

УДК 621.31

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ КОМПЛЕКТНЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

М.А. Дзюба, В.И. Сафонов

В работе рассмотрена простая математическая модель компенсации реактивной мощности (КРМ) в системе электроснабжения (СЭС) промышленного предприятия, использующая только современные технические и экономические данные. В качестве критерия оптимальности использована эффективность затрат. Модель позволяет рассчитывать оптимальные величины мощности в узлах СЭС, оценивать их диапазон и проводить параметрический и факторный анализ оптимальности решения. Также проведены оценки эффективности применения комплектных конденсаторных установок (ККУ) на шинах 0,4 кВ трансформаторов.

Ключевые слова: система электроснабжения промышленного предприятия, компенсация реактивной мощности, комплектные конденсаторные установки, эффективность затрат.

КРМ в СЭС промышленного предприятия позволяет уменьшить затраты энергоресурсов на выпуск продукции. Существует много способов [1–3] выбора места установки и оптимальной мощности ККУ.

Использование в качестве критерия оптимальности минимума затрат [3, 4] также не всегда оправданно, поскольку КРМ является только одним из способов увеличения энергоэффективности промышленного предприятия [4].

В работе [3] справедливо отмечается, что исходная информация об электрической нагрузке является случайной. Поэтому, кроме математического ожидания оптимальной мощности ККУ, необходимо рассчитывать ее среднеквадратичное отклонение. Поскольку установка ККУ рассчитана на долговременный эффект, то существуют также многочисленные экономические факторы, такие как уровень инфляции и стоимость электрической энергии, изменяющие математическое ожидание и дисперсию мощности ККУ. Детальный учет только одного фактора [3] и пренебрежение остальными факторами не всегда позволяет получить оптимальный результат с заданной точностью.

Проблемой является построение достаточно простой, но в тоже время учитывающей разнообразные факторы, математической модели КРМ в СЭС промышленного предприятия, позволяющей вычислять оптимальные значения мощности ККУ.

Математическая модель

КРМ рассмотрена как инвестиционный проект [5]. Исходными данными для оценки эффективности проекта являются: коэффициенты двухставочного тарифа на электроэнергию α (руб./кВт) и β (руб./кВт*ч), количество часов максимальных потерь τ (ч), коэффициенты аппроксимации стоимости ККУ A_0 (руб.) и B_0 (руб./кВАр), удельные потери энергии в конденсаторной батарее 0.4 кВ составляют dP (кВт/кВАр), номинальная мощность трансформатора S_n (кВА) и его мощность потерь короткого замыкания $\Delta P_{кз}$ (кВт), мощность реактивной нагрузки на шинах 0,4 кВ Q (кВАр), коэффициент инфляции $K_{инф}$ и коэффициент дисконтирования E , срок реализации проекта N (год).

Согласно [4] на основе имеющихся данных вычисляется примерная стоимость потерь электроэнергии на промышленном предприятии:

$$C = 1.05(\alpha / \tau + \beta) \text{ (руб./кВт*ч).} \quad (1)$$

Затраты на ККУ складываются из затрат на приобретение, монтаж и эксплуатацию ККУ. В свою очередь, эксплуатационные затраты складываются из затрат на обслуживание и ремонт и стоимости потерь электроэнергии в ККУ. Все эти затраты можно аппроксимировать функцией от мощности ККУ Q_C вида:

$$Z_{cp}(Q_C) = A + BQ_C \quad (2)$$

с коэффициентами:

$$A = \frac{(1 + \delta_m)A_0}{N} + \frac{\delta_s A_0}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1 + K_{инф}}{1 + E} \right)^k \text{ (руб.) и}$$

$$B = \frac{(1 + \delta_m)B_0}{N} + \frac{\delta_s B_0 + dP C \tau}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1 + K_{инф}}{1 + E} \right)^k \text{ (руб./кВАр).} \quad (3)$$

В выражениях (3) коэффициенты δ_m и δ_s учитывают затраты на монтаж и эксплуатацию ККУ. В выражениях (3) учтено изменение эксплуатационных расходов на ККУ из-за инфляции и проведено дисконтирование этих расходов на начало реализации проекта. Коэффициенты A_0 и B_0 легко получить, выполнив аппроксимацию данных о стоимости ККУ, которые доступны проектировщику.

