

Если энергосистемы улучшают показатели своей работы при увеличении электропотребления и снижении потерь электроэнергии на своих объектах, то у потребителей энергосбережение ассоциируется с уменьшением платы за электроэнергию.

Наши авторы рассматривают вопросы энергосбережения с позиций потребителей электроэнергии. Они акцентируют внимание на возможном влиянии уровней напряжения на электропотребление, приводят пригодные для инженерных расчетов формулы, которые позволяют оценить этот эффект. Авторы считают, что данный материал поможет потребителям избежать неоправданно повышенной оплаты электроэнергии, в том числе после реализации затратных мероприятий по КРМ.

ЗАВИСИМОСТЬ НАГРУЗКИ И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ

Реальность повышения потребления электроэнергии



Леонид Кучумов,
к.т.н.

Антон Кузнецов,
к.т.н.

ЗАО «НПФ «ЭНЕРГОСОЮЗ»,
г. Санкт-Петербург

Известно, что для потребителей основные эффекты энергосбережения достигаются при затратных мероприятиях по совершенствованию технологических процессов, при замене электрооборудования на изделия с более высоким КПД. К относительно недорогим мероприятиям относят также повсеместно применяемую разгрузку сетей от реактивных токов за счет установки устройств компенсации реактивной мощности (КРМ) и уменьшения тем самым активных нагрузочных потерь.

Но вызывает удивление то обстоятельство, что при обсуждении энергосберегающих мероприятий обходят стороной известные факты роста мощности нагрузок и соответственно электропотребления с увеличением напряжения (соизмеримо с 1% роста электропотребления на 1% роста напряжения). Поэтому пользователям небезразлично, при каких уровнях напряжения работает их система электроснабжения. В большинстве случаев возможно понижение напряжения хотя бы на 1–3% с достижением соответствующего уменьшения оплаты электроэнергии практически без дополнительных материальных затрат. Важно при этом отметить, что на практике неоднократно подтверждалась способность электропотребителей с должным качеством выполнять все запланированные работы при значениях напряжения, находящегося в разрешенном ГОСТ 32144-2013 диапазоне $\pm 10\%$ от $U_{ном}$.

Вопросы целенаправленного регулирования напряжения в целях экономии электроэнергии обсуждались в работах [1–8]. Обоснованные аргументы о важности этого направления еще в 1984 г. были представлены С.М. Маркушевичем в [1].

Обстоятельный анализ возможных эффектов регулирования электропотребления промышленного предприятия при взаимосвязанном выборе режима напряжения и компенсации реактивной мощности дан в докторской диссертации Е.А. Коноховой [4, 5]. В ней целесообразными для реализации предлагались режимы, названные равновесными, в которых потребление активной мощности от источника питания соответствует «технологически заданной нагрузке электроприемников при номинальном напряжении на их зажимах». К сожалению, результаты работ Е.А. Коноховой не нашли широкого распространения из-за сложности понятия равновесных режимов и необходимости использовать для их расчета специальные компьютерные программы, а также нечетких указаний на целесообразность оптимизации режимов по критерию минимальной оплаты электроэнергии.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НАГРУЗОК КАК ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время имеются определенные представления об изменении под влиянием отклонений напряжения активных и реактивных нагрузок с разнообразным по составу набором электроприемников. В повсеместно используемых

программных комплексах для расчета установившихся режимов энергосистем нагрузки могут отображаться статическими характеристиками (СХН) в виде полиномов второго порядка от напряжения $U = U_0 + \Delta U$ [9]:

$$P = P_0 \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_0} + a_2 \frac{U^2}{U_0^2} \right); Q = Q_0 \left(b_0 + b_1 \frac{U}{U_0} + b_2 \frac{U^2}{U_0^2} \right). \quad (1)$$

В (1) индексом «0» помечены напряжения и мощности в некотором исходном, считающемся нормальным режиме, а коэффициенты a и b подбираются при условиях $a_0 + a_1 + a_2 = b_0 + b_1 + b_2 = 1$. Подобные СХН обычно рассчитываются на диапазон изменения напряжения до $\pm 20\%$ от U_0 . Наиболее достоверны СХН, определенные по результатам опытов, проведенных в действующих сетях по специальным методикам. После почти 20-летнего перерыва в стране появились новые публикации об экспериментально и расчетно определяемых СХН [10, 11].

Расчеты установившихся режимов энергосистем проводятся для базовых режимов с известными (принятыми) нагрузками в узлах и коэффициентами трансформации трансформаторов и автотрансформаторов. При этом с высокой точностью определяются потокораспределение мощностей, значения узловых напряжений, потери. В подобных расчетах учитывать СХН не требуется. Алгоритм учета СХН активизируется в расчетах режимов, самоустанавливающихся после возникновения в исходном базовом режиме значительных изменений баланса активных и реактивных мощностей, конфигурации сети, коэффициентов трансформации.

