

УДК 620.9.004.183

## Алгоритм активного управления электропотреблением

**А.А. Живодеров**

*Политехнический факультет МГТУ, кафедра электрооборудования судов*

**Аннотация.** В работе описан энергосберегающий алгоритм регулирования электропотребления, который позволяет уменьшить потери в действующих сетях промышленных предприятий, и приведены возможные пути повышения коэффициента мощности в электроустановках.

**Abstract.** Some ways to increase efficiency of energy devices have been shown in this paper, and namely, energy saving algorithm of regulation energy consumption, which touches problems how to decrease losses in the real power networks performance of industrial enterprises.

### 1. Введение

Моделирование узлов нагрузки промышленных предприятий должно проводиться на базе использования статических характеристик по напряжению, так как они позволяют наиболее полно отобразить характер нагрузки и учесть отклонения напряжения на зажимах электроприемников.

### 2. Активное управление электропотреблением

Асинхронные электродвигатели (АД) и трансформаторы потребляют реактивную мощность из сети. Коэффициент мощности незагруженного электродвигателя и силового трансформатора при холостом ходе составляет величину порядка 0.1-0.2. Наиболее резкое снижение коэффициентов мощности трансформаторов наблюдается при снижении нагрузки более чем на 40 %. Низкие значения коэффициента мощности в электроустановках приводят к увеличению потерь электроэнергии на нагрев проводов электрических линий, а также обмоток статоров синхронных генераторов и трансформаторов.

Коэффициент мощности повышают естественным способом и искусственной компенсацией (*Лотоцкий, 1964*).

К естественным способам относят следующие:

1) Правильный выбор асинхронных электродвигателей в соответствии с их режимами, не допуская излишних запасов мощности. Загрузка их должна составлять 75-100 %.

2) Ограничение холостого хода асинхронных двигателей (АД) и сварочных трансформаторов. С этой целью предусматривают устройство для автоматического отключения АД и сварочных трансформаторов на период, когда не ведется сварка.

3) Переключение обмотки статора незагруженного АД с треугольника на звезду, если обмотки нормально соединены в треугольник и загрузка двигателя меньше 35 % его номинальной мощности.

4) Замена незагруженных трансформаторов трансформаторами меньшей мощности. Такая замена вполне целесообразна, когда нагрузка на трансформатор составляет меньше 30 % его номинальной мощности.

К искусственным способам улучшения коэффициента мощности относятся следующие:

1) Установка статических конденсаторов. Конденсаторы могут быть установлены у электродвигателей (индивидуальная компенсация), щитов и на подстанции (групповая компенсация).

2) Использование синхронных генераторов и синхронных двигателей в качестве компенсаторов. Для этих целей используют синхронные генераторы, работающие вхолостую с перевозбуждением, или синхронные двигатели, работающие с перевозбуждением и не несущие нагрузки или нагруженные не на полную мощность.

3) Синхронизация асинхронных двигателей. Для этой цели применяют АД с фазным ротором. Двигатель пускают в ход, как обычно, пусковым реостатом, а затем специальным переключателем включают постоянный ток в обмотку фазного ротора, при этом двигатель втягивается в синхронизм и работает как синхронный. Перевозбуждая его, добиваются улучшения коэффициента мощности сети. В качестве источника постоянного тока используют выпрямители или машинные возбудители. Синхронизацию АД экономично применять при их мощности 100 кВт и выше и при активной нагрузке не менее 50 % от номинальной мощности двигателя.

Зачастую эти мероприятия вообще не проводятся либо проводятся плохо, поэтому необходим удобный для потребителя алгоритм управления электропотреблением.

