

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

Энергетический факультет

РЕФЕРАТ

группа Э - 442

Комиссаров Александр Константинович

на тему: «Внедрение механизма оплаты за реактивную мощность для потребителей розничного рынка электроэнергии как мера повышения качества электроэнергии. Мировой опыт»

Научный руководитель: к.т.н., доцент Булатов Борис Георгиевич

Челябинск 2015 год

Аннотация

Комиссаров А.К. Внедрение механизма оплаты за реактивную мощность для потребителей розничного рынка электроэнергии как мера повышения качества электроэнергии. Мировой опыт. – Челябинск: ЮУрГУ, Э- 442, 2015, 36 с., 5 ил., 2 таблицы. Библиографический список – 12 наименований.

Внедрение механизма оплаты за реактивную мощность для потребителей розничного рынка электроэнергии как мера повышения качества электроэнергии. Мировой опыт. В реферате дано понятие реактивной мощности, раскрыта сущность ее с физической точки зрения. Перечислены показатели качества электроэнергии. Рассмотрено влияние реактивной мощности на режим энергосистемы и качество электроэнергии. На примере звена передачи дана количественная оценка влияния компенсации реактивной мощности на показатели режима. Большое внимание в работе уделено механизму оплаты за реактивную мощность. Отражена история его существования, совершенствования и отмены с опорой на нормативно-правовые документы. Оценена современная система взимания платы за реактивную мощность и предложена прогрессивная шкала скидок и надбавок на основе принципа Фибоначчи. В реферате осуществлен обзор данной проблемы на примере передовых европейских стран. На основе изложенного материала сформулированы выводы о необходимости ввода и детальной проработки механизма оплаты за реактивную мощность с целью повышения качества электроэнергии.

Оглавление

«Внедрение механизма оплаты за реактивную мощность для потребителей розничного рынка электроэнергии как мера повышения качества электроэнергии. Мировой опыт»

Введение	4
1. Общее понятие реактивной мощности и ее сущность в энергетике	
1.1 Физическое обоснование существования реактивной мощности.....	5
1.2 Анализ эффекта компенсации реактивной мощности.....	12
2. Качество электроэнергии	
2.1 Основные показатели качества электроэнергии.....	15
2.2 Последствия отклонения напряжения от нормируемых значений.....	16
3. Регулирование напряжения изменением перетоков реактивной мощности	
3.1 Основные принципы регулирования напряжения с помощью реактивной мощности	18
3.2 Компенсирующие устройства.....	19
4. Механизм оплаты за реактивную энергию	
4.1 Недостатки и пути совершенствования формы оплаты за потребление и генерацию реактивной мощности.....	21
4.2 Прогрессивная шкала штрафного коэффициента	28
5. Мировой опыт платы реактивной мощности	32
Заключение	34
Библиографический список	35

Введение

Одной из главных задач современной энергосистемы является снабжение качественной электроэнергией потребителей. Показатели качества ее нормируются стандартом (ГОСТ), определяющим изменения напряжения в узлах и частоты в системе. Актуальной проблемой в энергетической отрасли в настоящее время является баланс активной и реактивной мощности. Небаланс активной мощности ведет к нарушению нормальной синхронной работы. С избытком или дефицитом реактивной мощности в энергосистеме связано много негативных последствий, которые могут приводить к существенному снижению качества электроэнергии. С целью вовлечения в участие потребителей и обеспечения качественного электроснабжения, энергоснабжающие организации должны применять определенный механизм оплаты за потребляемую реактивную мощность. Это является необходимой мерой по созданию заинтересованности в обеспечении качества электроэнергии не только производителей энергии, но и ее потребителей. Таким образом, в данной работе ставим задачу разобраться с таким понятием как реактивная мощность, ее влиянием на режим энергосистемы и оценить правомерность и обоснованность механизма платы за реактивную мощность, а также рассмотреть примеры решения данной проблемы в некоторых передовых зарубежных странах с целью оценки опыта взимания платы за реактивную мощность.

1. Общее понятие реактивной мощности и ее сущность в энергетике

1.1 Физическое обоснование существования реактивной мощности

В настоящее время взаимоотношения энергоснабжающих организаций и потребителей электроэнергии рассматриваются широким кругом лиц, не имеющих энергетического образования (коммерческие менеджеры, юристы и другие специалисты). Использование понятия реактивная мощность (реактивная энергия) в практике денежных расчетов между поставщиками и потребителями электроэнергии и наличие отдельных счетчиков активной и реактивной энергии создает у многих представление о поставке потребителям двух видов продукции. Однако это не так. По электрической сети не передаются «разные» электроны — одни активной энергии, а другие реактивной. Таким образом, для начала стоит разобраться, что же такое реактивная мощность (реактивная энергия), откуда она появляется и как влияет на качество электроэнергии?

Чтобы разобраться с понятием реактивной мощности, вспомним сначала, что такое электрическая мощность. Электрическая мощность — это физическая величина, характеризующая объем генерации, передачи или потребления электрической энергии в единицу времени. Чем больше мощность, тем большую работу может совершить электроустановка в единицу времени. Измеряется мощность в ваттах (произведение Вольт x Ампер). Мгновенная мощность — это произведение мгновенных значений напряжения и силы тока на каком-то участке электрической цепи.

В цепях постоянного тока значение мгновенной и средней мощности за какой-то промежуток времени совпадают, а понятие реактивной мощности отсутствует. В цепях переменного тока так происходит только в том случае, если нагрузка чисто активная. Это, например, электронагреватель или лампа накаливания. При такой нагрузке в цепи переменного тока фаза напряжения и фаза тока совпадают, и вся мощность передается в нагрузку. Если нагрузка индуктивная (трансформаторы, электродвигатели), то ток отстает по фазе от

напряжения, если нагрузка емкостная (различные устройства с конденсаторами), то ток по фазе опережает напряжение (рис.1). Поскольку ток и напряжение не совпадают по фазе (реактивная нагрузка) (рис.2), то в нагрузку (потребителю) передается только часть мощности (полной мощности), которая могла бы быть передана в нагрузку, если бы сдвиг фаз был равен нулю (активная нагрузка).

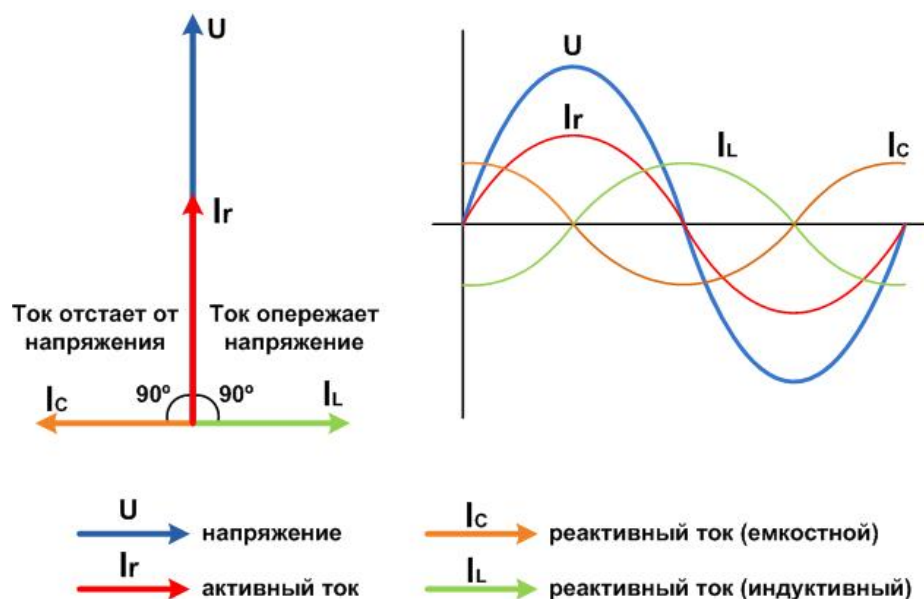


Рисунок 1. Диаграмма напряжения и различных составляющих тока.