Установившиеся режимы распределительных сетей также повсеместно рассчитываются по алгоритмам, не учитывающим СХН. Это не позволяет выполнять сравнительный анализ режимов систем электроснабжения, отличающихся возможным воздействием на мощность нагрузок и потери мощности с помощью доступных для применения в таких сетях средств регулирования напряжения:

- изменение напряжения в центре питания (обычно только по согласованию с энергоснабжающей организацией);
- выбор отпаяк на распределительных трансформаторах 6–10/0,4 кВ;
- регулирование мощности компенсирующих устройств.

Одна из целей настоящей публикации – показать принципиальную важность учета СХН при обосновании рациональной карты узловых напряжений, потерь напряжения и зависящих от них нагрузок и потерь.

В рассматриваемых нами нормальных, пригодных для эксплуатации установившихся режимах достаточно достоверно воспроизвести зависимости нагрузок от напряжения при их

изменении в пределах считающихся допустимыми по ГОСТ отклонений напряжения $\delta U = \Delta U / U_0 = \pm 10\%$. В этом диапазоне зависимости (1) можно линеаризовать, полагая $a_2 = b_2 = 0$. После ввода обозначений $a_1 = K_P$, $b_1 = K_Q$, $a_0 = 1 - K_P$, $b_0 = 1 - K_Q$ мощности (1) могут быть записаны в упрощенном виде, пригодном для расчетов как по программам для ПК, так и в ручных оценочных расчетах:

$$P_{нг} = P_{нг0} (1 + K_P \cdot \delta U); Q_{нг} = Q_{нг0} (1 + K_Q \cdot \delta U). \quad (2)$$

Безразмерные коэффициенты K_P и K_Q часто называют регулируемыми эффектами нагрузки по напряжению. Они показывают на сколько процентов увеличилась (уменьшилась) исходная мощность нагрузки при отклонении напряжения δU на $\pm 1\%$:

$$K_P = \frac{\Delta P_{нг} / P_{нг0}}{\Delta U / U_0}; K_Q = \frac{\Delta Q_{нг} / Q_{нг0}}{\Delta U / U_0}. \quad (3)$$

По аналогии с (2) и (3) можно ввести в рассмотрение и зависящие от усредненного напряжения потребленную за контрольный промежуток времени активную энергию W_P и ее регулирующий эффект K_{W_P} :

$$W_P = W_{P0} (1 + K_{W_P} \cdot \delta U); K_{W_P} = \frac{\Delta W_P / W_{P0}}{\Delta U / U_0}. \quad (4)$$

Коэффициент K_{W_P} соизмерим по величине со средним за рабочую неделю коэффициентом K_P .

Имеющаяся информация о коэффициентах K_P и K_{W_P} для различных типов нагрузки (например, [1, 7, 12, 13]) свидетельствует о наиболее вероятном диапазоне их изменения в пределах от 0 до 2,5.

Близкие к нулю регулирующие эффекты K_P относятся к промышленным системам электроснабжения с мощными синхронными и асинхронными двигателями.

Повышенные коэффициенты характерны для режимов малых нагрузок, для двигательной, бытовой, офисной и нагревательной нагрузок на стороне 0,4 кВ. В [8] по результатам опытов в цехах с нагрузкой маломощных асинхронных двигателей получены коэффициенты K_{W_P} , равные 4–5. В [10] и [11] для узлов 6 кВ с комплексной нагрузкой фиксировались коэффициенты K_P соответственно 1,6 и 2,0. Коэффициенты $K_P > 0,5$ неоднократно наблюдались авторами при проведении измерений на крупных промышленных предприятиях.

При аналитическом расчете коэффициентов K_{P_Σ} для суммарной нагрузки при известной мощности отдельных электроприемников P_i и их коэффициентов K_{P_i} следует воспользоваться формулой (5), вытекающей из узлового баланса возникающих при появлении отклонений напряжения δU приращений мощностей нагрузок:

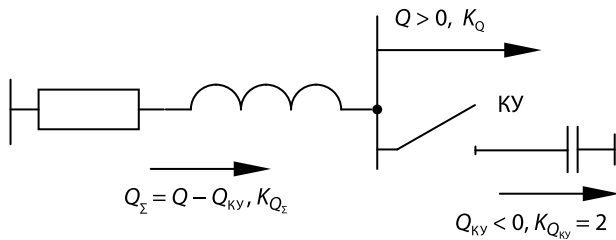
$$K_{P_\Sigma} = \sum_i K_{P_i} \cdot P_i / \sum_i P_i. \quad (5)$$

В [9] обстоятельно поясняется, что в начале возникновения режима с резким изменением напряжения потребитель реагирует с повышенным K_P , но затем с определенной задержкой во времени (десятки минут или часы) возможна адаптация потребителя к изменению напряжения, состоящая в коррекции состава и режимов работы электропотребителей с уменьшением K_P . Но даже при наличии указанной адаптации представляется обоснованным принятие в оценочных расчетах величины возможной экономии расхода электроэнергии для промышленной нагрузки не менее 0,5% на 1% уменьшения напряжения ($K_{W_P} \geq 0,5$) и $K_{W_P} \geq 1,0$ для прочей нагрузки.