Эффект от установки ККУ заключается в уменьшении потерь электроэнергии в элементах СЭС и его можно аппроксимировать функцией вида:

$$\Delta Z_{cp}(Q_C) = DQ^2 - D(Q - Q_C)^2, \quad (4)$$

с коэффициентом

$$D = \frac{C\tau\Delta P_{кз}}{S_{ном}^2 N} \sum_{к=1}^N \left(\frac{1 + K_{инф}}{1 + E} \right)^к \quad (\text{руб./кВАр}^2). \quad (5)$$

При установке ККУ на 0,4 кВ уменьшение потерь ЭЭ происходит в трансформаторе цеховой трансформаторной подстанции (ТП), в кабельной линии от главной понизительной подстанции (ГПП) до цеха и в трансформаторе ГПП. Однако оценки сопротивлений этих элементов показывают, что основной эффект наблюдается в трансформаторе ТП. Например, для трансформатора ($S_n=400$ кВА, $\Delta P_{кз}=5.5$ кВт) его активное сопротивление, приведенное к напряжению 10 кВ, равно $r_m = 3.44$ Ом. Сечение кабельной линии проверяют по термической стойкости и оно составляет 120–185 мм². В этом случае сопротивление линии длиной 1 км составляет $r_{кл} = 0.24$ Ом.

Установка ККУ рассчитана на долговременный экономический эффект. Поэтому многие исходные данные известны только с очень большой погрешностью. К этим данным относятся стоимость электроэнергии (коэффициенты α и β), режим работы предприятия и цеха (часы максимальных потерь τ и мощность реактивной нагрузки Q), коэффициенты инфляции $K_{инф}$ и дисконтирования E . Полученное решение задачи оптимизации должно оставаться эффективным при незначительных изменениях этих величин. Поэтому в выражении (5) не учтено уменьшение потерь в кабельных линиях и трансформаторе ГПП. Намеренное занижение эффективности в рассматриваемой модели обеспечит эффективность проекта при ухудшении условий его реализации и значительно упростит рассматриваемую модель. Упрощение модели достигается за счет того, что установка ККУ на шинах 0,4 кВ рассматривается как отдельный проект для данного трансформатора. Такое решение можно рассматривать как первое приближение для задачи оптимизации и в случае эффективности проекта его можно уточнить.

Целевую функцию формируем как максимум эффективности вложений, т.е. делим усредненный экономический эффект от установки ККУ на усредненные затраты на их установку:

$$\mathcal{E}(Q_c) = \frac{\Delta Z_{cp}(Q_c)}{Z_{cp}(Q_c)} \rightarrow \max \quad (6)$$

Приравнивая максимальную эффективность к 1, получаем уравнения для границы эффективности проекта и наиболее эффективную мощность ККУ. Первое уравнение получается из условия, что оба корня полученного квадратного уравнения одинаковы:

$$(2DQ - B)^2 - 4DA = 0 \quad (7)$$

Уравнение (7) проще всего решить относительно реактивной мощности нагрузки Q . В результате получаем граничное значение реактивной мощности на шинах 0,4 кВ, с которой КРМ становится эффективной:

$$Q_{cp} = \frac{B}{2D} + \sqrt{\frac{A}{D}} \quad (8)$$

Результаты и их обсуждение

Оценим критическую реактивную мощность (8) для современных данных: коэффициенты двухставочного тарифа на электроэнергию [6] $\alpha = 14811$ руб./кВт и $\beta = 1,46$ руб./кВт*ч, количество часов максимальных потерь $\tau = 5100$ ч, коэффициенты аппроксимации стоимости ККУ $A_0 = 20480$ руб. и $B_0 = 256$ руб./кВАр (получено для функции $A_0 + B_0 Q_c$ с использованием данных [7]), коэффициенты $\delta_m = 0,3$ и $\delta_s = 0,03$, удельные потери энергии в ККУ 0,4 кВ $dP = 0,0035$ кВт/кВАр [8], коэффициент инфляции $K_{инф} = 0,05$ и коэффициент дисконтирования $E = 0,1$, срок реализации проекта $N = 10$ лет.

В табл. 1 приведены результаты критической реактивной мощности (8) для применяемого на промышленных предприятиях ряда трансформаторов [4].

Таблица 1

Результаты расчетов критической реактивной мощности для применяемого на промышленных предприятиях ряда трансформаторов

S_n кВА	250	400	630	1000	1600	2500
$Q_{гр}$ кВАр	95	156	247	395	613	842
$Q_{гр}/S_n$	0,378	0,39	0,392	0,395	0,383	0,337

Анализ табл. 1 показывает, что в рассмотренных условиях КРМ целесообразна, если величина $Q_{гр}/S_n$ больше предельного значения 0,38, которое почти не зависит от мощности трансформатора.

В рассмотренном выше примере КРМ на шинах 0,4 кВ выполнялась только по экономическим соображениям. В ряде случаев промышленное предприятие должно обеспечить условие на предельный коэффициент мощности в точке подключения к сети:

$$tg(\varphi) < tg(\varphi_{max}) \quad (9)$$

Обеспечить условие (9) можно, устанавливая ККУ на шинах 0,4 кВ трансформаторов ТП или на шинах 10 кВ трансформаторов ГПП.

При установке ККУ на шины 0,4 кВ снижаются потери электроэнергии в трансформаторе ТП, в кабельной линии от ГПП до ТП и в трансформато-

ре ГПП. При установке ККУ на шины 10 кВ снижаются только потери электроэнергии в трансформаторе ГПП.

Стоимость ККУ на 10 кВ и 0,4 кВ различна. Для шин 10 кВ при аппроксимации затрат функцией $A_1 + B_1 Q_C$ аналогичные коэффициенты по данным [5] равны $A_1 = 147,6$ т. руб. и $B_1 = 77$ руб./кВАр. Потери в ККУ 10 кВ составляют $dP_1 = 0,002$ кВт/кВАр [8].

Из приведенных данных видно, что выполнение условия (9) с использованием ККУ 10 кВ дешевле. Но установка ККУ на шины 0,4 кВ помогает также снизить потери электроэнергии в элементах СЭС промышленного предприятия. Поскольку установка ККУ в СЭС является обязательным условием, то для проекта установки ККУ на шины 0,4 кВ можно взять разность между затратами (капитальными и эксплуатационными) на ККУ 0,4 кВ и 10 кВ. Сохраняя остальные данные проекта неизменными, проведем расчеты критической реактивной мощности (8) для различных типов трансформаторов. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов критической реактивной мощности
для различных типов трансформаторов

S_n кВА	250	400	630	1000	1600	2500
$Q_{гр}$ кВАр	64	102	158	246	372	504
$Q_{гр}/S_n$	0,257	0,257	0,251	0,246	0,233	0,201

Анализ табл. 2 показывает, что КРМ целесообразна, если $Q_{гр}/S_n$ больше некоторого предельного значения. Это значение постепенно уменьшается с увеличением мощности трансформатора. Необходимость выполнения условия (9) приводит к тому, что значительно возрастает эффективность вложений (6) на установку ККУ 0,4 кВ, а критическая мощность (8) становится значительно меньше, полученной в табл. 1.