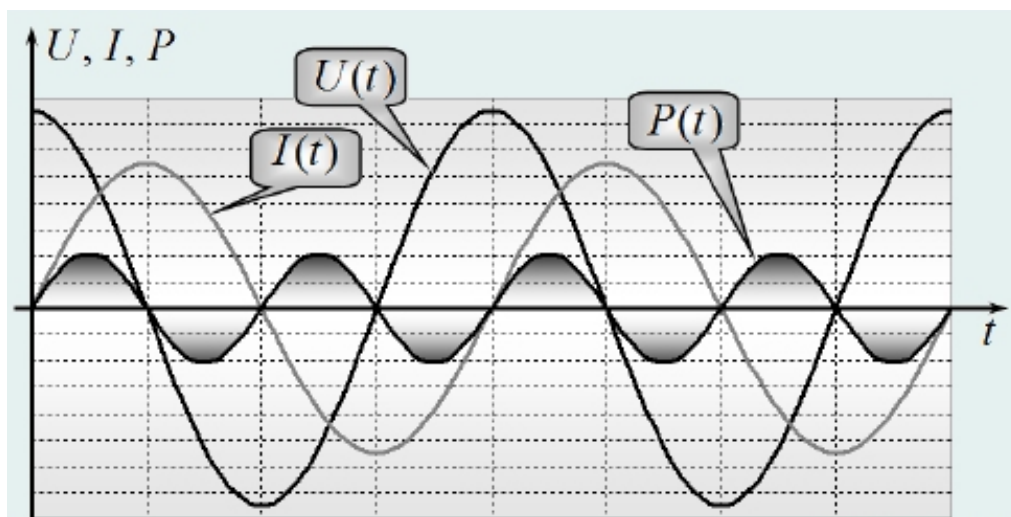


Рисунок 2. Диаграмма напряжения, тока и активной мощности для индуктивной нагрузки.

Часть полной мощности, которую удалось передать в нагрузку за период переменного тока, называется активной мощностью. Она равна произведению действующих значений тока и напряжения на косинус угла

сдвига фаз между ними ($\cos\varphi$). Мощность, значение которой за период равно нулю, хотя она и протекала по сети, меняя направление на разных отрезках периода, создавая потери на нагрев и излучение, называется реактивной мощностью. Она равна произведению действующих значений тока и напряжения на синус угла сдвига фаз между ними ($\sin\varphi$). Графически данная информация представляется в виде так называемого треугольника мощностей (рис.3).

$$S = U \cdot I$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

Таким образом, реактивная мощность является величиной, также характеризующей нагрузку, но она измеряется в вольт амперах реактивных (вар, var) [1]. На практике чаще встречается понятие $\cos\varphi$, как величины характеризующей качество электроустановки с точки зрения экономии электроэнергии. Действительно, чем выше $\cos\varphi$, тем больше энергии, подаваемой от источника, попадает в нагрузку. Значит можно использовать менее мощный источник и меньше терять энергии при передаче.

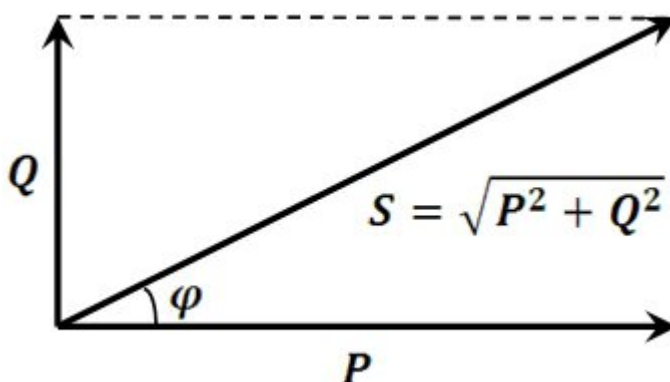


Рисунок 3. Треугольник мощностей

Понятие реактивная мощность вводится только для цепей переменного тока, потому что именно в них существует много элементов, которые разделены воздушными промежутками — обмотки высокого и низкого напряжения трансформаторов или статор и ротор вращающейся машины

(двигателя и генератора) не имеют электрической связи между собой. Тем не менее, электрическая энергия передается через это воздушное пространство, являющееся фактически непроводящим ток диэлектриком. Это происходит в связи с возникновением под действием переменного тока переменного магнитного поля в индуктивности, а под действием переменного напряжения — переменного электрического поля в емкости (в комбинации — электромагнитного поля). Полям, как известно, воздух не преграда. Переменное магнитное поле, образуемое одной из разделенных обмоток, постоянно пересекает своими магнитными линиями витки другой обмотки, наводя в ней электродвижущую силу. Ее величина такова, что вся мощность первичной обмотки переходит на вторичную обмотку. В конденсаторе те же самые функции осуществляет электрическое поле.

Для переброски через воздушные промежутки большой мощности в устройстве приемлемого размера нужно сильное магнитное поле, сконцентрированное в небольшом пространстве. Это достигается обматыванием вокруг металлического сердечника (ярма) многочисленных витков, расположенных близко друг к другу, и применением для изготовления сердечников специальной стали, обеспечивающей большую взаимоиндукцию.

Электромагнитная энергия непосредственно преобразуется в тепловую, механическую, химическую и другие виды полезной работы в элементах, обладающих активным сопротивлением, обозначаемым R . В элементах, представляющих собой индуктивность L и емкость C , электромагнитная энергия на половине периода запасается, а на второй половине периода возвращается в источник. При этом синусоида тока, создающего магнитное поле, всегда на четверть периода (90 эл. градусов) отстает от синусоиды напряжения, а синусоида тока, создающего электрическое поле, опережает. Сопротивления таких элементов связаны с индуктивностью и емкостью и частотой f соотношениями: $X_L = 2\pi fL$ и $X_C = 1/(2\pi fC)$. Из этих соотношений видно, что эти сопротивления существуют только в цепях переменного тока,

а в цепях постоянного тока ($f = 0$) X_L превращается в 0 (короткое замыкание), а X_C — в бесконечность (разрыв цепи). В связи с возвратным характером их действия эти сопротивления называют реактивными, а ток, обусловленный обменной электромагнитной энергией, — реактивным током. Так как реактивный ток сдвинут относительно активного на 90° , то естественно, что полный ток определяется как корень квадратный из суммы квадратов активного и реактивного тока.