Напряжения, подводимые к электроприемникам (ЭП), оказывают влияние на потребляемую ими активную и реактивную мощности, а также на выходные технологические параметры, определяющие

производительность оборудования. Расчет электрических режимов распределительных сетей с учетом зависимостей мощностей различных ЭП от напряжения в точках их питания следует производить, как отмечается в технической литературе (Карпов, Солдаткина, 1970), на базе использования статических характеристик нагрузки (СХН). Согласно ГОСТ 21027-75 "Системы энергетические. Термины и определения", СХН называется зависимость активной или реактивной нагрузки от напряжения при постоянной частоте или от частоты при постоянном напряжении. Обычно применяемое задание нагрузки постоянной активной и реактивной мощностью является лишь одним из возможных вариантов. В зависимости от характера потребителя различают следующие способы учета зависимости нагрузки от напряжения:

1) Нагрузка задана постоянным активным и реактивным сопротивлением:  $R = const, X = const$ . В этом случае мощность является квадратичной функцией от напряжения, и эта зависимость имеет вид:

$$P(U) = \frac{U^2}{R}, \quad Q(U) = \frac{U^2}{X}.$$

2) Нагрузка задана постоянным током  $I = const$ , тогда мощность является линейной функцией от напряжения:

$$P(U) = UI', \quad Q(U) = UI'',$$

где  $P$  и  $Q$  – активная и реактивная мощности,  $I'$  и  $I''$  – активная и реактивная составляющая тока, соответственно.

3) Нагрузка задана постоянной мощностью  $P = const, Q = const$ , т.е. мощность не зависит от напряжения.

Все варианты задания нагрузки обобщены в виде СХН:

$$\begin{aligned} P_{ЭП}(U) &= P_{ЭП0} \left( a_0 + a_1 \frac{U}{U_0} + a_2 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 \right), \\ Q_{ЭП}(U) &= Q_{ЭП0} \left( b_0 + b_1 \frac{U}{U_0} + b_2 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где индекс 0 обозначает принадлежность к одному и тому же исходному режиму, для которого и определяются постоянные коэффициенты  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ , входящие в эту зависимость. В литературе можно найти значения этих коэффициентов для некоторых типов ЭП. В качестве исходного режима чаще всего принимается номинальный ( $U_0 = U_{ЭПном}, P_0 = P_{ЭПном}, Q_0 = Q_{ЭПном}$ ). Условие  $P = P_{ном}$  выполняется при  $a_0 + a_1 + a_2 = 1$  и  $b_0 + b_1 + b_2 = 1$ ; нагрузка, представленная в виде постоянных сопротивлений, реализуется при  $a_0 = 0, a_1 = 0, a_2 = 1$  и  $b_0 = 0, b_1 = 0, b_2 = 1$ ; в виде постоянного тока –  $a_0 = 0, a_1 = 1, a_2 = 0$  и  $b_0 = 0, b_1 = 1, b_2 = 0$ ; в виде постоянной мощности –  $a_0 = 1, a_1 = 0, a_2 = 0$  и  $b_0 = 1, b_1 = 0, b_2 = 0$ .

Выражение можно преобразовать, рассматривая не полное фактическое напряжение, а его отличие от исходного режима:  $\Delta U = U - U_0$ . ГОСТ 13109-87 допускает уровни напряжения на зажимах электроприемников общего назначения  $0.95U_{ном} < U < 1.05U_{ном}$ , поэтому удобнее использовать "спрямленные" линеаризованные зависимости, которые получаются при пренебрежении членами второго порядка  $(U/U_0)^2$  в виду их малости из выражения (1):

$$\begin{aligned} P_{ЭП}(U) &= P_{ЭП0} \cdot \left[ 1 + K_{PU} \frac{\Delta U}{U} \right] = P_{ЭП0} \cdot \left[ (1 - K_{PU}) + K_{PU} \cdot \frac{U}{U_0} \right], \\ Q_{ЭП}(U) &= Q_{ЭП0} \cdot \left[ 1 + K_{QU} \frac{\Delta U}{U} \right] = Q_{ЭП0} \cdot \left[ (1 - K_{QU}) + K_{QU} \cdot \frac{U}{U_0} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $K_{PU}$  и  $K_{QU}$  – регулирующие эффекты активной и реактивной мощности нагрузки по напряжению:

$$\begin{aligned} K_{PU} &= \frac{\frac{\delta P_{ЭП}}{\delta U}}{\frac{P_{ЭП0}}{U_0}} \cong \frac{(P_{ЭП} - P_{ЭП0})/P_{ЭП0}}{(U - U_0)/U_0}, \\ K_{QU} &= \frac{\frac{\delta Q_{ЭП}}{\delta U}}{\frac{Q_{ЭП0}}{U_0}} \cong \frac{(Q_{ЭП} - Q_{ЭП0})/Q_{ЭП0}}{(U - U_0)/U_0}. \end{aligned} \quad (3)$$

