

УДК 621.327

В. В. КУЗЬМИН, д-р техн. наук, проф.

И. Г. КИРИСОВ, ассистент

С. В. МАЛИНИН, магистр

Кафедра «Электроэнергетика», Украинская инженерно-педагогическая академия,  
г. Харьков

## АНАЛИЗ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ УКРАИНЫ

*В статье проведен анализ существующих систем компенсации реактивной мощности, определены проблемы, которые возникают при ее компенсации у разного вида потребителей, приведены данные об используемых источниках реактивной мощности, выпускаемые отечественной промышленностью.*

*У статті проведений аналіз існуючих систем компенсації реактивної потужності, визначені проблеми, які виникають при її компенсації у різних споживачів, приведені дані про використання джерел реактивної потужності, що випускаються вітчизняною промисловістю.*

### Введение

Одним из основных вопросов, связанных с повышением качества электроэнергии в сетях, решаемых как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации систем промышленного электроснабжения, является вопрос о компенсации реактивной мощности, включающий выбор целесообразных источников, расчет и регулирование их мощности, размещение источников в системе электроснабжения.

Рациональная (оптимальная) компенсация реактивной мощности в промышленных электросетях включает в себя широкий комплекс вопросов, направленных на повышение экономичности работы электроустановок, улучшение качества потребляемой электроэнергии, включает методы выбора и расчета компенсирующих устройств, исходя из условий выполнения заданий энергосистемы. Важными и до конца не решенными являются вопросы определения места установки компенсирующих устройств (КУ) и выбора их вида, рациональной и безопасной эксплуатации и защиты. В стадии разработки находятся вопросы автоматического регулирования реактивной мощности в промышленных электросетях, а создание целенаправленного научного подхода к разработке и решению с минимумом погрешности адекватной математической модели системы рациональной компенсации реактивной мощности.

Выбор рациональной компенсации реактивной мощности приводит к снижению потерь мощности из-за ее перетоков, к обеспечению надлежащего качества потребляемой электроэнергии за счет регулирования и стабилизации уровня напряжений в электросетях, достижению высоких технико-экономических показателей работы электроустановок.

### Основная часть

Проблема компенсации реактивной мощности в электрических системах имеет большое значение по следующим причинам:

- 1) в промышленном производстве наблюдается опережающий рост потребления реактивной мощности по сравнению с активной;
  - 2) в городских электрических сетях возросло потребление реактивной мощности, обусловленное ростом бытовых нагрузок с потреблением реактивного тока;
  - 3) увеличивается потребление реактивной мощности в сельских электрических сетях.
- С точки зрения генерации и потребления, между реактивной и активной

мощностью существуют значительные различия. Если большая часть активной мощности потребляется электроприемниками (ЭП) и лишь незначительная теряется в элементах сети и электрооборудования, то потери реактивной мощности в элементах сети могут быть соизмеримы с реактивной мощностью, потребляемой ЭП. Из 100 % реактивной мощности, вырабатываемой в энергосистеме, 22 % теряется в повышающих трансформаторах электростанций и в повышающих автотрансформаторах на подстанциях 110–750 кВ энергосистемы, 6,5 % теряется в линиях районных сетей системы, 13,5 % составляют потери в понижающих трансформаторах и лишь 58 % из всей выработанной реактивной мощности приходится на шины 6–10 кВ потребителей.

Синхронные генераторы на электростанциях, вместе с другими источниками реактивной мощности, обеспечивают и регулируют баланс реактивной мощности в современных электрических сетях. В номинальном режиме генератор вырабатывает активную и реактивную мощности при определенном (номинальном) значении  $\cos \varphi_{ном}$ .

При снижении выработки активной мощности, по сравнению с номинальным значением, возможно увеличение генерирования реактивной мощности сверх номинальной. В этом случае некоторая часть генераторов может переводиться на работу с пониженным коэффициентом мощности, т. е. с целевым увеличением выработки реактивной энергии.

Увеличение же выработки реактивной мощности в режиме наибольших активных нагрузок, за счет снижения генерации активной мощности, экономически нецелесообразно. Эффективнее, вместо снижения активной мощности генераторов электростанций, применять для выработки реактивной мощности компенсирующие устройства [2, 3].

Прохождение в электрических сетях реактивных токов обуславливает дополнительные потери активной мощности в линиях, трансформаторах, генераторах электростанций, обуславливает потери напряжения, требует увеличения номинальной мощности или числа трансформаторов, снижает пропускную способность всей системы электроснабжения. Большая загрузка реактивной мощностью электростанций приводит к перегрузке генераторов, к необходимости их использования специально для выработки реактивной мощности даже в те часы, когда по активной нагрузке часть генераторов можно отключить в резерв. Реактивной мощностью дополнительно нагружаются питающие и распределительные сети предприятий, соответственно увеличивается общее потребление электроэнергии [2]. Реактивная составляющая обязательна при работе многих промышленных установок, т. е. она не может быть исключена полностью. Поэтому целесообразно применять средства, предназначенные для уменьшения ее потребления из питающей сети.

