

УДК 621.316.11

А. Е. Фокеев, канд. техн. наук, доц.

Н. А. Вяткин, магистрант

E-mail: saxsix@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Неактивная мощность и способы ее компенсации

Работа посвящена определению понятия неактивной мощности и способам ее компенсации. Полностью разобрано понятие неактивной мощности, что она характеризует, из чего складывается, чем определяется, как рассчитывается, какое влияние оказывает на работу приемников и электрической сети в целом, а также рассмотрены способы ее компенсации и возможные технические решения производителей устройств компенсации неактивной мощности.

Ключевые слова: неактивная мощность, компенсация неактивной мощности, высшие гармоники, нелинейность, УКНМ.

Введение

При эксплуатации электрических сетей промышленных предприятий существует необходимость соблюдения требуемого режима электропотребления в части поддержания соотношения потребляемой активной и реактивной мощности. Электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой расходуют из электрической сети ток несинусоидальной формы. В условиях увеличения количества электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой использование понятия реактивной мощности не достаточно для правильного выбора технических решений по обеспечению требуемого режима электропотребления. Определение реактивной мощности на стадии расчета и выбора силового электрооборудования затруднено, необходимо использовать понятие неактивной мощности и параметры, характеризующие форму тока и напряжения в электрической сети.

Неактивная мощность

Неактивную мощность принято обозначать латинской буквой N – это мощность, которую можно разделить на две составляющие [1]:

– мощность, определяющая взаимодействие гармоник тока и напряжения, изменяющихся синфазно, – реактивная мощность сдвига Q_C ;

– мощность, определяющая взаимодействие гармоник тока и напряжения, изменяющихся противофазно, – мощность искажения $Q_{И}$.

Так как равенство нулю скалярного произведения мощности сдвига и мощности искажения не является очевидным, то используется алгебраическое суммирование:

$$Q_{Н} = Q_{С} + Q_{И}. \quad (1)$$

В соответствии с нормативной технической документацией (стандарт IEEE 1459-2000 «Определения для измерений величин, связанных с электрической мощностью в синусоидальных, несинусоидальных, симметричных и несимметричных условиях») формулу неактивной мощности N можно записать в следующем виде:

$$N = \sqrt{S_e^2 - P^2}, \quad (2)$$

$$S_e = 3 \cdot U_e \cdot I_e, \quad (3)$$

где S_e – эффективная полная мощность, ВА; P – активная мощность, Вт; U_e – эффективное напряжение, В; I_e – эффективный ток трехфазной цепи, А.

Следует отметить, что выражение (1) описывает влияние мощности сдвига – реактивной мощности и мощности искажений – в сети с несинусоидальным режимом работы. Таким образом, значение неактивной мощности можно вычислить по формуле

$$N = \sqrt{Q^2 + D^2}, \quad (4)$$

где Q – реактивная мощность, ВАр; D – мощность искажений, ВА.

Полученное выражение соответствует теории Буденау [2]. Данная теория гласит, что полную мощность можно разложить на активную, реактивную мощности и мощность искажений, что выражается следующей формулой:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2. \quad (5)$$

Геометрическая интерпретация данной формулы представлена на рис. 1.

Таким образом, в полной мощности присутствует мощность потерь, которая не участвует в процессе обмена электроэнергией между источником и приёмником в течение периода времени, что обусловлено отчасти присутствием активной составляющей полной мощности и выражается в значении мощности искажения.

Для возможности проведения визуального анализа связь между составляющими полной мощности представлена в трёхмерном пространстве с осями, обозначающими чистую активную, чистую реактивную мощность и мощность нелинейных искажений, S_1 , P_1 , Q_1 соответственно.

