

УДК 621.316

ЗАВИСИМОСТЬ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Дабаров В.В., к.т.н., доцент кафедры общей электротехники
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва
г. Кемерово

В любой системе электроснабжения (СЭС) имеют место потери электроэнергии, одной из задач компенсации реактивной мощности (КРМ) является снижение потерь, вызванных наличием индуктивной нагрузки. В настоящем исследовании была предпринята попытка определить аналитическую зависимость между параметрами устройств КРМ (мощность или ёмкость) и величиной потерь в СЭС. Для этой цели использовалась математическая модель СЭС с электродвигательной нагрузкой, представленная в [1], и основанное на ней программное средство [2]. Учитывая сложность процессов, протекающих в СЭС и во всех её элементах отдельно взятых, которые описаны системой дифференциальных уравнений, можно прийти к выводу, что аналитическую зависимость получить невозможно. Особенно к этому выводу подталкивает наличие переходных процессов и произвольной механической нагрузки электродвигателей (возможно, переменной), входящих в состав СЭС.

Потери в сети могут быть определены с помощью выражения:

$$\Delta P = \frac{1}{T} \sum_{j=0}^m \left(\int_0^T i_j^2 (t) R_j dt \right), \quad (1)$$

где ΔP – средняя величина потерь мощности за время T , m – количество кабельных участков распределительной сети, i_j – ток в j -ом участке, R_j – активное сопротивления j -го кабеля.

Рассмотрим простейший пример СЭС, состоящей из трансформатора, кабеля, двигателя и одного устройства компенсации, схема которой представлена на рис. 1. В данной СЭС содержится кабель АПвВГ 4х70 длиной 500 м, двигатель ДКВ45 с переменной нагрузкой, изменение от времени которой описывается выражением $M(t) = 150 + 100\sin(5\omega t) + 50\sin(10\omega t + \pi/6)$ н·м. Зависимость величины потерь электроэнергии от ёмкости устройства КРМ показана на графике (рис. 2). Рассматривался запуск и установившийся режим, общее время моделирования составило 4 секунды.

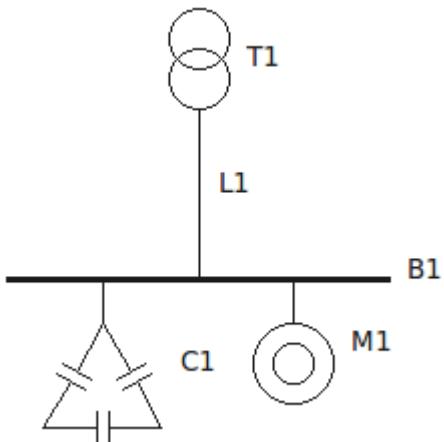


Рис. 2. Простейший пример
СЭС

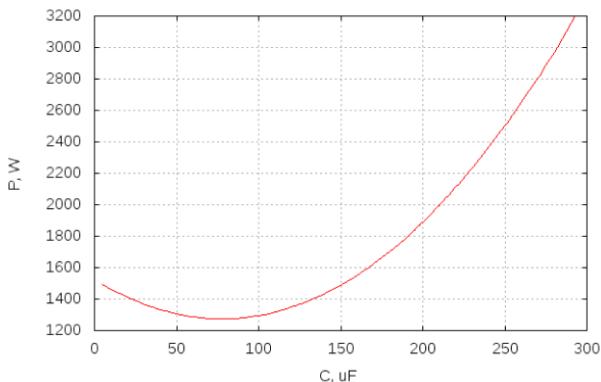


Рис. 1. Зависимость потерь мощности
от ёмкости

На рис. 3 представлена СЭС, содержащая 2 устройства компенсации и 4 электродвигателя. Мощности и режимы работы электродвигателей выбраны случайным образом с целью показать применимость рассматриваемого подхода для произвольной СЭС. На рисунке 4а представлена зависимость величины потерь в кабельной сети от ёмкости устройств КРМ. На рисунке 4б показана зависимость для той же схемы, но с устройством компенсации, установленном на шине В2. Во всех рассматриваемых схемах менялись только параметры устройств компенсации, все остальные параметры, в том числе изменяющиеся с течением времени, а также моменты коммутации выключателей и пускателей, оставались одинаковыми во всех экспериментах.

Также были неизменны начальные условия моделирования.