Наглядная аналогия приведена в [2]. Здесь прохождение через сеть «сдвинутого» тока сравнивается с продвижением людей через проход, пропускная способность которого составляет, например, 10 человек одновременно. При этом в восьми рядах люди все время идут в одном направлении, а в двух рядах одни и те же люди то идут, то возвращаются. В результате число людей, перешедших на другую сторону, следует считать исходя из пропускной способности восемь человек, а проход все время загружен десятью рядами. Аналогична ситуация и с пропускной способностью электрической сети. Разница лишь в том, что активная и реактивная составляющие тока складываются не арифметически, а в квадрате, поэтому реактивная составляющая в меньшей степени занимает сечение. Для полноты сравнения можно считать, что два ряда людей ходят боком и потому занимают меньше места.

Полупериоды запасаения и возврата электромагнитной энергии индуктивностью и емкостью сдвинуты на 180° (у первой ток сдвинут на -90° , а у второй на $+90^\circ$), то есть они находятся в противофазе. Поэтому при наличии рядом сопротивлений $X_L = X_C$ обменная часть электромагнитной энергии не возвращается в источник, а эти элементы постоянно обмениваются ею между собой. Уже должна возникнуть мысль, а не поставить ли у потребителя электроэнергии, в сетях которого полно индуктивностей, емкость? И пусть они обмениваются между собой этой частью электромагнитной энергии, разгрузив от нее сеть и предоставив ей возможность передавать только ту часть электромагнитной энергии, которая

преобразуется в полезную работу? Эта операция и называется компенсацией реактивной мощности (КРМ).

Реактивная энергия не выполняет никакой полезной работы в том смысле, что она не может, как активная энергия, превращаться в тепловую или механическую энергию. Так как в физике понятия энергии и работы тождественны, то, строго говоря, словосочетание «реактивная энергия» физически бессмысленно. Тем не менее, применение на практике этого условного понятия удобно. Раз уж возникает дополнительный ток, названный реактивным, то его произведение на напряжение вроде бы по-другому как мощностью не назовешь, а интегрирование мощности по времени формально называется энергией. Более того, сдвинув на 90° обмотку электрического счетчика, можно заставить его считать произведение на напряжение только тока, сдвинутого на 90° , — появляется наглядное подтверждение существования реактивной энергии.

Реактивный ток не только отнимает у активного тока часть пропускной способности сети, но и на его прохождение по проводам затрачивается определенная часть активной энергии, так как потери мощности:

$$\Delta P = 3I^2R,$$

где I — полный ток.

Счетчик активной энергии (по большому счету только ее и можно назвать энергией, поэтому он называется просто счетчик электроэнергии) покажет одно и то же значение и при наличии, и при отсутствии реактивной составляющей тока. Для оценки же режима сети необходимо знать обе составляющие. Активная и реактивная составляющие полного тока по-разному влияют на напряжение в точках потребления энергии.

Как известно, потери напряжения в звене передачи определяются по следующему выражению:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U}.$$

Потери напряжения от передачи активной составляющей тока в подавляющей степени определяются сопротивлением R , а реактивной — сопротивлением X_L . В элементах линий электропередачи обычно $X_L \gg R$, поэтому прохождение по сети реактивного тока приводит к гораздо большему снижению напряжения, чем активного тока той же величины. Снижение напряжения на шинах потребителей нарушает их нормальную работу.

Основные потребители реактивной мощности - асинхронные электродвигатели, которые потребляют 40 % всей мощности совместно с бытовыми и собственными нуждами; электрические печи 8 %; преобразователи 10 %; трансформаторы всех ступеней трансформации 35 %; линии электропередач 7 %.

В электрических машинах переменный магнитный поток связан с обмотками. Вследствие этого в обмотках при протекании переменного тока индуцируются реактивные э.д.с., обуславливающие сдвиг по фазе между напряжением и током. Этот сдвиг по фазе обычно увеличивается, а $\cos\varphi$ уменьшается при малой нагрузке. Например, если $\cos\varphi$ двигателей переменного тока при полной нагрузке составляет 0,75-0,80, то при малой нагрузке он уменьшится до 0,20-0,40.

Малонагруженные трансформаторы также имеют низкий коэффициент мощности ($\cos\varphi$). Поэтому, если не применять компенсацию реактивной мощности, то результирующий $\cos\varphi$ энергетической системы будет низок, и полный ток нагрузки будет увеличиваться при одной и той же потребляемой из сети активной мощности. Соответственно при компенсации реактивной мощности (применении автоматических конденсаторных установок КРМ) ток, потребляемый из сети, снижается в зависимости от $\cos\varphi$ на 30-50%, соответственно уменьшаются отклонение напряжения, нагрев проводов и старение изоляции.

1.2 Анализ эффекта компенсации реактивной мощности

Оценим эффект от полной компенсации реактивной мощности для разных значений $\cos\varphi$ потребителя, начиная с $\cos\varphi=0,5$ и до 1. Изменение всех параметров режима будем определять в относительных единицах, приняв за базис активную мощность (P). Пример расчета параметров при $\cos\varphi=0,5$ и $P=1$:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = 2; I=2; Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 1,73; \Delta P = I^2 = 4; \Delta U = Q = 1,73;$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P} = 1,73. \text{ Аналогичные вычисления осуществляем для значений } \cos\varphi \text{ в}$$

заданном пределе, соотносим полученные значения в таблицу 1 и по этим значениям строим графическую модель(рис.4).

Таблица 1 - Расчетные значения параметров сети при изменении $\cos\varphi$

$\cos\varphi$	S	I	Q	ΔP	ΔU	$\operatorname{tg}\varphi$
0,5	2	2	1,73	4	1,73	1,73
0,6	1,67	1,67	1,33	2,79	1,33	1,33
0,7	1,43	1,43	1,02	2,04	1,02	1,02
0,8	1,25	1,25	0,75	1,56	0,75	0,75
0,9	1,11	1,11	0,48	1,23	0,48	0,48
1,0	1,0	1,0	0	1,0	0	0

