

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; Ю. В. Грицюк, к. т. н.; В. М. Пирняк

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ КАК ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ УСЛУГА

Проанализированы факторы влияния реактивной мощности на технико-экономические показатели электрической сети. Показано, что затраты на производство, передачу и регулирование реактивной мощности в рыночных условиях должны возмещаться.

Ключевые слова: электрические сети, реактивная мощность, регулирование напряжения, вспомогательные услуги.

Введение

Реактивная мощность в электрических сетях во многом определяет значение их технико-экономических показателей. Сегодня проблему реактивной мощности особенно остро обсуждают как энергетики, так и потребители электроэнергии. Опубликовано много научных статей и нормативных документов, затрагивающих эту проблему. Тем не менее наблюдается определенная однобокость в рассмотрении места и роли реактивной мощности в электрических сетях. Среди задач, которые возникают с генерированием, передачей и потреблением реактивной мощности, больше всего уделяется внимания влиянию ее на потери активной мощности (электроэнергии) в электрических сетях. Например, методики определения платы за перетоки реактивной электроэнергии, другими словами, компенсации реактивной мощности, разрабатывают, исходя практически с учетом только этого фактора. Вместе с тем реактивная мощность существенно влияет и на другие параметры режимов и параметры электрических сетей. При чем это влияние может быть весомее и в техническом, и в экономическом смысле, чем увеличение потерь электроэнергии, вызванное перетоками реактивной мощности.

Реактивная мощность в электрической сети, содержащей активные сопротивления R , индуктивность L и емкость C , обеспечивает (сопровождает) передачу к потребителям активной мощности, которая генерируется на электрических станциях. Полная мощность, которая передается, может быть представлена как комплексный вектор Пойтинга $\vec{S} = [\dot{E}\hat{H}]$ и определена как [1]

$$-\oint_{\underline{V}} \vec{S} d\vec{s} = \int_{\underline{V}} \gamma E^2 dV + j2\omega \int_{\underline{V}} \left(\frac{\mu H^2}{2} - \frac{\epsilon E^2}{2} \right) dV, \quad (1)$$

где \vec{S} – вектор полной мощности; \dot{E} – вектор напряженности электрического поля; \hat{H} – соориентированный вектор напряженности магнитного поля; μ – магнитная проницаемость среды объемом V ; ϵ – диэлектрическая проницаемость; γ – электрическая проводимость.

В (1) первая составляющая является активной мощностью P , а вторая – реактивной мощностью Q . Таким образом, теорема Умова-Пойтинга может быть записана еще таким образом [1]

$$-\oint_{\underline{V}} \vec{S} d\vec{s} = P + jQ,$$

где реактивная мощность Q равна разности между магнитной и электрической энергиями цепи, умноженной на 2ω

В каждом элементе электрической системы, в котором осуществляется преобразование электрической энергии (генерирование, потребление, передача), обязательно имеется

магнитное, электрическое или электромагнитное поле. Это является технологической необходимостью. Из (1) видно, что при наличии в каждом элементе электрической системы магнитной или электрической энергии при определенных условиях при передаче их разность, т. е. реактивная мощность, может минимизироваться или даже может быть сведена к нулю. При таких условиях, которые принято называть компенсацией реактивной мощности во время ее передачи, минимизируется влияние реактивной мощности на технико-экономические показатели электрической сети. При переходе к рынку электроэнергии и электроснабжению по двусторонним соглашениям факторы влияния реактивной мощности на технико-экономические показатели электрических сетей должны получать экономическую оценку [2, 3].

В данной статье проанализированы следствия от передачи реактивной мощности в электрических сетях в современных экономических условиях, когда управление реактивной мощностью и связанное с этим регулирование напряжения рассматривают как платную услугу.

Влияние реактивной мощности на работу электрических сетей

На рис. 1 приведен перечень важнейших факторов влияния реактивной мощности на процесс передачи электроэнергии.