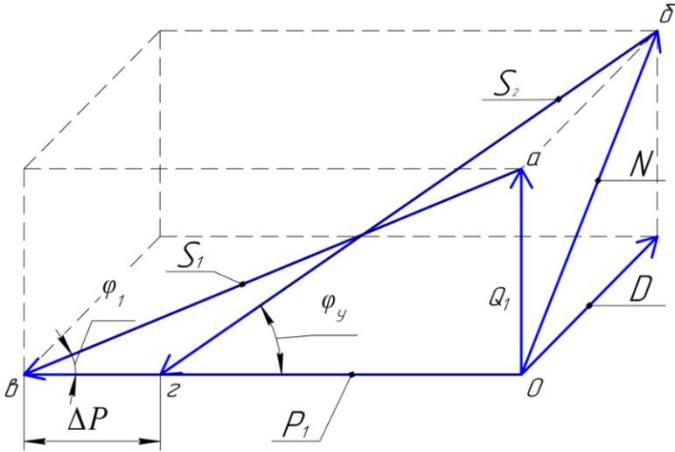


Рис. 1. Графическая интерпретация составляющих полной мощности

На рисунке можно наглядно наблюдать треугольники мощности, отражающие взаимосвязь между составляющими полной мощности при синусоидальном напряжении (треугольник мощности Oab , который характеризует параметры основной гармоники (S_1 , P_1 , Q_1)), и несинусоидальном напряжении (треугольник мощности $Ob\gamma$ (S_2 , $P_1 - \Delta P$, N)). Данные треугольники построены только при условии, что полные мощности, которые расходуются в фазе сети при синусоидальном и несинусоидальном напряжениях, равны между собой ($S_1 = S_2$).

Из этого следует, что увеличение полной мощности при нелинейной нагрузке в цепи происходит за счет мощности нелинейных искажений тока и напряжения, которая не принимает участия в совершении работы. Отсюда полная (кажущаяся) мощность определяется по формуле

$$S^2 = (UI)^2 = S_I^2 + S_N^2, \quad (6)$$

где U и I – действующие значения напряжения и тока в сети; S_I и S_N – мощности гармоник основной частоты и неосновных гармоник.

Мощность гармоник основной частоты определяется как

$$S_1 = (U_1 I_1)^2, \quad (7)$$

где U_1 и I_1 – значения напряжения и тока основной гармоники в сети.

Мощность неосновных гармоник частоты состоит из трех компонентов гармоник искажений и определяется следующим образом:

$$S_N = D_I^2 + D_U^2 + S_i^2 = (U_I I_I)^2 + (U_i I_i)^2, \quad (8)$$

где D_I – токовые искажения мощности; D_U – искажения мощности, вызванные искажениями напряжения; S_N – полная мощность высокочастотных гармоник.

Параметры, характеризующие форму тока и напряжения

Приведенные выше составляющие неактивной мощности не имеют четкой физико-математической интерпретации, которая бы описывала их воздействия на силовое электрооборудование. Значение полной мощности, определяемое по выражению (3), не отражает реальное тепловое воздействие электрической нагрузки на токоведущие части. Поэтому необходимо использовать параметры, характеризующие форму тока и напряжения в электрической сети.

Для оценки уровня гармоник в электрической цепи используют показатель, который называется фактором гармоник, который определяется по формуле

$$K_Y = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (Y_n)^2}}{Y_1}. \quad (9)$$

Данное выражение согласуется со стандартом МЭК 61000-2-2. Также существуют общие коэффициенты гармонических искажений по напряжению и по току, которые определяются из выражений:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (U_n)^2}}{U_1}, \quad (10)$$

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (I_n)^2}}{I_1}. \quad (11)$$

С каждым годом прирост количества нелинейных потребителей и, соответственно, увеличение их совокупной мощности отрицательным образом сказывается на качестве электрической энергии, что также приводит к возрастанию потерь активной мощности в элементах электрической сети. Впоследствии это приводит к уменьшению уровня напряжения в распределительных сетях, что оказывает дополнительную нагрузку на линии электропередач и силовые трансформаторы посредством потоков реактивной мощности. Нелинейные искажения тока в цепи также оказывают негативное влияние [3], которое проявляется в нарушении соразмерности мгновенных значений напряжения и силы тока, что вызвано нелинейностью нагрузки. Данное явление имеет место быть в случае, когда в качестве потребителей реактивной мощности выступают: асинхронные двигатели, трансформаторы, силовое электрооборудование с тиристорным управлением, выпрямители, инверторы, дуговые и индукционные электропечи, газоразрядные лампы, сварочное оборудование, преобразователи частоты, бытовые электрические приборы (компьютеры, телевизоры, микроволновые печи и прочие, имеющие в своей конструкции импульсные блоки питания).