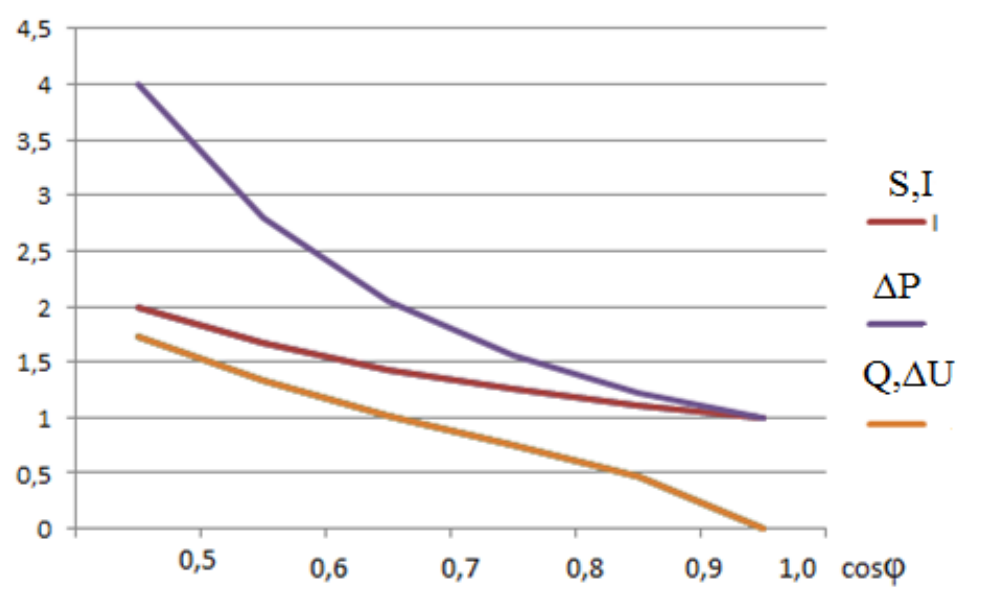


Рисунок 4. Зависимости параметров сети от $\cos\varphi$

Проанализировав результаты расчетов, можно сделать вывод о том, что если при постоянной активной мощности $\cos\varphi$ будет стремиться к 1, то исследуемые параметры снизятся до минимума. В том числе следует отметить, что при избытке реактивной мощности у потребителя (явление не частое) сеть так же перегружается, но потеря мощности приводит уже к повышению напряжения на шинах у потребителя, а это может привести к пробое изоляции и ущербу от ухудшения качества электроэнергии.

Кроме этого, реактивная мощность наряду с активной мощностью учитывается поставщиком электроэнергии, а, следовательно, подлежит оплате по условиям договора на электроснабжение.

Итак, разобравшись с понятием и процессом образования реактивной мощности, можно отметить, что она необходима для работы многих потребителей, но чрезмерное ее потребление ухудшают следующие показатели работы энергосистемы:

- увеличивается токовая нагрузка на электрические сети;
- снижается качество электроэнергии;
- возрастают потери электроэнергии в сети;
- увеличивается расход топлива на электростанциях;
- снижается пропускная способность электрических сетей;
- увеличивается стрела провеса проводов;
- понижается надежность энергосистемы.

Радикальным средством снижения негативных последствий является компенсация реактивной мощности, путем установки источников этой самой реактивной мощности у потребителей. Однако устройства компенсации требуют значительных разовых капитальных вложений. Сегодня в условиях дефицита средств и экономического спада в стране предприятия неохотно идут на это.

Таким образом, с целью снижения ущерба от выше перечисленных факторов и повышения качества электроэнергии должен быть определен

механизм оплаты за реактивную мощность, который обеспечивал бы заинтересованность потребителя в выгодном вложении средств в компенсацию. Для этого система оплаты должна обеспечивать прозрачность доходов снабжающих организаций, справедливую оценку ставок и объективность тарифов, и нести стимулирующий характер для потребителей.

2. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

2.1 Основные показатели качества электроэнергии

Согласно ГОСТ 32144 – 2013 «Электрическая энергия», который устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии (КЭ) в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц. Согласно данному стандарту, основными показателями, характеризующими качество электроэнергии, можно считать: отклонения частоты и напряжения [3].

Отклонение напряжения является одним из основных показателей качества электроэнергии. К числу других показателей, определяемых ГОСТ и зависящих от потребления реактивной мощности, являются:

- размах изменения (колебания) напряжения, $\delta U(\%)$;
- доза фликера (кратковременная – P_{st} , длительная – P_{lt}), (о.е.);
- длительность провала напряжения $\Delta t, (с)$;
- импульсное напряжение $U_{имп}$ (кВ);
- Коэффициент временного перенапряжения $K_{пер.нап.}$.

Основными особенностями электроэнергетических систем и систем электроснабжения являются: практическая невозможность накопления электроэнергии, мощности современных аккумуляторных батарей неизмеримо меньше мощностей генерирующих источников и практически мгновенная передача электроэнергии потребителям от генерирующих источников в связи с высокой скоростью распространения электромагнитных волн.

Указанные особенности определяют одновременность процессов производства и потребления электроэнергии и равенство величин вырабатываемой и потребляемой электроэнергии в каждый момент времени. В каждый момент установившегося режима в электроэнергетической системе существуют балансы по активной и реактивной мощности. Изменение

режима по реактивной мощности сказывается, главным образом, на изменении уровней напряжений в энергосистеме и слабо влияет на изменение частоты, причем снижение мощности генерирующих источников реактивной энергии ведет к понижению напряжения на шинах генератора и в системе в целом, а увеличение ее генерации – к возрастанию напряжения. Установившееся отклонение напряжения – это отклонение напряжения от его номинального значения в установившемся режиме работы электрических сетей, усредненное за расчетный интервал.

2.2 Последствия отклонения напряжения от нормируемых значений

Нормально и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электроэнергии составляют, согласно ГОСТ 32144 – 2013, соответственно 5 и 10 % от номинального напряжения электрической сети. Отличные от нормируемых нормально и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения в точках присоединения потребителей к сети напряжением 0,38 кВ и выше должны быть установлены в договорах между энергоснабжающими организациями и потребителями электроэнергии.

При отклонении напряжения от номинального значения потребители электроэнергии работают в худших условиях, что проявляется в ущербах от некачественного напряжения.

При повышении напряжения:

- возникает опасность перегрева статоров асинхронных двигателей;
- уменьшается срок службы ламп накаливания (в 5 раз при увеличении напряжения на 10 %);
- увеличивается ток холостого хода трансформаторов, что приводит к перегреву сердечников трансформаторов;
- увеличивается потребление реактивной мощности вентильными преобразователями (на 1...1,5 % при повышении напряжения на 1 %).

При снижении напряжения:

- уменьшаются вращающие моменты асинхронных двигателей (на 19 % при снижении напряжения на 10 %);
- возможен перегрев роторов асинхронных двигателей, уменьшение их пусковых и опрокидывающих моментов, что может повлечь за собой нарушение технологического процесса электроприемников;
- уменьшается световой поток ламп накаливания (на 30 % при снижении напряжения на 10 %);
- ухудшается технологический процесс электропечей (в 1,5 раза при снижении напряжения на 7 %).

Кроме того, следует учитывать, что с повышением стабильности напряжения снижаются как электромагнитный, так и технологический ущерб. В то же время, существуют потребители, у которых оптимальные границы отклонений напряжения могут не совпадать с нормируемыми ГОСТ, и в этом случае мероприятия по ограничению отклонений напряжения регламентируются договорами между энергоснабжающими организациями и потребителями и требуют дополнительных капиталовложений [3].

Баланс реактивной мощности по системе определяет средний уровень напряжений в электроэнергетической системе. Однако показатель напряжения в целом по энергосистеме не гарантирует требуемых уровней напряжений во всех узлах сети. Следовательно, баланс реактивной мощности следует проверять не только по системе в целом, но и по отдельным ее районам и использовать кроме централизованного регулирования напряжения еще и местное.

3. Регулирование напряжения изменением перетоков реактивной мощности

3.1 Основные принципы регулирования напряжения с помощью реактивной мощности

Основным способом регулирования напряжения является изменение коэффициента трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов без отключения нагрузки (РПН) или с ее отключением (ПБВ). Другим способом регулирования напряжений в электрической сети является изменение величины падения или потери напряжения на элементах электрической сети при помощи изменения перетоков реактивной мощности. Принципы такого регулирования показаны для участка сети, приведенного на рис.5. Здесь узел 1 является питающим узлом, в котором задан вектор напряжения \dot{U}_1 .