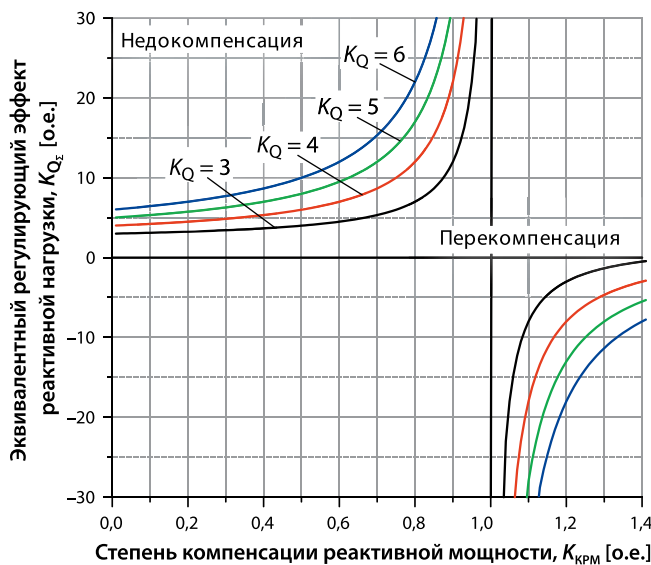
При перестройке карт напряжения в узлах системы электроснабжения с его понижением хотя бы на $\delta U = 3\%$, что представляется возможным для подавляющего большинства сетей, потребитель даже при минимальном $K_{W_P} = 0,5$ без дополнительных затрат уменьшит потребление электроэнергии на величину $\Delta W_P = K_{W_P} \cdot \delta U \cdot W_{P0} \geq 0,5 \cdot 0,03 \cdot W_{P0}$, составляющую долю 1,5% от потребленной энергии W_{P0} .

Кратковременное, на несколько часов, понижение напряжения на большую величину (5–10%) в часы максимального режима энергосистемы позволит значительно (не менее чем на 2,5–5%) уменьшить активную мощность нагрузки и, возможно, избежать штрафов за превышение заявленной договорной мощности нагрузки. ►

• **Рис. 1.** Узловой баланс реактивной мощности с раздельным учетом мощностей нагрузки и компенсирующих устройств



• **Рис. 2.** Зависимость эквивалентного регулирующего эффекта реактивной нагрузки от степени компенсации и регулирующего эффекта реактивной нагрузки



► Реактивная мощность Q нагрузки в гораздо большей степени, чем активная, зависит от напряжения.

Для отдельных электроприемников без учета установленных в сетях компенсирующих устройств (КУ), вырабатывающих имеющую отрицательный знак емкостную мощность Q_{KY} , фиксируется регулирующий эффект $K_Q = 2-6$ [7-9, 12]. При известных реактивных мощностях Q_i и их регулирующих эффектах K_{Q_i} для отдельных электроприемников, коэффициент $K_{Q_Σ}$ суммарной нагрузки $Q_Σ$ может быть вычислен по аналогичной (5) формуле:

$$K_{Q_Σ} = \sum_i K_{Q_i} \cdot Q_i / \sum_i Q_i. \quad (6)$$

Поскольку в составе нагрузок могут быть реактивные нагрузки Q_{KY} емкостного характера, имеющие отрицательный знак, суммарная мощность $Q_Σ$ при приближении к 100-процентной КРМ становится близкой к нулю. При этом возникают эффекты резкого роста числовых значений $K_{Q_Σ}$ и даже смена знака $K_{Q_Σ}$ в случае перекомпенсации реактивной мощности.

Продemonстрируем это, ориентируясь на рис. 1, где показан баланс реактивных мощностей в узле с раздельным учетом реактивной мощности нагрузки Q с регулирующим эффектом K_Q и емкостной мощности Q_{KY} с регулирующим эффектом $K_{Q_{KY}} = 2$. Формула для расчета регулирующего эффекта $K_{Q_Σ}$ суммарной реактивной нагрузки $Q_Σ = Q - Q_{KY}$ по типу (6) записывается как:

$$K_{Q_Σ} = \frac{K_Q \cdot Q - K_{Q_{KY}} \cdot Q_{KY}}{Q - Q_{KY}} = \frac{K_Q - 2K_{KPM}}{1 - K_{KPM}}, \quad (7)$$

где $K_{KPM} = Q_{KY} / Q$ – степень компенсации реактивной мощности. Воспользовавшись формулой (7) можно при предварительных сделанных оценках K_{KPM} и K_Q по (6). При определенном

экспериментально $K_{Q_Σ}$ может быть оценен коэффициент K_Q по формуле:

$$K_Q = K_{Q_Σ} (1 - K_{KPM}) + 2K_{KPM}. \quad (8)$$

На рис. 2 дана иллюстрация расчетов по (7). Как видно, теоретически возможны любые положительные и отрицательные (при перекомпенсации) коэффициенты $K_{Q_Σ}$. Такой большой разброс ($-40 \leq K_{Q_Σ} \leq 100$) в значениях $K_{Q_Σ}$ был получен и при измерениях СХН реактивной мощности нагрузок энергосистем [9]. В относительно недавно проведенных опытах [10, 11] фиксировались коэффициенты $K_{Q_Σ} \approx 14$ и $K_{Q_Σ} \approx 5$ соответственно, что также свидетельствует о наличии в этих сетях компенсирующих устройств.