Нарушение линейности нагрузки приводит к появлению следующих негативных последствий:

1. Нарушение целостности нулевого рабочего проводника и кабельной линии ввиду перегрузки токами, кратной трем.
2. Дополнительные потери в трансформаторах.
3. Ухудшение работы батарей конденсаторов.
4. Уменьшение срока службы электрооборудования, изоляции проводов и кабелей ввиду протекания интенсивного теплового и электрического старения изоляции.
5. Возникновение ложного срабатывания предохранителей и автоматов вследствие нагрева внутренних элементов.
6. Возникновение помех в сетях связи и телекоммуникаций, расположенных вблизи силовых кабелей.

Компенсация неактивной мощности

Решая вопрос компенсации неактивной мощности, следует отметить самые эффективные устройства в текущий момент времени. К таким относятся средства управления реактивной мощностью и средства активной фильтрации [4], приведенные устройства компенсации принято называть сокращенно УКНМ. Успешное решение этой задачи обусловлено тенденциями развития силовой электроники, а именно разработкой приборов, которые обладают достаточной мощностью и быстрейшим, а также могут работать в ключевом режиме. К подобным устрой-

ствам относятся управляемые источники реактивной мощности. Задачей данных приборов является компенсация энергии не только емкостного характера, но также и индуктивного, в настоящее время они широко известны как устройства компенсации реактивной мощности с фильтром (УКРМФ). Также данные устройства могут применяться в трехфазных системах электроснабжения для устранения перекаса фазных нагрузок напряжения и тока. Используя данные устройства, можно создавать активные фильтры гармоник (АФГ) и пассивные фильтры гармоник (ПФГ), имеющие общее или отдельное схемотехническое и конструктивное исполнение.

При выборе концепции технического решения производители данных устройств помимо коэффициентов гармонических искажений по напряжению и току, соответственно K_U и K_I , руководствуются таким параметром, как «коэффициент гармоник»:

$$N_{\text{нн}} = \frac{S_{\text{нн}}}{S_{\text{тр}}}, \quad (15)$$

где $S_{\text{нн}}$ – взвешенная сумма мощностей генераторов гармоник, подключенных к вторичной обмотке силового трансформатора; $S_{\text{тр}}$ – номинальная мощность силового трансформатора.

Выбор производителями технического решения по параметру коэффициента гармоник $N_{\text{нн}}$ предполагает предварительную укрупненную оценку доли полной мощности нелинейных потребителей по отношению к мощности силового трансформатора. Следовательно, выбор технического средства для компенсации неактивной мощности производится по критерию уровня мощности токовых искажений. Суть данного подхода заключается в идентификации объектов, уровень высших гармонических составляющих тока которых значителен и при заданной мощности силового трансформатора может привести к возникновению резонансных явлений в контуре силовой трансформатор – УКРМ. Производится идентификация объектов, для которых невозможно применение УКРМ или УКРМФ, таким образом, требуется фильтрация гармонических составляющих посредством ПФГ или АФГ.

ПФГ – согласованные фильтры (рис. 2, в), рассчитанные на компенсацию определенной гармонической составляющей, используются для повышения качества электрической энергии посредством фильтрации гармонических составляющих. Соответственно, для расчета резонансной частоты ПФГ необходимо знать номер гармонической составляющей тока, для которой будет выполняться компенсация.

АФГ – активные фильтры гармоник, используются для компенсации гармонических составляющих тока, путем формирования необходимого спектра гармоник, находящихся в противофазе с гармоническими составляющими тока нагрузки. Применение АФГ возможно в двух вариантах: как для повышения качества электрической энергии (рис. 2, з), так и обеспечения условий работы УКРМФ (рис. 2, д). Для выбора АФГ по номинальному току необходимо определить среднеквадратичное значение тока высших гармонических составляющих в электрической сети:

$$I_{\text{АФГ}} = \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}, \quad (16)$$

где I_h – действующее значение тока h -й гармоники.