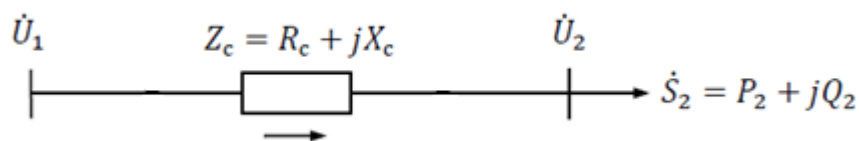


Рисунок 5. Схема звена передачи

Напряжение на шинах потребителя U_2 зависит от уровня напряжения в питающем узле U_1 и вектора падения напряжения в сети ΔU_{12} (см. рис.5). Модуль напряжения в узле 2 определяется по соотношению:

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{12})^2 + \delta U_{12}^2}$$

и в основном зависит от продольной составляющей падения напряжения ΔU_{12} ,

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12}'' \cdot R + Q_{12}'' \cdot X}{U_1},$$

где P_{12} , Q_{12} – потоки мощности в начале передачи; R , X — активное и реактивное сопротивления сети [4].

Поперечная составляющая δU_{12} для распределительных сетей практически не влияет на падение напряжения. При неизменных параметрах сети R_c и X_c величина продольной составляющей падения напряжения зависит от перетоков активной и реактивной мощности. Перетоки активной мощности определяются требованиями нагрузок и не могут использоваться для регулирования напряжения. Изменение перетоков реактивной мощности может быть достигнуто использованием компенсирующих устройств. Кроме того, в питающих сетях активные сопротивления меньше реактивных, следовательно, для изменения ΔU более эффективно изменение реактивной мощности.

Изменение перетоков реактивной мощности в сетях может быть достигнуто изменением выдачи реактивной мощности синхронных генераторов на электростанциях. Однако такой принцип изменения реактивных перетоков часто не эффективен, так как приводит к загрузке сети реактивной мощностью и, как следствие, к увеличению потерь в сети. Поэтому для изменения перетоков реактивной мощности с целью регулирования напряжения и обеспечения в электрических сетях используются компенсирующие устройства.

3.2 Компенсирующие устройства

Компенсирующие устройства предназначены для выработки или потребления реактивной мощности. Для выработки реактивной мощности используются: батареи статических конденсаторов; статические тиристорные компенсаторы; синхронные компенсаторы в перевозбужденном режиме. Для потребления реактивной мощности служат шунтирующие реакторы (ШР) и синхронные компенсаторы в недовозбужденном режиме. Проведем краткий экскурс по компенсирующим устройствам. Так, синхронный компенсатор (СК) – синхронная явно полюсная машина, работающая в режиме холостого хода и предназначенная для генерации или потребления реактивной мощности. СК потребляет из сети небольшую активную мощность,

обусловленную собственными потерями. Положительными свойствами СК как источников реактивной мощности являются: а) возможность увеличения генерируемой мощности при понижении напряжения в сети вследствие регулирования тока возбуждения; б) возможность плавного и автоматического регулирования генерируемой реактивной мощности.

Батареи статических конденсаторов (БСК) применяются для генерации реактивной мощности в узлах сети и включаются на шинах понижающих подстанций (шунтовые батареи). БСК собираются из отдельных конденсаторов, соединенных последовательно и параллельно. Последовательное соединение конденсаторов позволяет увеличить рабочее напряжение БСК, а параллельное – мощность БСК. Конденсаторы выпускаются в однофазном и трехфазном исполнении на номинальные напряжения от 0,22 до 10,5 кВ. Единичная мощность конденсаторов составляет от 10 до 125 квар. Шунтовые конденсаторные батареи применяются на напряжениях до 110 кВ включительно. Батареи конденсаторов бывают регулируемые (управляемые) и нерегулируемые. В нерегулируемых, число конденсаторов неизменно, а величина реактивной мощности зависит только от квадрата напряжения. Суммарная мощность нерегулируемых батарей конденсаторов не должна превышать наименьшей реактивной нагрузки сети. В регулируемых батареях конденсаторов в зависимости от режима автоматически или вручную изменяется число включенных конденсаторов.

Статические тиристорные компенсаторы (СТК) предназначены для плавной (регулируемой) генерации или потребления реактивной мощности, что достигается использованием в СТК нерегулируемой батареи конденсаторов и включенного последовательно или параллельно с ней регулируемого реактора. Плавность регулирования реактивной мощности СТК достигается с помощью тиристорного блока, входящего в устройство управления. Схемы СТК весьма разнообразны и позволяют вырабатывать или потреблять реактивную мощность в зависимости от режима и вида схемы [4].

4. Механизм оплаты за реактивную мощность

4.1 Недостатки и пути совершенствования формы оплаты за потребление и генерацию реактивной мощности

Рассмотрим возможные принципы формирования механизма оплаты за реактивную мощность. Стоит отметить, что на данный момент какого-то четкого, отлаженного и прописанного документально (законодательно) механизма оплаты за реактивную мощность нет. В 1991 году Главгосэнергонадзором РФ были введены в действие новые «Правила применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии» [5]. Эти Правила включали в себя теоретические и методические наработки в области компенсации реактивной мощности и представляли собой эффективный механизм управления режимом реактивной мощности. Отмена Правил в 2001 году произошла по юридическим мотивам и не может быть воспринята как отказ от управления режимами распределения реактивной мощности. Отмененный механизм скидок и надбавок к тарифам представлял собой эффективный механизм рыночного управления компенсации реактивной мощности, но не соответствовал действующему законодательству. Главной причиной несоответствия является двукратная оплата потребителем потерь электроэнергии, обусловленных передачей реактивной мощности. Первый раз – в тарифе, второй – в виде надбавки.

Сейчас энергоснабжающие организации предмет оплаты реактивной мощности оговаривают в отдельных договорах индивидуально с каждым потребителем.

Рассмотрим механизм оплаты реактивной мощности 1991 года с его доработками в процессе применения. В недалеком прошлом Правилами пользования электроэнергией 1982 года предусматривались экономические рычаги воздействия энергоснабжающей организации на потребителя электроэнергии посредством предоставления скидок и надбавок к тарифу за

отклонение от нормативного коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,92$. Однако эта система не являлась совершенной и не стимулировала потребителя в полной мере соблюдать необходимые условия потребления реактивной мощности и энергии по следующим основным причинам:

- 1) в расчет принималось средневзвешенное значение $\cos\varphi$, рассчитанное из отношения потребленной реактивной энергии и активной, что стимулировало потребителя снижать потребление реактивной энергии не только в часы больших, но и в часы малых нагрузок, в том числе в ночные часы;
- 2) при средневзвешенном $\cos\varphi = 0,92$ мощность компенсирующих устройств может быть недостаточна для компенсации реактивной мощности в часы максимума до необходимого экономического значения;
- 3) система экономического воздействия требовала дополнения административными рычагами, вынуждала энергоснабжающую организацию устанавливать графики включения компенсирующих устройств у потребителей и вести контроль за их соблюдением.