Установка ККУ 0,4 кВ может выполняться также для увеличения пропускной способности трансформатора в послеаварийном режиме. Если вся нагрузка отнесена к 1-й категории по надежности электроснабжения, то коэффициент загрузки в нормальном режиме не может превышать 0,7 [4]. Установка ККУ в данном случае – обязательное техническое требование. Поэтому решая задачу о целесообразности увеличения мощности ККУ для сокращения потерь энергии в элементах СЭС, постоянную составляющую расходов в (2) можно не учитывать. В этом случае критическая величина мощности (8) также изменяется. В табл. 3 приведены данные для случая, когда условие (9) выполнено и ККУ 10 кВ устанавливать не нужно.

Таблица 3

Результаты расчетов критической реактивной мощности

S_n кВА	250	400	630	1000	1600	2500
$Q_{гр}$ кВАр	43	84	150	266	446	641
$Q_{гр} / S_n$	0,171	0,209	0,238	0,266	0,279	0,257

Сравнение табл. 1–3 показывает, что, несмотря на одинаковую цель – уменьшить потери электроэнергии в трансформаторе ТП, диапазон целесообразных значений для КРМ получился существенно различным. КРМ это комплексная проблема и рассматривать ее как набор оптимизационных задач не всегда корректно. Проведенные расчеты показали, что наличие или отсутствие требования (9) существенно изменяет границы оптимальных капитальных и эксплуатационных расходов на ККУ и как следствие диапазон эффективности проектов по установке ККУ. Полученные по выражению (6) значения носят предварительный характер и могут рассматриваться как первое приближение в решении оптимизационной задачи. Особенно корректировка решения необходима для трансформаторов мощностью $S_n=1600$ кВА и $S_n=2500$ кВА, для которых сопротивление $r_m = 0.89$ Ом и $r_m = 0.45$ Ом, что сравнимо с сопротивлением кабельных линий. Задача оптимизации мощности ККУ – это нелинейная оптимизационная задача. Поэтому корректное определение начального приближения позволяет быстро и самое главное правильно решить оптимизационную задачу.

В работе рассмотрена модель КРМ на промышленном предприятии, учитывающая современные экономические и технические условия, сложившиеся на момент начала реализации проекта.

Рассмотренная модель КРМ достаточно проста и одновременно учитывает различные технические и экономические факторы, влияющие на величину оптимальной мощности ККУ. Благодаря простоте модели можно провести расчеты (1–6) при различных случайных исходных данных и получить математическое ожидание и дисперсию мощности ККУ. Имея оптимальные значения при различных начальных условиях, можно провести параметрический, структурный и факторный анализ решения оптимизационной задачи. Таким образом, принимая решение об установке ККУ, можно оценить связанные с этим риски.

Использование в качестве критерия оптимальности эффективности затрат позволяет распределить ресурсы предприятия и направить их прежде всего на решение наиболее актуальных проблем.

Библиографический список

1. Нешатаев, В.Б. Оптимальный выбор источников реактивной мощности в системах распределения электрической энергии: автореф. дис. ... канд.

техн. наук: 05.14.02 / В.Б. Нешатаев. – Красноярск: Сибирский федеральный университет 2012. – 21 с.

2. Микаэльян, Е.Ю. Системный расчёт компенсации реактивных мощностей в электрических системах / Е.Ю. Микаэльян, М.А. Трубицин. – Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1.

3. Герасименко, А.А. Методика и алгоритм расчёта потерь электрической энергии в задаче оптимальной компенсации реактивной мощности в распределительных сетях электроэнергетических систем / А.А. Герасименко, В.Б. Нешатаев // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2011. – С. 567–591.

4. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.

5. Методологические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. – М.: Экономика, 2000.

6. Тарифы на передачу электроэнергии. – URL: <http://www.mrsk-ural.ru/447>.

7. Электротехнический завод «СлавЭнерго». – URL: <https://slavenergo.ru/>.

8. Электротехнический справочник В 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Орлов). – 9-е изд. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 518 с.

[К содержанию](#)