Обычно в электрической цепи генерируемая реактивная энергия равна потребляемой. Большая часть промышленных установок потребляет реактивную энергию, но эта потребность обычно превышает возможности покрытия ее рациональным способом генераторами электростанций, поэтому необходимы дополнительные устройства, поставляющих в энергетическую систему реактивную мощность – компенсаторы реактивной мощности. Такими устройствами могут служить батареи конденсаторов, синхронные компенсаторы и двигатели, а также статические источники реактивной мощности. При номинальной нагрузке генераторы вырабатывают лишь около 60 % требуемой реактивной мощности, 20 % генерируется в ЛЭП с напряжением выше 110 кВ, 20 % вырабатывают КУ, расположенные на подстанциях или непосредственно у потребителя. Совместная работа КУ с сетью ведет к уменьшению потребления из нее реактивной составляющей тока [6].

Во всех случаях при применении компенсирующих устройств необходимо учитывать ограничения по следующим техническим и режимным требованиям:

- 1) по необходимому резерву мощности в узлах нагрузки;
- 2) по располагаемой реактивной мощности на шинах ее источника;
- 3) по отклонениям напряжения;
- 4) по пропускной способности электрических сетей.

Для уменьшения перетоков реактивной мощности по линиям и трансформаторам источники реактивной мощности должны размещаться вблизи мест ее потребления. При этом передающие элементы сети разгружаются от реактивного тока, чем достигается снижение потерь активной мощности и напряжения [3].

Уменьшение потребления реактивной мощности на предприятии достигается путем компенсации реактивной мощности, как естественными мерами (ограничение влияния ЭП на питающую сеть путем воздействия на сам приемник), так и за счет специальных КУ в соответствующих точках системы электроснабжения. Мероприятия, проводимые по компенсации реактивной мощности эксплуатируемых или проектируемых электроустановок потребителей, могут быть разделены на следующие две группы:

- 1) не требующие применения компенсирующих устройств;
- 2) связанные с применением компенсирующих устройств;

Мероприятия первой группы направлены на снижение потребления реактивной мощности и должны рассматриваться в первую очередь, поскольку для их осуществления, как правило, не требуется значительных капитальных затрат, а необходимо:

1) упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования, а, следовательно, и к повышению  $\cos \varphi$ ;

2) переключение статорных обмоток асинхронных двигателей напряжением до 1000 В с треугольника на звезду, если их загрузка составляет менее 40 %;

3) устранение режима работы АД без нагрузки (холостого хода) путем установки ограничителей холостого хода, когда продолжительность межоперационного периода превышает 10 мин;

4) замена, перестановка и отключение трансформаторов, загружаемых в среднем менее чем на 30 % от их номинальной мощности;

5) замена мало загруженных двигателей двигателями меньшей мощности при условии, что изъятие избыточной мощности влечет за собой уменьшение суммарных потерь активной энергии в энергосистеме и в самом двигателе;

6) замена, где это возможно по технико-экономическим соображениям, АД синхронными двигателями той же мощности и их применение для всех новых установок электропривода;

7) регулирование напряжения, подводимого к электродвигателям с частотным управлением;

8) повышение качества ремонта двигателей с сохранением их номинальных данных;

9) применение преобразователей с большим числом фаз выпрямления и поочередным, несимметричным управлением работой;

10) применение специальных преобразовательных систем с искусственной коммутацией вентилей (такие системы характеризуются сниженным потреблением реактивной мощности), а также систем с ограниченным содержанием высших гармоник в токе питающей сети.

Мероприятия, связанные с применением компенсирующих устройств:

1) установка статических конденсаторов;

2) использование синхронных двигателей в качестве компенсаторов;

3) применение статических источников реактивной мощности;

4) применение систем компенсации, состоящих из нескольких перечисленных устройств, работающих параллельно.

Применению устройств компенсации реактивной мощности должен предшествовать тщательный технико-экономический анализ в связи с высокой стоимостью и достаточной сложностью этих устройств [4].

Широкое использование вентильных преобразователей в промышленности приводит к необходимости решать вопросы уменьшения их воздействия на питающую сеть, и в первую очередь вопросы компенсации реактивной мощности.