Можно заметить, что любая из представленных зависимостей имеет один глобальный минимум. Таким образом, имеется возможность использовать алгоритмы оптимизации, в основе которых лежит определение локального минимума, например, градиентные методы. Визуально зависимости выглядят, как квадратичные, отталкиваясь от этого, произведём аппроксимацию зависимостей, полученных в результате численных экспериментов, с помощью квадратичной функции:

$$\Delta P = a_1 C_1^2 + b_1 C_1 + a_2 C_2^2 + b_2 C_2 + \dots + a_i C_i^2 + b_i C_i + \dots + a_n C_n^2 + b_n C_n + p_0, \quad (2)$$

где C_i – i -я ёмкость, ΔP – величина потерь, p_0 , a_i , b_i – неизвестные коэффициенты.

Для определения коэффициентов необходимо найти $2 \cdot N + 1$ точек, где N – количество ёмкостей, путём моделирования СЭС с различными параметрами устройств КРМ.

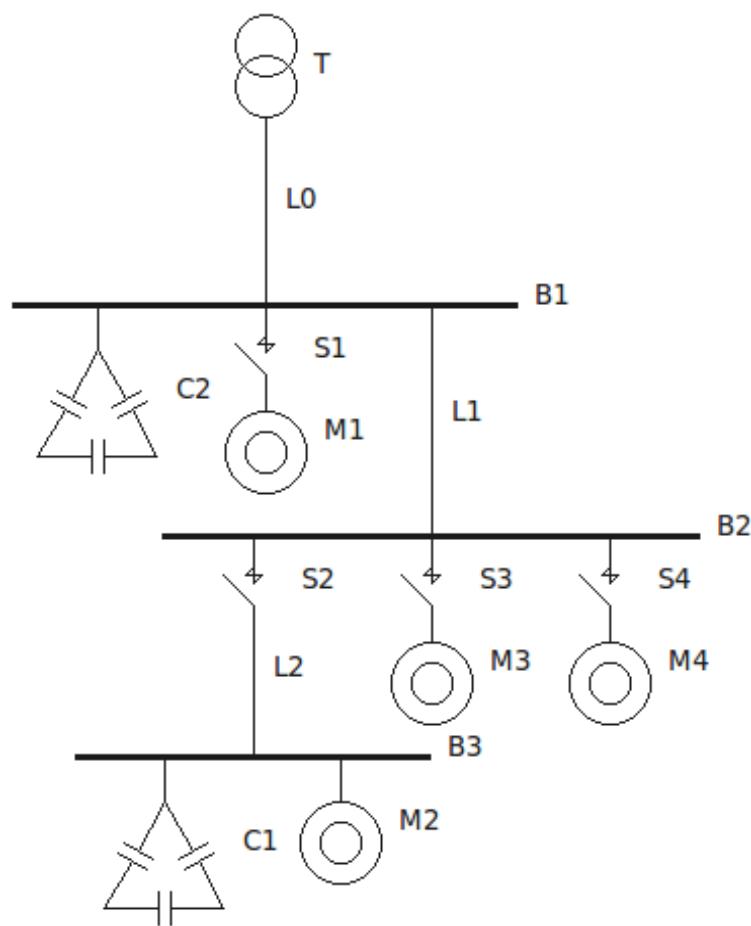


Рис. 3. Пример СЭС

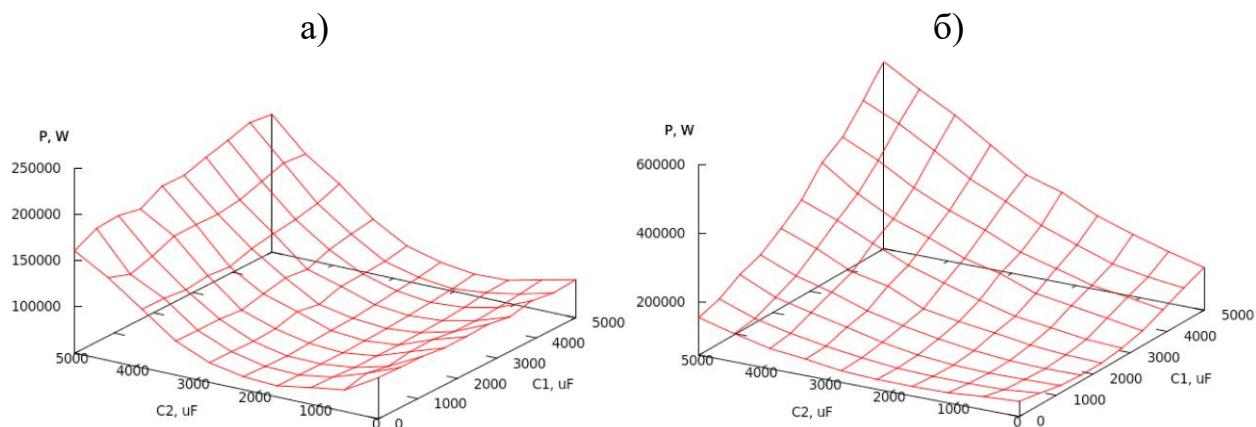


Рис. 4. Зависимость величины потерь мощности от значений ёмкостей устройств КРМ

Рассмотрим схему на рис. 1. Используя программное средство [2], нашли с точностью до 1 мкФ величину ёмкости устройства компенсации – 105 мкФ, которая соответствует минимальной величине потерь электроэнергии — 2000,63 Вт.

Запишем уравнение (2), при наличии одной ёмкости:

$$\Delta P = aC^2 + bC + p_0. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов произведём моделирование для трёх различных величин ёмкости устройства КРМ. Возьмём 3 точки из диапазона от 0 до 300 мкФ, например, 0, 150 и 300. После совместного решения полученной системы уравнений, зависимость потерь от ёмкости получилась следующая:

$$\Delta P = 0,041367C^2 - 8,56187C + 2440,41, \quad (4)$$

минимум находится в точке 103, значение функции составляет 1997,39, при этом потери, полученные путём численного эксперимента равны 2000,8. Среднеквадратичное отклонение 5,11 Вт или 0,0025 % от минимальной величины потерь. Максимальное отклонение составило 11,3 Вт или 0,005%.