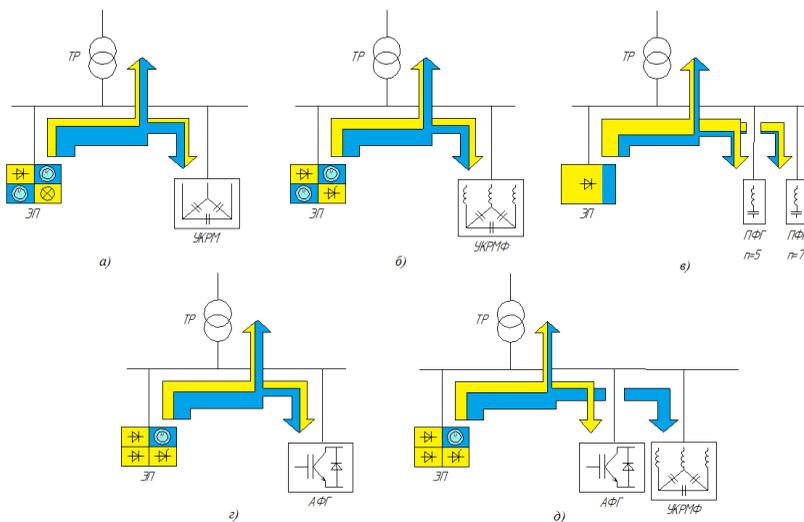


Рис. 2. Распределение потоков неактивной мощности (синий цвет) и токов высших гармоник (желтый цвет) при различных способах компенсации: УКРМ (а); УКРМФ (б); ПФГ (в); АФГ (з); АФГ + УКРМ (д)

Несмотря на увеличение доли гармонических составляющих в сети электрической нагрузки, для современных предприятий по-прежнему остается актуальным применение классического способа компенсации реактивной мощности путем использования УКРМ (рис. 2, а) при усло-

вии соблюдения мер по обеспечению номинального срока службы косинусных конденсаторов. Использование в УКРМФ (рис. 2, б) антирезонансных дросселей позволяет снизить негативное влияние на косинусные конденсаторы, тем самым уменьшает воздействие бросков тока при локальных пробоях диэлектрика и импульсных перенапряжениях.

Выбор и проработка технического решения по компенсации неактивной мощности помимо рекомендаций производителей также должны согласовываться с нормативной документацией, особенно в части выбора номиналов напряжений и температурных классов конденсаторов, так как от этого очень сильно зависит то, как долго и насколько эффективно будет работать конденсаторная установка в составе УКНМ, насколько рациональными и целесообразными будут капиталовложения в данное приобретение.

В Правилах устройства электроустановок [5] (гл. 5.6 «Конденсаторные установки», п. 5.6.9) указано, что конденсаторные батареи рассчитанные на значения номинального напряжения 10 кВ и ниже, должны набираться конденсаторами номиналом, равным номинальному напряжению сети. Длительная перегрузка единичных конденсаторов по напряжению при условии неперевышения порога в 110 % от номинального значения считается допустимой.

Также ГОСТ 27389–87 [6], в особенности п. 2.2, регламентирует, что конденсаторные установки должны выдерживать перегрузки по напряжению, вызванные скачком напряжения либо высшими гармониками, либо и тем и другим явлением в совокупности, в диапазонах изменения до 1,1 номинального значения и до 1,3 действующего значения, отсчитывая от тока, протекающего при номинальном напряжении и номинальной частоте.

Также и в ГОСТ 56744–2015 (МЭК 61921:2003) [7], в п. 5.1, прописано, что эксплуатация конденсаторных установок должна производиться при определенных условиях, то есть при определенной температуре, токе и напряжении, которые могут нарушаться в случае аварийных режимов работы сети.

Пункты 5.2 и 5.3.5 уточняют, что выбор компонентов конденсаторных батарей должен быть выполнен с учетом температурного класса компонентов и самой сборки, а номинал напряжения должен быть как минимум равен подводимому к конденсатору напряжению. Это вызвано тем, что в определенных сетях между подводимым и номинальным напряжением может существовать значительная разница, что имеет немаловажное значение, так как срок службы и дальнейшее качество работы конденсаторных установок стоит под угрозой ввиду негативного влияния увеличенного значения напряжения на конденсаторном диэлектрике.