Известно, что наиболее экономичным средством для компенсации реактивной мощности

являются конденсаторные батареи. Это объясняется их преимуществами перед другими средствами компенсации реактивной мощности, а именно:

- возможность применения, как на низком, так и на высоком напряжении;
- малые потери активной мощности (0,0025–0,005 кВт/кВАр);
- наименьшая удельная стоимость (за 1 квар) по сравнению с другими КУ;
- простота эксплуатации (ввиду отсутствия вращающихся и трущихся частей);
- простота производства монтажа (малая масса, отсутствие фундамента);
- возможность использования для установки в любом сухом помещении.

Но в сетях с повышенным содержанием высших гармоник, генерируемых нелинейными нагрузками, применение обычных средств компенсации реактивной мощности, рассчитанных на синусоидальные токи и напряжения, связано с техническими трудностями.

При необходимости компенсации нагрузок быстроизменяющейся реактивной мощностью применение регулируемых конденсаторных батарей, путем подключения или отключения их секций с помощью механических выключателей, оказывается затруднительным, а часто и невозможным в связи с высокой стоимостью, малым быстродействием и низкой механической прочностью выключателей, а также ступенчатым характером регулирования. Возможно, кроме того, возникновение ударных коммутационных сверхтоков, зависящих от момента подключения батареи конденсаторов к питающей сети, а также неблагоприятное воздействие на конденсаторы токовых перегрузок при частоте высших гармоник, генерируемых нелинейными нагрузками. Исследование процесса работы конденсаторных установок при наличии высших гармоник в питающей сети, особенно при работе вентильных преобразователей, представляет важное практическое значение для определения возможности применения конденсаторных батарей в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Практика работы промышленных предприятий свидетельствует о том, что батареи конденсаторов, работающие при несинусоидальном напряжении, в ряде случаев быстро выходят из строя в результате вспучиваний и взрывов. Причиной разрушения конденсаторов является перегрузка их токами высших гармоник, которая возникает, как правило, из-за того, что конденсаторные батареи изменяют частотные характеристики систем и способствуют возникновению резонанса токов. При подключении батареи конденсаторов к шинам подстанции, питающей мощную вентильную нагрузку, какое бы ни было значение емкости батареи, всегда найдется такая группа гармоник, при которых конденсаторы вступают в режим резонанса токов (или близкий к нему) с индуктивностью сети. Работу батарей конденсаторов в условиях несинусоидального напряжения необходимо рассматривать с позиций взаимного влияния высших гармоник питающей сети и самих конденсаторов.

Несмотря на применение на ряде предприятий синхронных компенсаторов, интерес к этому способу компенсации в условиях преобразовательной нагрузки заметно упал. Активно проводятся исследования и разработка статических (в основном, тиристорных) компенсаторов реактивной мощности. Часто на эти же устройства дополнительно возлагаются функции фильтрации высших гармоник и снижения степени несимметрии питающих напряжений. Повышенное внимание в настоящее время уделяется также совершенствованию схемных решений, методам расчета и вопросам практического применения фильтрокомпенсирующих устройств.

Статические компенсаторы реактивной мощности (СКРМ) являются перспективным средством рациональной компенсации реактивной мощности из-за присущих им положительных свойств, таких, как быстродействующее регулирование, подавление колебаний напряжения, симметрирование нагрузок, отсутствие вращающихся частей, плавность регулирования реактивной мощности, выдаваемой в сеть. Кроме того, эти КУ могут осуществлять плавное и оптимальное распределение напряжений, обеспечивая тем самым снижение их потерь в распределительных электросетях [7].

СКРМ обеспечивают одновременно компенсацию реактивной мощности основной

частоты, фильтрацию высших гармонических, компенсацию изменений напряжения, а также симметрирование напряжения сети. Они состоят из управляемой части, обеспечивающей регулирование реактивной мощности, и энергетических фильтров, обеспечивающих фильтрацию высших гармоник тока нелинейных нагрузок.

Статические КУ обладают следующими преимуществами:

- 1) высокое быстродействие изменения реактивной мощности;
- 2) достаточный диапазон регулирования реактивной мощности;
- 3) возможность регулирования и потребления реактивной мощности;
- 4) минимальные искажения питающего напряжения.

Основными элементами статических КУ являются конденсатор и дроссель – накопители электромагнитной энергии, – и вентили (тиристоры), обеспечивающие ее быстрое преобразование. Принцип работы статических источников реактивной мощности состоит в том, что выпрямленным током преобразователя индуктивность (реактор или дроссель с железом) заряжается магнитной энергией, которая инвертируется в сеть переменного тока с опережающим коэффициентом мощности [7].

В отечественной практике для уменьшения колебаний напряжения применяются быстродействующие синхронные компенсаторы типа СК-10000-8 мощностью 7,7 МВАр на напряжение 10 кВ, мощностью 10 МВАр на напряжение 6 кВ. Максимальная скорость изменения реактивной мощности, выдаваемой в сеть, по данным завода составляет 130 МВАр/с, возможна кратковременная работа с 2-кратной перегрузкой.