Представленные вычисления были рассмотрены и с более сложными системами электроснабжения. Исходя из вышесказанного, можно прийти к выводу, что в рамках точности разработанной математической модели, зависимость величины потерь электроэнергии в СЭС с электродвигательной нагрузкой от величин ёмкостей устройств КРМ является квадратичной. Таким образом, для определения параметров устройств КРМ, соответствующих минимуму потерь электроэнергии, можно воспользоваться алгоритмом, описанным ниже.

Итак, первый шаг – это определение потерь для $2N+1$ вариантов КРМ, т.е. точек исходной зависимости, при помощи численного моделирования системы электроснабжения, содержащей N устройств КРМ.

Второй шаг – решение системы линейных уравнений вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1C_{11}^2 + b_1C_{11} + a_2C_{21}^2 + b_2C_{21} + \dots + a_iC_{i1}^2 + b_iC_{i1} + \dots + a_nC_{n1}^2 + b_nC_{n1} \\ a_1C_{12}^2 + b_1C_{12} + a_2C_{22}^2 + b_2C_{22} + \dots + a_iC_{i2}^2 + b_iC_{i2} + \dots + a_nC_{n2}^2 + b_nC_{n2} \\ \vdots \\ a_1C_{1j}^2 + b_1C_{1j} + a_2C_{2j}^2 + b_2C_{2j} + \dots + a_iC_{ij}^2 + b_iC_{ij} + \dots + a_nC_{nj}^2 + b_nC_{nj} \\ \vdots \\ a_1C_{1n}^2 + b_1C_{1n} + a_2C_{2n}^2 + b_2C_{2n} + \dots + a_iC_{in}^2 + b_iC_{in} + \dots + a_nC_{nn}^2 + b_nC_{nn} \end{array} \right. \quad (5)$$

здесь a_i, b_i, p_0 – коэффициенты, которые требуется определить, C_{ij} – значение j -й ёмкости в i -м варианте, P_j – величина потерь.

Третий шаг – составление аналитической зависимости (2) на основе коэффициентов, найденных на втором шаге из (5).

Четвёртый шаг — определение значений ёмкостей, соответствующих минимуму функции, полученной на третьем шаге.

Пятый шаг – если полученная точность недостаточна, можно уменьшить диапазон и перейти к первому шагу. Точность можно определить, уменьшив

диапазона и сравнив с предыдущим значением.

Список литературы:

1. Дабаров В. В. Математическая модель системы электроснабжения с электродвигательной нагрузкой и устройствами компенсации реактивной мощности // Вестник КузГТУ. 2011. № 3. С. 66–68.
2. Дабаров В. В. Система моделирования и оптимизации процесса компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения с электродвигательной нагрузкой. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012618437. 2012.