Рис. 1. Факторы влияния реактивной мощности на электрическую сеть

Необходимость передачи реактивной мощности от электростанций к потребителям влияет на конструктивные параметры электрической сети, поскольку приводит к увеличению тока и, соответственно, к увеличению сечения проводов, удорожанию опор воздушных ЛЭП и т.д. В случае, когда линии находятся уже в эксплуатации, компенсация реактивной мощности позволяет увеличить ими на соответствующую величину передачу активной мощности. Предусмотрев установку компенсирующих установок (КУ) в электрических сетях на стадии их проектирования, можно уменьшить затраты, уменьшив сечение проводов и мощность трансформаторов на часть, необходимую для передачи реактивной мощности.

Передача реактивной мощности элементами электрической сети вызывает дополнительные потери активной мощности (электроэнергии) и потери напряжения. Для покрытия дополнительных потерь электроэнергии должна быть предусмотрена дополнительная установленная мощность на электростанциях, а для поддержания напряжения в допустимом диапазоне в электрических сетях должны быть предусмотрены дополнительные средства регулирования напряжения. Это, очевидно, требует дополнительных капиталовложений.

Затраты на покрытие влияния реактивной мощности на режимы электрической сети можно выделить точные и предвиденные. Точные затраты определяются параметрами сети и могут быть рассчитаны на основании законов электротехники. Это затраты на компенсацию потерь активной мощности (электроэнергии) в электрической сети. Точные затраты состоят из капиталовложений, постоянных и переменных расходов, связанных с влиянием реактивной мощности на потери электроэнергии и обслуживанием средств компенсации реактивной энергии. Управление процессом возмещения затрат в электрической сети, вызванных потерями электроэнергии, осуществляется согласно специальным методикам, например [4].

Сложнее с предвиденными затратами на реактивную мощность. Предвиденные затраты включают синхронные генераторы, когда, из-за дополнительной реактивной энергии, необходимой для ЭЭС, они изменяют запланированный график напряжения и теряют доход от отпуска активной электроэнергии. Эти затраты являются скрытыми расходами. Потери активной мощности в синхронных генераторах зависят от генерирования ими реактивной мощности [5, 6]:

$$\Delta P = \frac{D_1}{Q_n} Q + \frac{D_2}{Q_n^2} Q^2, \quad (2)$$

где D_1, D_2 – постоянные для данного генератора величины, которые зависят от мощности и КПД генератора; Q_n – номинальная реактивная мощность генератора; Q – текущее значение реактивной мощности генератора.

Этими потерями незаслуженно часто пренебрегают, поскольку считают, что они не значительные. Например, для генератора Т-2-50-2 с $Q_n = 31$ Мвар, $D_1 = 36,7$ кВт и $D_2 = 62,1$ кВт $\Delta P_n = 98,8$ кВт, а при $Q = 1,1 \cdot Q_n$ $\Delta P_{1,1} = 115,5$ кВт, при $Q = 1,2 \cdot Q_n$ $\Delta P_{1,2} = 133,5$ кВт. То есть, если для увеличения напряжения в электрической сети необходимо увеличить реактивную мощность генератора на 20 %, то это приведет к увеличению потерь активной мощности в генераторе на 34,7 кВт, или на 35%. При этом на 20% уменьшается генерирование активной мощности.

Дополнительные потери активной мощности в зависимости от реактивной мощности возникают не только в обмотках генераторов, а и в повышающих трансформаторах электростанций и в устройствах энергосистемы, задействованных в балансировании реактивной мощности (шунтирующие реакторы, синхронные компенсаторы, СТК, и т. п.). Потерями в них также, как правило, пренебрегают при оценивании затрат электропередающих организаций на регулирование реактивной мощности и напряжения. Очевидно, что в рыночных условиях электрогенерирующие и электропередающие организации не готовы с этим согласиться.

Реактивная мощность, которую выдают электростанции системы, связана с напряжением на шинах нагрузки U_n и возбуждением генераторов: $E \equiv i_{603}$. Для радиальной сети, суммарное сопротивление которой x , справедлива зависимость [7]

$$U_n^2 = \left(E - \frac{Q_n + \Delta Q}{E} x \right)^2 - \left(\frac{Px}{E} \right)^2, \quad (3)$$

где $P = P_i + \Delta P$ – активная мощность электропередачи; P_n , Q_n – активная и реактивная мощности нагрузки; ΔP , ΔQ – потери активной и реактивной мощностей в сети и генераторе.