Заметим, что в редком случае наличия в распределительной сети генераторов, вырабатывающих активную мощность, расчетный коэффициент $K_{P_Σ}$ для эквивалентной нагрузки будет иметь особенности, похожие на рассмотренные выше свойства коэффициента $K_{Q_Σ}$.

ВЛИЯНИЕ УРОВНЕЙ НАПЯЖЕНИЯ НА АКТИВНЫЕ НАГРУЗОЧНЫЕ ПОТЕРИ

Активные нагрузочные потери в распредсетях могут составлять от 3 до 10% от потребленной энергии. Потери в линиях электропередачи, как известно, уменьшаются на 2% при увеличении напряжения на 1%. И поэтому на магистральных линиях стремятся поддерживать повышенные уровни напряжения.

Но следует ли так поступать в нагрузочных узлах распределительных сетей, когда при росте напряжений в соответствии с СХН увеличиваются активные и реактивные мощности нагрузок и соответственно токи и потери в линиях должны увеличиться?

Формулу для расчета нагрузочных потерь в эквивалентном сопротивлении R_s распределительной сети при передаче мощностей P_0 и Q_0 при напряжении U_0 представим в виде (9), позволяющем оценить изменение потерь при наличии приращений напряжения $\Delta U = U_0 \cdot \delta U$ и мощностей $P_0 \cdot K_P \cdot \delta U$ и $Q_0 \cdot K_Q \cdot \delta U$ в соответствии с (2):

$$\Delta P = 3I^2 \cdot R_s = \frac{[P_0 (1 + K_P \delta U)]^2 + [Q_0 (1 + K_Q \delta U)]^2}{[U_0 (1 + \delta U)]^2} R_s. \quad (9)$$

Упростим (9) с учетом следующих действий:

- при возведении соответствующих составляющих в квадрат пренебрежем малыми величинами $(\delta U)^2$;
- учтем справедливость преобразования $1/(1 + \delta U)^2 \approx 1 - 2\delta U$;
- потери ΔP_0 в исходном режиме ($\delta U = 0$) представим в традиционном виде:

$$\Delta P_0 = 3I^2 \cdot R_s = \frac{P_0^2 + Q_0^2}{U_0^2} R_s = \frac{P_0^2 (1 + \text{tg}^2 \varphi_0)}{U_0^2} R_s = P_0 \cdot \delta \Delta P_0, \quad (10)$$

где $\text{tg} \varphi_0 = Q_0 / P_0$ – коэффициент реактивной мощности; $\delta \Delta P_0 = \Delta P_0 / P_0$ – относительная по отношению к P_0 величина потерь.

Сопротивление R_s согласно (10) выразим через относительную величину потерь δP_0 :

$$R_s = \frac{\Delta P_0 \cdot U_0^2}{P_0^2 (1 + \text{tg}^2 \varphi_0)} = \frac{\delta P_0 \cdot U_0^2}{P_0 (1 + \text{tg}^2 \varphi_0)}. \quad (11)$$

В результате получена формула (12) для расчета потерь по отношению к исходным потерям мощности ΔP_0 , вторая составляющая которой является дополнительными нагрузочными потерями, возникающими при изменениях напряжения на относительную величину δU :

$$\Delta P = \Delta P_0 (1 + K_{\Delta P} \cdot \delta U) = \Delta P_0 \left(1 + \delta U \frac{2[K_P - 1 + \text{tg}^2 \varphi_0 (K_Q - 1)]}{1 + \text{tg}^2 \varphi_0} \right). \quad (12)$$

Здесь выражение для коэффициента $K_{\Delta P}$ может быть названо регулирующим эффектом активных нагрузочных потерь по напряжению. Контрольные расчеты по компьютерным программам без принятых допущений подтвердили высокую точность вычислений по (12).

Сделаем ряд пояснений относительно влияния СХН нагрузки на активные потери ΔP .

Приняв условие неучета СХН ($K_p = K_Q = 0$), из (12) получим известный эффект уменьшения потерь на 2% при $\delta U = +1\%$ ($K_{\Delta P \text{ без СХН}} = -2$):

$$\Delta P_{\text{без СХН}} = \Delta P_0 (1 + K_{\Delta P \text{ без СХН}} \delta U) = \Delta P_0 (1 - 2\delta U). \quad (13)$$

Из (12) также следует, что при реальных значениях K_p и K_Q потери не уменьшаются, а наоборот, заметно возрастают по сравнению с часто используемыми оценками по (13). Например, при $K_p = 1$, $K_Q = 3$ и $\tan \varphi_0 = 0,8$ коэффициент $K_{\Delta P}$ при увеличении напряжения на $\delta U = 1\%$ составит:

$$K_{\Delta P} = \frac{2[K_p - 1 + \tan^2 \varphi_0 (K_Q - 1)]}{1 + \tan^2 \varphi_0} = \frac{2[1 - 1 + 0,8^2 (3 - 1)]}{1 + 0,8^2} = 1,56.$$

И это означает, что при увеличении напряжения на 1% ($\delta U = 0,01$) потери возрастают на 1,56% от ΔP_0 (то есть на величину $\Delta P_0 \cdot K_{\Delta P} \cdot \delta U = 0,0156 \cdot \Delta P_0$).

