^{\text{ГПП}} + \Delta P_W + \Delta P_{MS}^{\text{об.ст}} + \Delta P_{MS}^{\text{врм}}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_T^{\text{ГПП}} = \Delta P_{\text{xx}} + \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{номТ}}^2} \cdot (\sum_{i=1}^n (P_{Ni} + P_{MSi})^2 + \sum_{i=1}^n (Q_{Ni} - Q_{MSi})^2)$  – потери активной мощности в силовом трансформаторе ГПП, кВт[4];

здесь  $\Delta P_{\text{xx}}$  – потери холостого хода силового трансформатора, кВт;  $\Delta P_{\text{кз}}$  – потери короткого замыкания силового трансформатора, кВт;  $P_{Ni}$  и  $Q_{Ni}$  – активная и реактивная мощности обобщённой нагрузки, кВт и квар соответственно;  $P_{MSi}$  и  $Q_{MSi}$  – потребляемая активная и генерируемая реактивная мощности синхронного двигателя, кВт и квар соответственно;  $S_{\text{номТ}}$  – номинальная полная мощность силового трансформатора, кВ·А.

$\Delta P_W = \frac{1}{U_{\text{ном}}^2} \cdot \sum_{i=1}^n ((P_{Ni} + P_{MSi})^2 + (Q_{Ni} - Q_{MSi})^2) \cdot r_{0i} \cdot l_i$  – потери в кабельной линии электропередачи, кВт [4];

здесь  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение распределительной сети промышленного предприятия, кВ;  $r_{0i}$  – погонное активное сопротивление кабельной линии, Ом/км;  $l_i$  – длина кабельной линии, км.

$\Delta P_{MS}^{\text{обм.ст}} = 3 \cdot \sum_{i=1}^n r_{\phi i} \cdot I_{\phi i}^2 = \frac{1}{3 \cdot U_{\phi}^2} \cdot \sum_{i=1}^n r_{\phi i} \cdot (P_{MSi}^2 + Q_{MSi}^2)$  – потери в обмотке статора синхронного двигателя, кВт [5];

здесь  $r_{\phi i}$  – сопротивление фазы обмотки статора синхронного двигателя, Ом;  $I_{\phi i}$  и  $U_{\phi}$  – фазный ток и напряжение обмотки статора синхронного двигателя, А и кВ соответственно.

$\Delta P_{MS}^{\text{врм}} = \sum_{i=1}^n \frac{D_{1i} \cdot Q_{MSi}}{Q_{MSnomi}} + \sum_{i=1}^n \frac{D_{2i} \cdot Q_{MSi}^2}{Q_{MSnomi}^2}$  – потери в синхронном двигателе, обусловленные выработкой реактивной мощности, кВт [6].

здесь  $Q_{MSnomi}$  – номинальная реактивная мощность синхронного двигателя, квар;  $D_{1i}$  и  $D_{2i}$  – расчётные величины, зависящие от параметров конкретного двигателя, кВт.

Поскольку компенсация реактивной мощности никак не влияет на перетоки активной мощности, исключим соответствующие составляющие при формировании выражения для целевой функции. Кроме того, исключим из расчёта условно-постоянные потери холостого хода силового трансформатора ГПП  $\Delta P_{\text{xx}}$ . Таким образом, целевая функция суммарных потерь активной мощности, кВт:

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{номТ}}^2} \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{Ni} - Q_{MSi})^2 + \frac{1}{U_{\text{ном}}^2} \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{Ni} - Q_{MSi})^2 \cdot r_{0i} \cdot l_i + \frac{1}{3 \cdot U_{\phi}^2} \cdot \sum_{i=1}^n r_{\phi i} \cdot Q_{MSi}^2 + \sum_{i=1}^n \frac{D_{1i} \cdot Q_{MSi}}{Q_{MSnomi}} + \sum_{i=1}^n \frac{D_{2i} \cdot Q_{MSi}^2}{Q_{MSnomi}^2} \rightarrow \min \quad (3)$$

Для полноты оптимизационной модели, к целевой функции вводим ряд ограничений:

1. По значению коэффициента мощности для электроприёмников, присоединённых к распределительной сети промышленного предприятия;

$$\sum_{i=1}^n (Q_{Ni} - Q_{MSi}) = \tan \varphi_n \cdot \sum_{i=1}^n (P_{Ni} + P_{MSi}), \quad (4)$$

где  $\tan \varphi_n$  – коэффициент мощности.

2. По величине реактивной мощности, генерируемой синхронным двигателем в конкретном узле системы электроснабжения;

$$Q_{MSi}^{\min} \leq Q_{MSi} \leq Q_{MSi}^{\max}, \quad (5)$$

где  $Q_{MSi}^{\min}$  и  $Q_{MSi}^{\max}$  – нижний и верхний пределы выработки реактивной мощности двигателем соответственно, квар.

3. По напряжениям в узлах системы электроснабжения, определяется согласно межгосударственному стандарту [7].

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \quad (5)$$

где  $U_i^{\min}$  и  $U_i^{\max}$  – нижний и верхний пределы величины напряжения в  $i$ -ом узле, кВ.

Таким образом, получена полная математическая модель оптимизационной задачи рационального распределения генерируемой реактивной мощности синхронными двигателями с целью снижения потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения промышленного предприятия.

Полученная математическая модель позволяет производить учет ряда ограничений, связанных как с режимом работы отдельных элементов системы электроснабжения, так и всей системы в целом.

#### Список литературы:

- 1 Ефимовский А. В. Целесообразность использования синхронного двигателя в качестве компенсатора реактивной мощности / А. В. Ефимовский, Ю. В. Владимиров // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Энергетика: надежность и энергоэффективность. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. – № 45. – С. 88-94.
- 2 Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики: уч. пособие / В.Н. Костин– СПб.: СЗТУ, 2003.–120 с.
- 3 Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
- 4 Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др.– М: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
- 5 Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. заведений. -3-е изд., перераб. - Л.: Энергия, 1978. – 832 с., ил.
- 6 Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2-х т. Т.1. Электрооборудование. Под общ. ред. А.А. Фёдорова. М., Энергоиздат, 568 с., 1986 г.
- 7 ГОСТ 32144-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.– 16 с.
- 8 Веселов А.Е. Техничко-экономическая оценка эффективности привлечения синхронных электродвигателей предприятий к генерации реактивной мощности / Веселов А.Е., Карпов А.С., Ярошевич В.В. // Вестник МГТУ, том 12, №1, 2009 г. С.83-88.
- 9 Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы двигателей переменного тока в системах частотного управления : учеб. пособие / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер ; под общ. ред. Р.Т. Шрейнера.— Екатеринбург : УрФУ, 2017. — 256 с