Начиная с 1991 года, система привлечения потребителей электроэнергии к участию в регулировании реактивной мощности претерпела существенные изменения, ориентированные на экономическую заинтересованность потребителей в полном выполнении необходимых условий потребления реактивной мощности и энергии. С 1 января 1991 года Прейскурантом «Тарифы на электрическую и тепловую энергию» была введена новая система оплаты за потребляемую и генерируемую потребителем реактивную энергию для всех потребителей электрической энергии со среднемесячным потреблением более 30 тыс. кВт·ч., кроме населения. Такими потребителями могут быть потребители 1-й и 2-й тарифной группы, перепродавцы электрической энергии. В соответствии с преЙскурантом оплате подлежат:

1. Потребляемая за расчетный период реактивная энергия в часы больших нагрузок электрической сети.

2. Потребляемая за расчетный период реактивная энергия в часы малых нагрузок электрической сети.

3. Генерируемая в сеть энергосистемы за расчетный период реактивная энергия.

Оплата для перечисленных потребителей выражена в виде двухставочных и одноставочных тарифов, аналогичных тарифам на активную энергию. Двухставочный тариф на потребляемую в часы больших нагрузок электрической сети реактивную энергию установлен для промышленных и приравненных к ним потребителей 1-й тарифной группы с присоединенной мощностью 750 кВ·А и выше. Эти потребители рассчитываются за активную электроэнергию так же по двухставочному тарифу. Для остальных потребителей за потребление реактивной энергии в часы больших нагрузок предусмотрен одноставочный тариф.

За потребление реактивной энергии в часы малых нагрузок и за реактивную энергию, генерируемую в сеть энергосистемы, Прейскурантом установлены одноставочные тарифы для всех потребителей, в том числе 1-й тарифной группы. Эти тарифы являются одинаковыми для потребителей как 1-й, так и 2-й группы. Все тарифы выражены в Прейскуранте и обоснованы. Впоследствии экономического кризиса тарифы на активную электроэнергию стали устанавливаться Региональными энергетическими комиссиями на основании государственной нормативно-правовой базы. Вместе с изменениями тарифов на активную энергию требовалось обоснование и изменение тарифов и на реактивную энергию. Это связано с дополнительными трудностями для региональных энергетических комиссий. Потребовался единый для всех регионов простой механизм определения тарифов за реактивную энергию. В этой связи с 1994 года «Инструкция о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию» определяет значения тарифов на реактивную энергию, связанными с утверждаемыми тарифами на активную электроэнергию процентными соотношениями.

Тариф на потребляемую реактивную энергию (мощность) в часы больших нагрузок сети составляет 8 % для всех потребителей, кроме перепродавцов. Для перепродавцов этот тариф составляет 6 % от тарифа на активную энергию. Тариф на потребляемую реактивную энергию в часы малых нагрузок составляет минус 2 % (отрицательный тариф) для всех потребителей. Тариф за генерацию реактивной энергии в сеть энергосистемы для всех потребителей составляет 12 % от тарифа на активную энергию. В соответствии с нормативными документами тарифы за потребляемую в часы больших нагрузок реактивную энергию и мощность для потребителей 1-й группы действуют только на величину превышения так называемых экономических значений реактивной энергии и мощности. Для потребителей 2-й группы тариф за потребление в эти часы действует только на величину превышения экономического значения реактивной энергии [6;7].

Экономические значения реактивной мощности и реактивной энергии рассчитываются и устанавливаются для каждого потребителя индивидуально энергоснабжающей организацией на основе правил применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии и оговариваются в «Договоре энергоснабжения». Потребление ниже экономических значений потребителем не оплачивается. Генерируемая потребителем реактивная энергия оплачивается потребителем в полном объеме. Потребляемую же в часы малых нагрузок электрической сети реактивную энергию энергоснабжающая организация оплачивает потребителю. Следует отметить, что экономические значения определяют только условия оплаты за их потребление. Они не являются требованием. Оплату за превышение экономических значений нельзя назвать штрафной санкцией. Потребитель сам вправе определять режимы потребления реактивной энергии, ориентируясь на установленные условия ее оплаты. Требования предъявляются лишь применительно к потреблению и генерации предельно допустимых по техническим условиям значений реактивной энергии и мощности (как правило, в 2-3 раза выше экономических значений).

Введенные тарифы на реактивную электроэнергию и правила их применения стимулируют потребителей участвовать в регулировании распределения реактивной мощности. Потребитель заинтересован в снижении потребления реактивной мощности и энергии ниже экономических значений в часы больших нагрузок и в увеличении потребления в часы малых нагрузок электрической сети за счет использования компенсирующих устройств. При этом если потребитель не допустил генерацию энергии в сеть, он не только полностью освобождает себя от оплаты за реактивную энергию, но и получает плату от энергоснабжающей организации за потребление реактивной энергии в часы малых нагрузок энергосистемы.

Для того чтобы описанный механизм оплаты действовал для конкретного потребителя в полном объеме, энергоснабжающая организация должна в соответствии с правилами объявить этого потребителя как участвующего в суточном регулировании режимов своей сети в часы малых нагрузок и установить ему в «Договоре энергоснабжения» часы больших и малых нагрузок. Часы больших нагрузок электрической сети – это периоды суток, в которые потребление реактивной мощности приводит к дополнительным потерям электроэнергии в сети энергоснабжающей организации, а часы малых нагрузок – это периоды суток, в которые генерация реактивной мощности в сеть приводит к дополнительным потерям. В эти часы, как правило, вследствие генерации недопустимо возрастает напряжение на оборудовании энергосистемы, что увеличивает риск выхода его из строя. Сумма периодов больших и малых нагрузок должна быть равна 24 часам. Устанавливать часы больших и малых нагрузок – это право энергоснабжающей организации. Устанавливая часы больших и малых нагрузок потребителям, энергоснабжающая организация имеет возможность поддерживать в узловых точках сети необходимый уровень напряжения. Однако в частных случаях, связанных со снижением электропотребления из-за снижения уровня производства и появлением избытка емкостной нагрузки, в узловых точках сети возможно повышение напряжения до недопустимо

высоких значений. Для нормализации положения энергоснабжающая организация имеет право устанавливать потребителям периоды специальных режимов компенсирующих устройств. В эти периоды, как правило, не менее месяца, потребитель должен отключить все или часть компенсирующих устройств. В таком случае уже не потребитель, а энергоснабжающая организация оплачивает потребителю потребление, превышающее экономические значения в часы больших нагрузок.

Чтобы реализовать такую форму оплаты, должна быть система учета, регистрирующая все необходимые параметры потребления реактивной мощности на границе раздела балансовой принадлежности сети. Это может быть система, состоящая из обычных счетчиков, объединенных в автоматизированную систему учета и контроля электроэнергии (АСКУЭ), микропроцессорных счетчиков, например, серии «Альфа» и т. п. При отсутствии приборов учета максимальная потребляемая реактивная мощность Q_{ϕ} , потребляемая реактивная энергия W_{Π} за время расчетного периода $T_{расч}$ определяются расчетным способом[6]. Например, для потребителей 1-й группы:

$$Q_{\phi} = 0,8P_{макс},$$

$$W_{\Pi} = 0,8W .$$

При отсутствии учета генерации реактивной мощности ее значение W_{Π} для всех потребителей определяют по формуле:

$$W_{\Pi} = [(Q_{к} + 0,5P_{сд}) \cdot T_{расч} - 0,6W] \cdot (1 - k_3)$$

В этих формулах: W – потребляемая активная энергия за время расчетного периода $T_{расч}$ (число часов в расчетном периоде, как правило, в месяце); $P_{макс}$ – максимум активной мощности, участвующий в максимуме нагрузке энергосистемы в течение расчетного периода, при отсутствии учета – заявленный максимум; $Q_{к}$ – установленная мощность конденсаторных установок; $P_{сд}$ – установленная активная мощность синхронных двигателей; k_3 – коэффициент заполнения графика нагрузки (при отсутствии данных

$k_3 = 0,25; 0,5; 0,75; 0,9$ для односменной, двухсменной, трехсменной работы и непрерывных производств соответственно).