Анализ подобных оценок при других возможных сочетаниях регулирующих эффектов K_p , K_Q и коэффициента реактивной мощности $\tan \varphi_0$ показал, что уровни потерь при росте δU не только всегда будут выше, чем рассчитанные по (13), но в большинстве случаев превысят исходные потери ΔP_0 .

Можно также констатировать, что величина $\Delta P_0 K_{\Delta P} \delta U$ зависящих от δU составляющих нагрузочных потерь даже в случае повышенных потерь ΔP_0 обычно многократно меньше по сравнению с приростом согласно (2) мощности нагрузки $P_0 K_p \delta U$.

Например при $K_p = 1$, $K_{\Delta P} = 1,56$ и $\Delta P_0 / P_0 = 0,05$ отношение указанных составляющих равно $\Delta P_0 \cdot K_{\Delta P} / P_0 \cdot K_p = 0,05 \cdot 1,56 / 1 = 0,078$ (7,8%).

Представляется, что в инженерных оценочных расчетах изменения суммарного электропотребления (нагрузка + потери) допустимо не учитывать зависящие от δU составляющие нагрузочных потерь, а ограничиться расчетом мощности нагрузки по (2).

ВОЗМОЖНОСТЬ РОСТА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КРМ

Повсеместно применяемые мероприятия по КРМ предназначены в первую очередь для разгрузки сетей от реактивных токов и уменьшения тем самым активных нагрузочных потерь мощности. В обоснование этого в учебной и технической литературе приводятся формулы (14) и (15) для расчета эффекта влияния КРМ на изменение потерь:

- отношение K_{n_0} уменьшенных после установки компенсирующих устройств КУ потерь ΔP_{KPM_0} к потерям ΔP_0 в режиме без КУ:

$$K_{n_0} = \frac{\Delta P_{KPM_0}}{\Delta P_0} = \frac{I_{KPM_0}^2}{I_0^2} = \frac{1 + \tan^2 \varphi_{KPM_0}}{1 + \tan^2 \varphi_0}; \quad (14)$$

- относительная величина снижения потерь при реализации КРМ по отношению к потерям в исходном режиме:

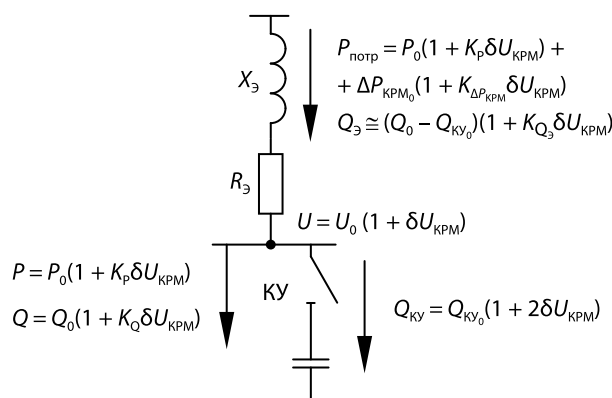
$$\begin{aligned} \delta \Delta P_0 &= \frac{\Delta P_0 - \Delta P_{KPM_0}}{\Delta P_0} = 1 - K_{n_0} = \frac{\tan^2 \varphi_0 - \tan^2 \varphi_{KPM_0}}{1 + \tan^2 \varphi_0} = \\ &= \frac{\tan^2 \varphi_0 (2K_{KPM} - K_{KPM}^2)}{1 + \tan^2 \varphi_0}. \end{aligned} \quad (15)$$

В (14) и (15) индекс «0» у переменных означает, что при выводе формул предполагались одинаковые напряжения в нагрузочном узле до и после включения КУ с мощностью Q_{KV_0} . Вводились также обозначения $\tan \varphi_{KPM_0} = (Q_0 - Q_{KV_0}) / P_0$ и $K_{KPM} = Q_{KV_0} / Q_0$ для степени компенсации реактивной мощности. Активные потери в КУ ввиду их относительной малости не учитывались.

Пример расчетов по приведенным формулам в случае исходного коэффициента реактивной мощности $\tan \varphi_0 = Q_0 / P_0 = 0,8$ и установки КУ для компенсации 50% реактивной мощности нагрузки Q_0 ($Q_{KV_0} = 0,5 Q_0$, $K_{KPM} = 0,5$ и $\tan \varphi_{KPM_0} = 0,4$) дает $K_{n_0} = 0,707$ и $\delta \Delta P_0 = 0,29$. И это формально свидетельствует о большой эффективности КРМ: потери уменьшаются почти на 30% и возможна окупаемость затрат на КРМ за счет уменьшения оплаты электроэнергии.

Узловой баланс мощностей при учете зависимостей нагрузок от напряжения

Рис. 3 •



Однако такие оптимистичные заключения, как показано ниже, могут быть реализованы только при неукоснительном выполнении правила возврата повышающегося после КРМ напряжения к исходному уровню. А поскольку такое целенаправленное регулирование на практике не всегда осуществляется, есть вероятность роста активной нагрузки в соответствии с ее СХН даже на величину, превышающую снижение потерь под действием КРМ. В результате выполнение КРМ может дать отрицательный эффект увеличения суммарного оплачиваемого электропотребления $P_{\text{потр}}$.

При дальнейших пояснениях будем ориентироваться на показанную на рис. 3 схему нагрузочного узла при учете зависимостей мощностей от напряжения.

При учете электроэнергии в голове системы электроснабжения потребляемая мощность $P_{\text{потр}}$ после подключения КУ и увеличения при этом напряжения на относительную величину δU_{KPM} может быть представлена суммой двух зависящих от δU_{KPM} составляющих: нагрузки $P_0 (1 + K_p \delta U_{KPM})$ и нагрузочных потерь $\Delta P_{KPM} = \Delta P_{KPM_0} (1 + K_{\Delta P_{KPM}} \delta U_{KPM})$.

О росте нагрузки P на величину $P_0 K_p \delta U_{KPM}$ говорилось выше (см. пояснения к (2)). Оценим возможные уровни δU_{KPM} и значения потерь ΔP_{KPM} .

В сети с известными мощностью короткого замыкания S_{K3} или эквивалентным реактивным сопротивлением x_3 относительное повышение напряжения δU_{KPM} при задействовании компенсирующей мощности Q_{KV} можно оценить по формуле:

$$\delta U_{KPM} \approx \frac{Q_{KV}}{S_{K3}} \approx \frac{Q_{KV} \cdot x_3}{U_0^2} \approx \frac{Q_{KV} \cdot u_k}{S_{\text{т.ном}}}. \quad (16)$$

Например, если приблизительно представить мощность S_{K3} в (16) через номинальную мощность питающего трансформатора $S_{\text{т.ном}}$ и величину его относительного напряжения короткого замыкания u_k ($u_k \approx 0,06$ о.е. для сетей 0,4 кВ и $u_k \approx 0,12$ о.е. для сетей 6–10 кВ), то при близких к максимально возможным значениям $Q_{KV} \approx 0,6 S_{\text{т.ном}}$ имеем $\delta U_{KPM} \leq 0,6 \cdot u_k = 0,6 \cdot 0,06 = 0,036$ (3,6%) в сети 0,4 кВ и $\delta U_{KPM} = 0,6 \cdot u_k = 0,6 \cdot 0,12 = 0,072$ (7,2%) в сетях 6–10 кВ. На такие и большие проценты в соответствии с (2) может возрасти активная мощность нагрузки, если ее регулирующий эффект равен $K_p \geq 1$.

Приводившиеся выше формулы (9)–(12) для расчета потерь мощности под влиянием изменявшегося напряжения в сети можно использовать только для сетей без КУ. Поэтому с применением приемов, использовавшихся при выводе (12), была получена формула (17), учитывающая специфику влияния на потери установленных КУ:

$$\begin{aligned} \Delta P_{KPM} &= \Delta P_{KPM_0} (1 + K_{\Delta P_{KPM}} \delta U_{KPM}), \\ K_{\Delta P_{KPM}} &= \frac{2[K_p - 1 + \tan^2 \varphi_{KPM_0} (K_{Q_3} - 1)]}{1 + \tan^2 \varphi_{KPM_0}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Коэффициент $K_{\Delta P_{KPM}}$ здесь является регулирующим эффектом нагрузочных потерь по напряжению при осуществ-

► влении КРМ. Эквивалентный регулирующий эффект K_{Q_0} для реактивной мощности рассчитывается по формуле (7), учитывающей наличие параллельно включенных реактивной нагрузки с мощностью Q_0 и регулирующим эффектом K_Q и компенсирующей емкости Q_{KV} , имеющей регулирующий эффект $K_{Q_{KV}} = 2$.

Пример расчета изменения нагрузки, нагрузочных потерь и результирующего потребления в системе электроснабжения с установленными КУ дадим для следующих исходных данных: $\text{tg}\varphi_0 = 0,8$, $Q_{KV} = 0,5Q_0$, $\text{tg}\varphi_{KPM_0} = 0,4$, $K_{KPM} = 0,5$, $K_p = 1$, $K_Q = 3$. Также примем, что потери ΔP_0 в режиме без КУ составляют 5% от P_0 ($\Delta P_0 = 0,05P_0$) и напряжение после подключения КУ увеличилось на 2% ($\delta U_{KPM} = 0,02$).

При расчетах ожидаемых эффектов КРМ, проводимых без учета СХН или в предположении о специальном регулировании напряжения на его постоянство согласно (14) и (15) имеем $K_{\varphi_0} = 0,707$ и $\delta \Delta P_0 = 0,29$. В результате нагрузочные потери должны уменьшиться на 29% с уровня $\Delta P_0 = 0,05P_0$ до $\Delta P_{KPM_0} = K_{\varphi_0} \Delta P_0 = 0,707 \Delta P_0 = 0,035P_0$. При этом суммарное потребление составляет $1,035P_0$ (за счет КРМ потребление уменьшилось на $0,015P_0$, или на 1,5%).

Но при учете СХН с регулируемыми эффектами $K_p = 1$ и $K_Q = 3$, а также роста напряжения после подключения КУ на $\delta U_{KPM} = 2\%$ в соответствии с (2) имеем увеличение активной нагрузки на 2% и реактивной нагрузки на 6%. Согласно (17) увеличиваются также нагрузочные потери ΔP_{KPM} на относительно малую величину $K_{\Delta P_{KPM}} \cdot \delta U_{KPM} \cdot \Delta P_{KPM_0} = 0,827 \cdot 0,02 \Delta P_{KPM_0} = 0,0165 \Delta P_{KPM_0} = 0,012 \cdot \Delta P_0 = 0,012 \cdot 0,05P_0 = 0,0006P_0$ (подтверждается ранее высказывавшееся мнение об относительно малом влиянии СХН на активные нагрузочные потери). Суммарное активное электропотребление в режиме с КРМ составит величину:

$$\begin{aligned} P_{\text{потр}} &= P + \Delta P_{KPM} = \\ &= P_0 (1 + K_p \cdot \delta U_{KPM}) + \Delta P_{KPM_0} (1 + K_{\Delta P_{KPM}} \cdot \delta U_{KPM}) = \\ &= P_0 (1 + 1 \cdot 0,02) + 0,035P_0 (1 + 0,827 \cdot 0,02) = \\ &= (1,02 + 0,036)P_0 = 1,056P_0, \end{aligned} \quad (18)$$

которая превышает потребление в режиме без КРМ, равное $P_0 + \Delta P_0 = 1,05$.

Итак, в примере с реальными параметрами и СХН системы электроснабжения не получено эффекта снижения электропотребления при установке КУ, если после подключения КУ не приняты меры по восстановлению прежнего уровня напряжения. Более того, потребитель, понесший затраты на КРМ, будет больше платить за электроэнергию. В такой ситуации выгоднее отказаться от КРМ.

Подобные расчеты могут быть выполнены заинтересованными специалистами применительно к условиям обслуживаемой ими системы электроснабжения. Оценки регулирующих эффектов нагрузки K_p и K_Q можно сделать по результатам анализа состава электрооборудования либо при проведении активных экспериментов с изменением напряжения за счет изменения коэффициента трансформации (переключения отпайки РПН) головного трансформатора. Относительное изменение напряжения δU_{KPM} легко определяется в опытах с включением и отключением КУ.

Вышесказанное про КУ показывает некорректность повсеместно выполняемых для систем электроснабжения проектов КРМ: в них нет упоминания о возникающем повышенном напряжении и вызываемом им увеличении мощности нагрузки, нет предостережения о необходимости другими средствами регулирования напряжения обеспечить отсутствие роста нагрузки при увеличении мощности Q_{KV} . В результате во многих системах электроснабжения реализация КРМ приводит к отрицательному эффекту, то есть к росту платы за электроэнергию.

ИТОГОВЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

1. Объективно существующий рост мощности нагрузок при увеличении напряжения приводит к необходимости с целью уменьшения электропотребления поддерживать напряжение у потребителей на возможно более низком уровне, допустимом по техническим требованиям.

В ГОСТ 32144-2013, соответствующем европейскому стандарту EN 50160:2010, наименьшим допустимым напряжением признано $0,9U_{\text{ном}}$.

Более приемлемым, компромиссным решением полагаем поддержание в течение суток напряжения только у наиболее отдаленных от центра питания потребителей на уровне $0,95U_{\text{ном}}$ при соответственно более высоких напряжениях на выводах прочих электроприемников.

Потенциал возможного энергосбережения в этом случае пропорционален разнице усредненных значений напряжения до и после перестройки карты напряжений. Во многих системах электроснабжения, работающих с повышенными уровнями напряжения, можно было бы без дополнительных затрат достичь экономии электроэнергии в несколько процентов от среднесуточного расхода.

2. При компенсации реактивной мощности нагрузки за счет подключения компенсирующих устройств согласно (14) и (15) уменьшаются нагрузочные потери. Но вследствие повышения при этом напряжения на долю δU_{KPM} в соответствии со статическими характеристиками увеличивается мощность нагрузки на величину $K_p P_0 \delta U_{KPM}$, превышающую, как правило, достигнутое уменьшение потерь. В этих условиях потребитель, выполнивший нормативы по КРМ и понесший значительные затраты, несет постоянные дополнительные расходы на оплату электроэнергии.

Поэтому неперенным условием, обеспечивающим эффективность КРМ, является строгое поддержание напряжения в нагрузочном узле, по крайней мере недопущение его повышения при подключении компенсационных устройств.

3. Преимущественно радиальные структуры распределительных сетей позволяют централизованно изменять напряжение с использованием РПН трансформаторов на главной понизительной подстанции. Дополнительно для регулирования напряжения в сетях 0,4 кВ используются трансформаторы 6–10/0,4 кВ с сезонно переключаемыми коэффициентами трансформации в пределах $\pm 2 \times 2,5\%$.

К сожалению, большие ступени регулирования РПН (1,5–1,78%) и ПБВ (2,5%) не позволяют в полной мере производить строгую коррекцию напряжений, отвечающую критерию минимума электропотребления.

Если по каким-либо причинам понижение напряжения в сети после подключения КУ затруднено (невозможно) и увеличивающаяся согласно СХН составляющая мощности нагрузки превышает расчетную величину уменьшения потерь мощности, то выполнять компенсацию реактивной мощности невыгодно из-за роста электропотребления.

4. Приведенные в статье формулы (2)–(17) могут быть использованы специалистами, эксплуатирующими системы электроснабжения, для оценочных расчетов существующих режимов по сравнению с возможными режимами, рациональными по критерию энергосбережения. Предполагается, что расчетчик имеет хотя бы приближенное представление о регулирующих эффектах K_p и K_Q нагрузки, о существующем и желаемом коэффициенте реактивной мощности $\text{tg}\varphi$, о желаемой степени компенсации реактивной мощности $K_{\text{комп}} = Q_{KPM}/Q_0$, об относительной величине нагрузочных потерь мощности $\Delta P_0/P_0$.

Для выполнения качественного проекта реконструкции системы электроснабжения с реализацией энергосберегающего режима напряжений следует обратиться в компетентную организацию, способную с использованием стандартных программ компьютерного расчета установившихся режимов создать математическую модель сети с подробным учетом всех электроприемников, их статических характеристик, параметров и мест установки компенсирующих устройств, дискретности РПН и ПБВ трансформаторов.

5. При реализации энергосберегающих режимов напряжения могут возникнуть конфликтные ситуации в системах электроснабжения, имеющих, как правило, несколько юридически независимых потребителей и собственников электрооборудования.

Энергосистемы не заинтересованы в поддержке проводимых в сетях потребителей мероприятий по минимизации электропотребления, так как в этом случае ухудшается один из главных отчетных показателей – объем продажи электрической энергии. А помощь квалифицированных

специалистов энергосистемы при этом нужна, особенно если силовые трансформаторы с РПН находятся на балансе энергосистемы.

Для конструктивного взаимодействия с энергоснабжающей организацией при внедрении энергосберегающего регулирования напряжения вполне оправданной была бы передача ей части получаемого потребителем энергосберегающего эффекта за счет ввода поправочных коэффициентов к показаниям электросчетчиков потребителей.

Возможным осложняющим фактором может также явиться большое число подключенных к сети не контактирующих между собой потребителей со своими представлениями о целесообразных уровнях напряжения. Например, только ограниченное число пользователей выполняют директивные условия по КРМ, и если после установки компенсирующих устройств в сети повысится напряжение, то ущерб из-за увеличивающейся платы за электроэнергию получают все абоненты.

6. Представляется необходимым реализовать в выбранной системе электроснабжения с повышенными регулирующими эффектами K_p и K_Q нагрузки по напряжению пилотный проект энергосберегающего регулирования напряжений с подтверждением экспериментально достигнутого уменьшения электропотребления. Полученный при этом результат следует использовать для разработки соответствующих нормативно-технических документов, способствующих тиражированию данного направления энергосбережения за счет скоординированного регулирования напряжений и мощности устройств КРМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1984. 214 с.
2. Орлов В.С. Снижение электропотребления путем регулирования напряжения // Промышленная энергетика. 1991. № 4.
3. Кучумов Л.А., Веселов А.Е., Кабир М.Х. Об алгоритмах оптимизации установившихся режимов системы электроснабжения // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч. тр.: Ч. 2. СПб.: СПбГТУ РП, 1993. 89 с.
4. Конюхова Е.А. Регулирование электропотребления промышленного предприятия при взаимосвязанном выборе режима напряжения и компенсации реактивной мощности: Дис. на соиск. уч. ст. д.т.н. М.: МЭИ, 1998.
5. Конюхова Е.А. Выбор мощности батарей конденсаторов в цеховых сетях промышленных предприятий с учетом режимов напряжений // Электричество. 1988. № 1.
6. Kuchumov L. The Estimation and Optimization Algorithms of Electric Regimes in Power Loads Power on Voltage Dependence // The 3rd International Conference Electric Power Quality and Supply Reliability. Haapsalu, Estonia, 2002.
7. Toomas Vinnal, Lauri Kutt, Heliut Kalda. Analysis of Power Consumption and Losses in Relation to Supply Voltage Levels // The 6th International Conference Power Quality and Supply Reliability. Parnu, Estonia, 2008.
8. Кудрин Б.И., Прокопчик В.В. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. пособие для вузов. Минск: Высш. шк., 1998. 397 с.
9. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990, 390 с.
10. Балдов С.В. и др. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой // Вестник ИГЭИ. 2014. Вып. 6.
11. Хрущев Ю.В. и др. Методики идентификации статистических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента // Известия ТПУ. Техника и технологии в энергетике. 2014. Т. 325, № 4.
12. Конюхова Е.А. Определение регулирующих эффектов нагрузки цеховых трансформаторных подстанций расчетным путем с помощью ПЭВМ // Известия вузов. Электромеханика. 1998. № 2.
13. Абрамович Б.Н., Каменев П.М. Регулирующие эффекты нагрузки промышленных предприятий и их использования в часы максимума нагрузки энергосистемы // Промышленная энергетика. 1988. № 8. ■