Установленная мощность синхронного компенсатора при одном и том же графике реактивной нагрузки будет меньше, чем установленная мощность статического КУ. Синхронные компенсаторы обладают всеми недостатками вращающихся машин и имеют меньшее быстродействие по сравнению со статическими компенсаторами. Кроме того, в статических КУ возможно пофазное управление.

Статические КУ обладают рядом преимуществ по сравнению с быстродействующими синхронными компенсаторами. Основным преимуществом является их большее быстродействие. Существенна и возможность осуществления пофазного управления, что необходимо в сетях с быстроизменяющейся несимметричной нагрузкой.

В настоящее время разработано много типов статических КУ на базе управляемых реакторов и конденсаторов в основном с применением управляемых вентилях (тиристоров). Наибольшее распространение в зарубежной и отечественной практике получили устройства прямой и косвенной компенсации. Статические КУ прямой компенсации осуществляют ступенчатое регулирование реактивной мощности с помощью включения и отключения батарей конденсаторов или фильтров высших гармоник при изменении реактивной мощности ЭП. В распределительных сетях 6–10 кВ промышленных предприятий с резкопеременной нагрузкой широко применяются тиристорные компенсаторы реактивной мощности (ТКРМ). Они предназначены для повышения качества электрической энергии при электроснабжении промышленных предприятий и обеспечивают:

- быстродействующую компенсацию реактивной мощности;
- симметрирование токов и напряжений в сети;
- стабилизацию напряжений на шинах потребителей;
- фильтрацию высших гармоник;
- ограничение перенапряжения в узле подключения ТКРМ.

ТКРМ выполнен по схеме косвенной компенсации, источником опережающей реактивной мощности в которой являются силовые фильтры высших гармоник; стабилизирующим, симметрирующим элементом – полупроводниковый стабилизатор мощности (ПСМ), встречно-параллельно включенные тиристоры которого, вместе с компенсирующим реактором, соединены в треугольник. Для снижения установленной мощности компенсирующих реакторов его индуктивное сопротивление уменьшено в 2,5 раза за счет ограничения минимального

угла управления тиристорами до  $30^\circ$ . Внедрение ТКРМ позволяет повысить пропускную способность промышленных сетей, уменьшает потери и повышает качество электроэнергии.

### Выводы

Применительно к сетям с симметричными и несимметричными нелинейными нагрузками ведутся разработки и изготовление комплектных фильтрокомпенсирующих и фильтросимметрирующих устройств, обеспечивающих одновременно компенсацию дефицита реактивной мощности основной частоты, фильтрацию высших гармонических, компенсацию отклонений и колебаний напряжения, а также симметрирование напряжения сети.

При наличии быстрых и резкопеременных нагрузок становится перспективным применение статических компенсаторов реактивной мощности, обеспечивающих практическую возможность безинерционного регулирования реактивной мощности. При этом улучшаются условия статической устойчивости энергосистемы в целом, что обеспечивает дополнительную экономию за счет повышения технико-экономических показателей работы электроустановок.

Статические компенсаторы реактивной мощности являются перспективным средством рациональной компенсации реактивной мощности из-за таких положительных свойств: быстродействие регулирования, подавления колебаний напряжения, симметрирование нагрузок, отсутствие вращающихся частей, плавность регулирования реактивной мощности, выдаваемой в сеть и т. д. Поэтому в настоящее время уделяется большое внимание их разработке и освоению, как в нашей стране, так и за рубежом.

### Список литературы

1. Минин Г. П. Реактивная мощность. – М.: Энергия, 1978. – 88 с.
2. Зимин Е. Н., Кацевич В. Л., Козырев С. К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. – М.: Энергоиздат, 1981. – 192 с.
3. Жежеленко И. В., Рабинович М. Л., Божко В. М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – К.: Техніка, 1981. – 160 с.
4. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / Под ред. В. М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
5. Добрусин Л. А. Широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства для тиристорных преобразователей // Электричество. – 1985. – № 4. – С. 27–30.
6. Красник В. В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
7. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах: Пер. тематического сб. рабочей группы Исследовательского Комитета №38 СИГРЭ / Под ред. И. И. Карташева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 174 с.
8. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: Пер. с польск. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.

## ANALYSIS OF REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRIC NETWORKS OF UKRAINE

V.V. KUZMIN, Dr. Scie. Tech., Pf., I. G. KIRISOV, assistant  
S.V. MALININ, The master

*The article analyzes the existing compensation of reactive cardinality of, identified the problems that arise when it is compensation for different types of consumers, presents data on the use of reactive power sources, manufactures mye-home industry.*

Поступила в редакцию 06.04 2012 г.