Из (3) следует, что регулирование напряжения на шинах нагрузки U_n и поддержание его заданного значения обеспечивают регулированием возбуждения генераторов $E \equiv i_{\theta 03}$, что, в свою очередь, означает регулирование реактивной мощности генераторов

$$Q_G = Q_n + \Delta Q = \frac{E^2}{x} - \frac{EU}{x} \cos \delta,$$

где δ – угол между векторами E и U .

Из последнего выражения следует, что уровень напряжения в сети (на нагрузке) связан с балансом реактивной мощности или

$$\Delta U \approx f(\Delta Q).$$

Включение батарей конденсаторов (БК) на шины нагрузки с целью компенсации реактивной мощности приводит не только к положительным результатам, т. е. уменьшению потерь электроэнергии, а имеет и отрицательные следствия – ухудшает устойчивость [7]. На рис. 2 показаны зависимости реактивной мощности и напряжения до включения БК (кривая 1) и после включения БК (кривая 2). После включения БК в составе нагрузки появляется отрицательная составляющая, что приводит к деформированию характеристики $Q=f(U)$. Она становится более полой и запас устойчивости уменьшается, так как

$$\frac{\delta Q_2}{\Delta U} \leq \frac{\delta Q_1}{\Delta U}.$$

Таким образом, компенсируя реактивную мощность с целью уменьшения потерь электроэнергии, необходимо в системе предусматривать регулированные источники реактивной мощности, которые при необходимости будут корректировать характеристику $Q=f(U)$. Это означает также то, что в узлах системы необходимо поддерживать определенные соотношения между активной и реактивной мощностями, т. е. $tg\varphi$.

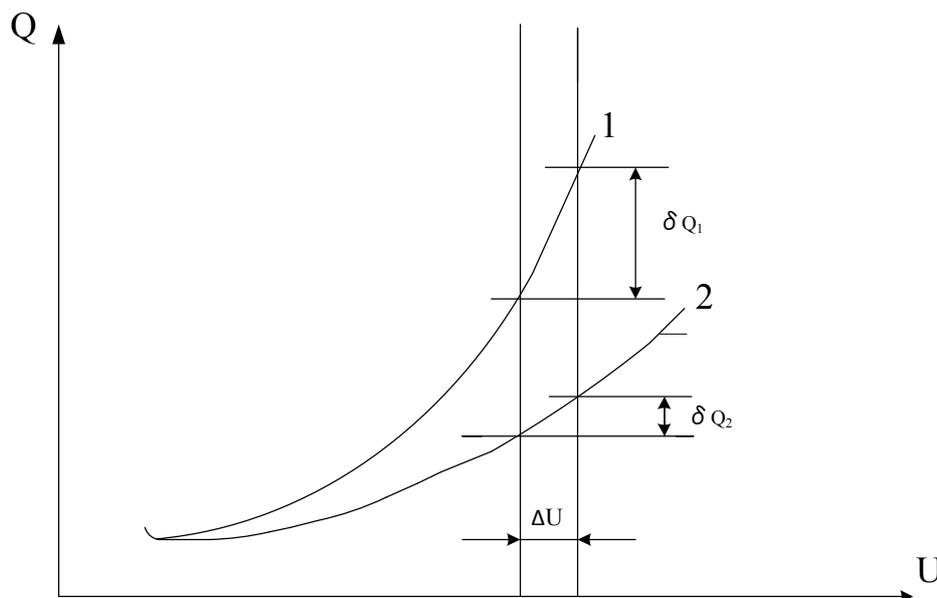


Рис. 2. К анализу влияния БК на устойчивость нагрузки

Услуги по регулированию реактивной мощности

При создании рынка услуг по регулированию реактивной мощности и напряжения
Наукові праці ВНТУ, 2012, № 2