По Правилам, если значение, вычисленное по последней формуле меньше нуля, оно принимается равным 0. Все рассчитанные в соответствии с правилами значения, способы учета реактивной мощности и энергии (включая способы расчета значений потребления и генерации, применяемые при отсутствии учета), а также другие требования в части режимов потребления реактивной мощности и энергии, установленные в Правилах пользования электрической и тепловой энергией, должны быть включены в «Договор энергоснабжения». Анализ показывает, что новые Правила предусматривают сильные экономические рычаги привлечения потребителей к участию в РРМ. При отсутствии необходимых приборов учета потребитель платит больше, чем при их наличии. Это вынуждает потребителя финансировать их установку, а впоследствии при наличии приборов поддерживать необходимый энергосистеме $\text{tg}\varphi$, чтобы свести оплату за реактивную энергию до минимального значения. Правила не предусматривают административно силового воздействия[6;8].

Процесс привлечения потребителей к регулированию распределения реактивной мощности (РРМ) и внедрения Правил был рассчитан на проявление инициативы заинтересованными организациями при четком разграничении их функций. Энергоснабжающая организация представляет интересы энергосистемы и определена Правилами как организатор процесса привлечения потребителей к регулированию РРМ. Для этого она должна использовать предоставленные ей экономические рычаги воздействия на потребителя и предъявлять счета за электроэнергию с учетом скидок и надбавок к тарифам в полном соответствии с новыми Правилами. Потребитель, при наличии должной системы учета на границе балансовой принадлежности сети будет участвовать в режиме РРМ. При отсутствии же учета будет оплачивать параметры потребления реактивной мощности и энергии по расчетным формулам. В результате экономического давления

потребитель должен проявить инициативу для финансирования работ по установке приборов учета. Заинтересованные руководители организаций потребителей электроэнергии будут финансировать установку приборов учета, после чего эти потребители будут участвовать в регулировании РРМ.

Известно, что затраты энергосистемы на производство и передачу электроэнергии в значительной степени определяются режимом ее генерации и распределения реактивной мощности. Энергосистема не в состоянии снизить эти затраты без участия потребителей. Для их снижения она должна привлекать широкий круг лиц, потребляющих электроэнергию, к участию в регулировании реактивной мощности. Эти потребители должны выполнять следующие условия:

- в режиме больших нагрузок энергосистемы не потреблять реактивную мощность и энергию выше заданных экономических значений за счет использования компенсирующих устройств (снижаются потери в энергосистеме),
- в режиме малых нагрузок (как правило, ночные часы), наоборот, стремиться к потреблению реактивной мощности и энергии и не допускать ее генерации в сеть (активная нагрузка падает, создается избыток емкостной нагрузки, возможны перенапряжения, возникает необходимость установки устройств поглощения реактивной энергии).

Конечно, привлечь потребителей электроэнергии к регулированию распределения реактивной мощности довольно сложно. Этому мешает отсутствие гибких рычагов воздействия энергоснабжающей организации на потребителей из-за сложной иерархической системы управления потребителями электроэнергии и энергосистемой.

4.2 Прогрессивная шкала штрафного коэффициента

Повышение тарифа за потребление реактивной энергии является радикальной мерой, и может быть воспринято как давление естественной монополии на потребителя. Такое решение может не найти поддержки у государственных органов, занимающихся регулированием деятельности

естественных монополий и защитой прав потребителя. Целесообразно провести поиск альтернативных решений, исключающих желание потребителя снижать установленную мощность компенсирующих устройств [6].

С моей точки зрения механизм скидок и надбавок стоит доработать, чтобы он имел прогрессивный характер. Например, при потреблении реактивной мощности из сети во время максимальной нагрузки или генерация ее в сеть в режиме минимальных нагрузок не просто штрафовались, а санкции имели прогрессивную шкалу: чем серьезнее нарушение установленного $\text{tg}\varphi$, тем больше размер штрафа. Данное предложение можно представить в виде таблицы 2, справедливой при $\text{tg}\varphi=0,5$ для $U_{\text{ном}}=110\text{кВ}$, где коэффициент K нарастает по принципу Фибоначчи. Очевидно, что для потребителей, которые укладываются в норму $\text{tg}\varphi<0,5$ стоит рекомендовать систему бонусов и скидок.

Таблица 2 – Прогрессивная шкала штрафного коэффициента K

$\text{tg}\varphi$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
K	0	0	0	0	1	2	3	5	8

Система АСКУЭ ведет учет распределения потоков не только активной, но и реактивной энергии и может контролировать допустимые пороги потребления и генерации реактивной мощности для конкретного момента суток. При превышении величина штрафной санкции будет зависеть от того в какой момент времени и насколько потребитель загрузил электрическую сеть перетоком реактивной мощности, тем самым уменьшив пропускную способность сети. При этом растут потери электроэнергии, отклонения напряжения, и повышается риск аварийных ситуаций, соответственно возрастает и угроза выхода из строя дорогостоящего энергетического оборудования, либо его преждевременный износ. В случае, когда потребитель участвует в оптимальном суточном регулировании

режима питающей сети по согласованию с диспетчером, то он получает скидку в соответствии с его долей в этом мероприятии.

Плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии определяется тремя составляющими величинами

$$П = П_1 + П_2 - П_3$$

где $П_1$ — основная плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии; $П_2$ — надбавка за недостаточное оснащение электрической сети потребителя средствами компенсации реактивной мощности, что проявляется в превышении допустимого $\text{tg}\varphi$; $П_3$ — скидка платы за потребление и генерацию реактивной электроэнергии в случае участия потребителя в оптимальном суточном регулировании режимов сети энергоснабжающей организации в расчетный период в соответствии с договором на оказание услуг.

Подводя итоги анализа механизма тарифного управления режимом реактивной мощности, можно сказать, что механизм применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии не должен применяться обособленно от методики расчета тарифов и предполагать получение дополнительных доходов, которые уже учтены в тарифе. По этой причине скидки и надбавки к тарифам были отменены в 2001 году.

Главным фактором, обеспечивающим правомерность применения скидок и надбавок, является новый комплексный подход к расчету их размеров и расчету тарифов на потребительском рынке. Такой подход обеспечивает прозрачность доходов энергоснабжающих организаций и экономическую обоснованность тарифов в соответствии с Федеральным законом «О государственном регулировании тарифов...»[9]. Такой подход не позволяет энергоснабжающей организации иметь неконтролируемые доходы. Однако сам факт правомерности применения скидок и надбавок к тарифам еще не дает оснований предполагать повышение эффективности режимов

электропотребления. Необходима еще их детальная проработка с учетом связей со всей структурой управления режимами электропотребления. Новая структура управления, предполагающая управление режимами электропотребления по законам рынка, сводит к минимуму прямое участие государства в этом процессе [8].