Пунктом 5.3.5 предусмотрен вариант последовательного включения элементов цепи с конденсатором в качестве средства уменьшения действия эффектов высших гармоник. У данного способа также существует и негативная сторона, как следствие, последовательное включение сопровождается ростом напряжения на зажимах конденсатора свыше допустимого напряжения сети, что приводит к необходимости завышения номинала напряжения конденсатора.

В свою очередь, рассматривая вариант параллельного соединения элементов, следует отметить недостаток, выражающийся в увеличенном значении напряжения в промежутке от источника до точки подключения конденсаторов, что вызвано наличием в цепи высших гармоник. Благодаря данному явлению конденсаторы могут работать при более высоком значении напряжения, по сравнению с тем, которое поступает от источника изначально.

В п. 5.4.1.1, приведены рекомендации по уменьшению действия высших гармоник на конденсаторные установки, с целью предотвращения сокращения сроков службы, путем подключения дросселя последовательно с каждой ступенью конденсатора.

В соответствии с вышеперечисленными указаниями из нормативной документации при выборе конденсаторов необходимо завышать номиналы по напряжению, а также необходимо учитывать влияние высших гармоник и применять соответствующие технические решения с целью предотвращения преждевременного выхода из строя и правильного функционирования оборудования.

Выводы

1. Определено понятие неактивной мощности как суммы мощностей сдвига и реактивной мощности, рассмотрена геометрическая интерпретация полной мощности в соответствии с теорией Буденау.

2. Приведены показатели, по которым оценивается влияние наличия нелинейных потребителей и, как следствие, нелинейных искажений на электрическую сеть, а также рассмотрены негативные последствия и эффективные средства по решению задач компенсации.

3. Рассмотрены критерии, которыми руководствуются производители при выборе и проработке технического решения по компенсации неактивной мощности, в частности при выборе УКРМ и УКРМФ.

4. Обоснована необходимость использования понятия неактивной мощности и параметров, характеризующих форму тока и напряжения в электрической сети.

Список литературы

1. Шпота, А. А. Неактивная мощность в электроэнергетических системах / А. А. Шпота, Д. В. Орлов, Р. А. Набиуллин // Технические науки – от теории к практике : сб. ст. по материалам XLV Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК, 2015. – № 4 (41). – С. 65–71.
2. Сулейманов, А. О. Неактивная мощность и ее составляющие в электроэнергетических системах : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Сулейманов Алмаз Омурзакович. – Томск, 2009. – 135 с. – РГБ ОД, 61 10-5/391.
3. Мощность искажения как технологическая составляющая технологической нормы расхода электроэнергии при передаче по сетям общего назначения / Ю. М. Денчик, В. С. Сальников, М. Н. Иванов, А. В. Гноевой // Сборник научных трудов. Вып. 11 / сост. В. В. Калекин. – Омск : ОИВТ (филиал) ФБОУ ВПО «НГАВТ», 2013. – ISBN 978-5-8119-0522-5.
4. Вагин, Г. Я. Повышение качества электрической энергии и компенсация реактивной мощности на металлургических предприятиях с дуговыми печами / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов, С. Н. Юртаев // Главный энергетик. – 2017. – № 2. – С. 43–48.
5. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 1999–2005.
6. ГОСТ 27389–1987. Установки конденсаторные для компенсации реактивной мощности. Термины и определения. Общие технические требования. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-27389-87> (дата обращения: 24.06.2020).
7. ГОСТ Р 56744–2015 (МЭК 61921:2003) Конденсаторы силовые. Установки конденсаторные низковольтные для повышения коэффициента мощности. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200127200> (дата обращения: 24.06.2020).

A. E. Fokeev, CSc in engineering, associate professor

N. A. Vyatkin, magister student

E-mail: saxsix@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

Inactive Power and Methods of Its Compensation

The work is devoted to the definition of the concept of inactive power and methods of its compensation. The concept of inactive power has been fully analyzed, what it characterizes, what it consists of, how it is determined, how it is calculated, what effect it has on the operation of the receivers and the electrical network as a whole, and also considers the methods of its compensation and possible technical solutions of manufacturers of devices for compensating inactive power.

Keywords: inactive power, inactive power compensation, higher harmonics, non-linearity, UKNM.