сталкиваются с неоднозначным пониманием того, что именно является услугой, которую предоставляют и приобретают, кто должен быть ее продавцом или покупателем. Это обусловлено как спецификой физической сути реактивной мощности, так и особенностями ее генерирования и потребления и возможностями локального регулирования уровней напряжения в сети. При этом недостаточная оснащенность средствами компенсации реактивной мощности приводит к сложностям в регулировании напряжения в отдельных узлах ЭЭС. Неудовлетворительное состояние средств компенсации реактивной мощности в отдельных узлах электрической сети приводит к тому, что генераторы электростанций становятся фактически единственным эффективным средством поддержания допустимых уровней напряжения в этих узлах и близлежащих участках сети. Являясь основным источником реактивной мощности в ЭЭС, генераторы электростанций одновременно являются важным средством регулирования напряжения. В рыночных условиях регулирование напряжения и реактивной мощности составляет суть услуг, которые предоставляют для создания нормальных условий электроснабжения. Они делятся на системные и вспомогательные [2, 3].

Системные услуги предназначены для обеспечения постоянной работы ЭЭС, надежности функционирования системы передачи электроэнергии, качества и надежности снабжения электроэнергией от производителей потребителям в процессе оперативно-диспетчерского управления [2]. Системные услуги предоставляются системным оператором всем пользователям ЭЭС на основании договора о подключении и использовании электрических сетей. Системный оператор является единственным поставщиком системных услуг, которые предоставляются пользователям ЭЭС.

Вспомогательные услуги (ВУ) – это идентифицированный, персонифицированный, измеряемый или определенный с соответствующими затратами продукт, предоставленный субъектом электроэнергетики или квалифицированным потребителем электрической энергии и потребляемый непрерывно в режиме реального времени или в определенные фиксированные промежутки времени для обеспечения оптимально сбалансированной и постоянной работы ЭЭС на основании договора с системным оператором о предоставлении услуги [2].

ВУ относительно регулирования реактивной мощности производителями являются обязательными. Обязательные – это те, предоставление которых может требоваться от отдельных субъектов рынка, а коммерческие – это те, которые предоставляются субъектами рынка услуг на добровольных началах. Обязательные ВУ используются для поддержания напряжения и регулирования реактивной мощности производителями. Это обязательный минимум, который предоставляется всеми лицензиатами с производства. Другие ВУ могут привлекаться для поддержания напряжения и регулирования реактивной мощности свыше обязательного минимума. Коммерческие ВУ используют для резервирования возможностей средств поддержания напряжения и регулирования реактивной мощности производителями и потребителями свыше обязательного минимума [2].

Выводы

1. Реактивная мощность является неотъемлемым элементом производства, передачи и потребления электроэнергии. Транспортировка ее электрическими сетями вызывает ряд отрицательных явлений, которые проявляются в ухудшении качества напряжения и в увеличении потерь электроэнергии. Она также влияет на устойчивость узлов нагрузки, уменьшает пропускную способность сети.

2. Производство и передача реактивной мощности связаны с затратами, которые в рыночных условиях должны возмещаться. Оплата услуги за регулирование реактивной мощности и поддержание напряжения в электрических сетях должна формироваться не только за счет потерь электроэнергии, вызванных передачей реактивной мощностью, но и с

учетом других факторов влияния реактивной мощности на электрическую сеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1967. – 775 с.
2. Ілка Левінгтон. Україна – впровадження концепції оптового ринку електроенергії // Електропанорама. – 2009. – № 1–3.
3. Никитин А.А., Олефир Д.А., Франчик Е.Н. Особенности развития балансирующего рынка и рынка вспомогательных услуг в ОЭС Украины // Електропанорама. – 2010. – № 1–4.
4. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між енергопередавальною організацією та її споживачами (затверджена наказом Мінпаливенерго України 17.01.2002 р. за №19 і зареєстрована Міністерством юстиції України 01.02.2002 р. за №93/6381).
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
6. Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
7. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

Лежнюк Петр Демьянович – заведующий кафедрой электрических станций и систем.
Винницкий национальный технический университет.

Грицюк Юрий Витальевич – доцент кафедры электроснабжения.
Луцкий национальный технический университет.

Пирняк Виктор Михайлович – заместитель начальника Винницкой областной инспекции Госэнергонадзора.