Регулирующие эффекты  $K_{PU}$ ,  $K_{QU}$  связаны с коэффициентами, входящими в выражение (1), следующими соотношениями:

$$K_{PU} = a_1 + 2a_2, \quad K_{QU} = b_1 + 2b_2. \quad (4)$$

При линеаризации зависимостей (1) полагаем:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1 - K_{PU}; & a_1 &= K_{PU}; & a_2 &= 0; \\ b_0 &= 1 - K_{QU}; & b_1 &= K_{QU}; & b_2 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Электроприемники разного вида, подключенные к одним и тем же точкам распределительной сети, могут быть эквивалентированы зависимостью их суммарной активной и реактивной мощности от напряжения в этом узле:

$$\begin{aligned} P_{НГ}(U) &= P_{НГ0\Sigma} \cdot \left[ 1 + K_{PU}^{U_3} \cdot \frac{\Delta U}{U_0} \right], \\ Q_{НГ}(U) &= Q_{НГ0\Sigma} \cdot \left[ 1 + K_{QU}^{U_3} \cdot \frac{\Delta U}{U_0} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} P_{НГ0\Sigma} &= \sum_{i=1}^n P_{НГ0i}; & Q_{НГ0\Sigma} &= \sum_{i=1}^n Q_{НГ0i}, \\ K_{PU}^{U_3} &= \sum_{i=1}^n K_{PU_i} \frac{P_{ЭП0i}}{P_{НГ0i}}; & K_{QU}^{U_3} &= \sum_{i=1}^n K_{QU_i} \frac{Q_{ЭП0i}}{Q_{НГ0i}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Натурные исследования в действующих электрических сетях говорят о том, что энергослужбы предприятий слабо контролируют уровни напряжения в сетях 6-10 кВ и в сетях 380 В. Значительное время суток напряжения на 3-5 % превышают номинальные значения, что технически допустимо, но экономически расточительно.

Если считать, что регулирующий эффект активной мощности ЭП по напряжению  $K_{PU}=0.3$  (Сыромятников, 1963), то получается, что уровни напряжения  $U = (1.03-1.05)U_{ном}$  приводят к повышенному потреблению активной мощности (энергии) на 1-1.5 % от потребления при номинальном уровне напряжения. И, наоборот, принудительное поддержание напряжения на минимальном рабочем уровне  $0.95U_{ном}$ , дает возможность снизить активное энергопотребление на 1.5 % по сравнению с номинальным или на 2.5-3 % по сравнению с потреблением при повышенном напряжении. Еще в большей степени зависит от напряжения потребление реактивной мощности (энергии), так как регулирующий эффект для многих ЭП лежит в диапазоне 2-3.

### 3. Заключение

Возможность снижения потребления активной и реактивной мощности и энергии из питающей сети за счет поддержания оптимальных уровней напряжения в сети предприятия также должна заинтересовать энергослужбы потребителей.

Для успешного решения предприятием задачи поддержания оптимального напряжения на уровне желаемых величин необходимо знать следующее: 1) данные о схемах и параметрах питающей сети, 2) данные о суточных, и если нужно, сезонных изменениях нагрузки предприятия, 3) данные о фактических величинах напряжения на шинах трансформатора со стороны системы и со стороны нагрузки, 4) данные о суточных изменениях.

### Литература

- Карпов Ф.Ф., Солдаткина А.А.** Регулирование напряжения в электрических цепях промышленных предприятий. М., Энергия, 272 с., 1970.  
**Лотоцкий К.В.** Электрические машины и основы электропривода. М., Колос, 495 с., 1964.  
**Сыромятников И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М., Госэнергоиздат, 256 с., 1963.