Скидки и надбавки к тарифам за потребление и генерацию реактивной энергии, и качество электрической энергии носят технологический характер и способствуют снижению тарифов на электроэнергию. Они не являются инструментом одностороннего применения энергоснабжающими организациями, а целиком находятся в руках потребителя.

5. Мировой опыт оплаты реактивной мощности

В мировой практике основные тенденции задают развитые страны Европейского союза, такие как Германия, Дания, Норвегия. На примере последней рассмотрим механизм регулирования экономической стороны вопроса о потреблении реактивной мощности, где оплата рассматривается как расчет за услуги по продаже реактивной мощности станциями. В практике функционирования рынков услуг и у специалистов пока нет единого подхода к алгоритмам определения услуг по регулированию напряжения и реактивной мощности в натуральных показателях (в электрических величинах, контролируемых с помощью приборов). В Норвегии, например, для регулирования напряжения диспетчер даёт указания поддерживать $\text{tg}\varphi$ в диапазоне $-0,2$ до $+0,4$. Такой режим оплачивается по предварительно согласованной цене, умноженной на располагаемую реактивную мощность и на длительность участия станции в регулировании. Однако в любом случае правила работы рынка услуг должны основываться на многокритериальном принципе их планирования и реализации с учетом индивидуальных интересов каждого субъекта розничного и оптового рынков. Если потребитель отклоняется от указаний диспетчера, то на него начинает действовать система санкций и штрафов, прописанная в договоре на электроснабжение предприятия [10].

На Украине в настоящее время действует «Методика начисления платы за перетоки реактивной мощности в сети между потребителем и энергоснабжающей организацией». Однако, данная методика не соответствует задекларированным целям и не стимулирует потребителей к уменьшению перетоков реактивной мощности, а наоборот способствует выводу из функционирования средств КУ и ликвидации приборов ее учета, что ставит под сомнение целесообразность ее использования. Это обусловлено тем, что в механизме расчета платы за перетоки реактивной мощности действует штрафной коэффициент (K), призванный учесть

возможный ущерб энергопоставщику в период ночных провалов графика нагрузки от генерации потребителем реактивной энергии, произвольно принят равным 3. В итоге плата только за генерируемую реактивную энергию для потребителя составляет 40-45% общей стоимости. Так же в тарифе на реактивную мощность Украины действует надбавка за недостаточное оснащение электрической сети потребителя средствами компенсации реактивной мощности. Таким образом, данный коэффициент принимает только установленное энергоснабжающей организацией значение и не имеет прогрессивной шкалы, для большинства потребителей просто не выгодно участвовать в оптимальном режиме энергосистемы. Проще заплатить по штрафной ставке – это будет дешевле [11]. Иными словами, недостатком системы оплаты за реактивную мощность на Украине это то, что нельзя априори вводить для всех без исключения потребителей огромный штраф за возможный ущерб. Необходимо не допускать перекомпенсации на границе балансовой принадлежности и это может быть оговорено в договоре. Лишь при нарушении договорных условий к потребителю могут быть применены штрафные санкции.

Рассмотрев ситуацию на мировом уровне, можно сделать вывод, что эта проблема не является столь острой, как в России. Во многом это определяется уже сложившейся системой требований к массовым электроприборам, которые зачастую выпускаются с уже встроенными конденсаторами для обеспечения $\cos\varphi=1$. Наиболее успешным является механизм в Европейских странах, так как он мотивирует к штрафными санкциями, к компенсации потребителями реактивной мощности и к развитию систем интеллектуального управления распределительными электрическими сетями, в которых потребители имеют возможность для активного участия в управлении режимом своего потребления электроэнергии.

Заключение

Подводя итоги анализа исследуемой проблемы, следует отметить, что механизм взимания платы за реактивную мощность действительно должен служить инструментом повышения качества электроэнергии. Эта мера является обоснованной как с технической точки зрения, так и из экономических соображений. Однако существующая форма этого механизма требует детальной проработки. Например, формирование системы обоснованных тарифов, стимулирующих участие потребителей в обеспечении средствами компенсации реактивной мощности и правильным регулированием их с учетом графика нагрузок для поддержания критериев качества электроэнергии в оптимальных границах и снижения потерь энергии в сетях энергоснабжающих предприятий. На первом этапе необходимо ввести прогрессивные надбавки к тарифу за отклонение $\text{tg}\varphi$ в режимах наибольшей и наименьшей нагрузок от допустимого значения, определяемого в соответствие с приказом Министерства энергетики РФ №380 от 23.07.2015[12], в котором определены только уровни допустимых значений $\text{tg}\varphi$. Необходимость ввода данного мероприятия в силу объясняется серьезными последствиями и ущербам в энергосистеме, к которым может привести избыток или дефицит реактивной мощности. Рассмотрев пути решения данной проблемы в мире, можно констатировать следующее, что единого, четкого, отлаженного и закрепленного законодательными актами механизма оплаты за реактивную мощность нет. В таких условиях актуальным остается поиск новых решений по совершенствованию структуры управления режимами энергопотребления, которые обеспечивают повышение эффективности отрасли и качества электрической энергии.

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. 6-е изд., перераб.и доп. М.: Энергоатомиздат,1987 – 648 с.
2. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии/ Ю.С. Железко – М.: Энас, 2009 – 456с.
3. ГОСТ 32144 – 2013. Качество электроэнергии.М.: Изд-во стандартов, 2013.
4. Ананичева, С.С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах/ С.С. Ананичева – Екатеринбург: УрФУ, 2012 – 94с.
5. Правила применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии. (Введены в действие с 1 декабря 1997 г.) // Промышленная энергетика. – 1998. – №10.
6. Папков, Б. В. Электроэнергетический рынок и тарифы: Учебное пособие Нижегород. гос. техн. ун-т. / Б. В. Папков – Н.Новгород, 2002.
7. Кузнецов, А. В. Структура и тарифное стимулирование управления режимами потребления электрической энергии/ А. В. Кузнецов, Л. Т. Магазинник – Ульяновск: УлГТУ, 2003 –106с.
8. Железко, Ю. С. Вопросы качества электроэнергии, условий потребления и генерации реактивной энергии в договорах на энергоснабжение 100/ Железко Ю. С. – Энергоменеджер. Ежекварт. бюл. АСЭМ. –1998.16-20с.
9. Федеральный закон от 14.04.1995 N 41-ФЗ "О государственном регулировании тарифов на электрическую и тепловую энергию в Российской Федерации".
10. Осика Л.К. Оплата за реактивную электроэнергию – важная составляющая рыночных отношений в энергетике/ Л.К. Осика – Промышленная энергетика.-2002.-№ 6.
11. Гаврилов, Е.В. Достоверность расчетов платы за перетоки реактивной электроэнергии как фактор, влияющий на стабильность энергосистемы/ Е.В. Гаврилов, О.В. Мельник. – Новини энергетики.- 2002.- №2.

12. ПРИКАЗ Министерства энергетики РФ от 23 июля 2015 г. № 380 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощностей для отдельных энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии».