

УДК 622

АНАЛИЗ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Миллер Н.Д., студент гр. ЭПм-231, I курс
Научный руководитель: Воронин В.А., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

В современных электроэнергетических системах проблема реактивной мощности является актуальной и требует эффективных решений для обеспечения стабильности работы системы и оптимизации энергопотребления. В данной статье проводится анализ различных средств компенсации реактивной мощности, таких как конденсаторы, синхронные компенсаторы и активные фильтры, с целью выявления их преимуществ, недостатков и областей применения.

Реактивная мощность - это компонент мощности в электрической системе, который обусловлен неравномерностью или сдвигом фаз между напряжением и током в цепи. Она не выполняет работы в обычном смысле, но необходима для поддержания электромагнитного поля в элементах электрических устройств.

Реактивная мощность возникает из-за индуктивных и ёмкостных элементов в электрических цепях, таких как двигатели, трансформаторы, конденсаторы и другие устройства. Она может приводить к нежелательным эффектам в электрической сети, таким как:

1. Увеличение тока:

- При высоком значении реактивной мощности ток в электросети возрастает. Это приводит к перегрузке кабелей и трансформаторов, что требует их замены на более мощные, увеличивая расходы на электроснабжение.

2. Потери электроэнергии: увеличение реактивной мощности влечет за собой рост потерь активной мощности в сети:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R,$$

где P – передаваемая активная мощность (Вт),

Q – передаваемая реактивная мощность (вар),

U – номинальное напряжение (В),

R – активное сопротивление линии (Ом).

3. Понижение напряжения:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U},$$

где X – реактивное сопротивление линии (Ом).

- Нестабильность работы: Реактивная мощность приводит к падению напряжения, что негативно влияет на работу электроприборов и может привести к их поломке.

- Рост тока для передачи равной мощности

4. Удорожание электроснабжения:

- Штрафные санкции: в некоторых случаях энергоснабжающие организации могут применять штрафные санкции к потребителям с низким $\cos \varphi$.

5. Снижение надежности электроснабжения:

- Повышенный риск аварий: Перегрузка кабелей и трансформаторов, а также понижение напряжения и общая нестабильность энергетических режимов увеличивают риск аварийных ситуаций [1].

Разбирая вариативность компенсации стоит начать со способов ее реализации. Различают 3 варианта (рисунок 1): индивидуальная, групповая и централизованная. [2]

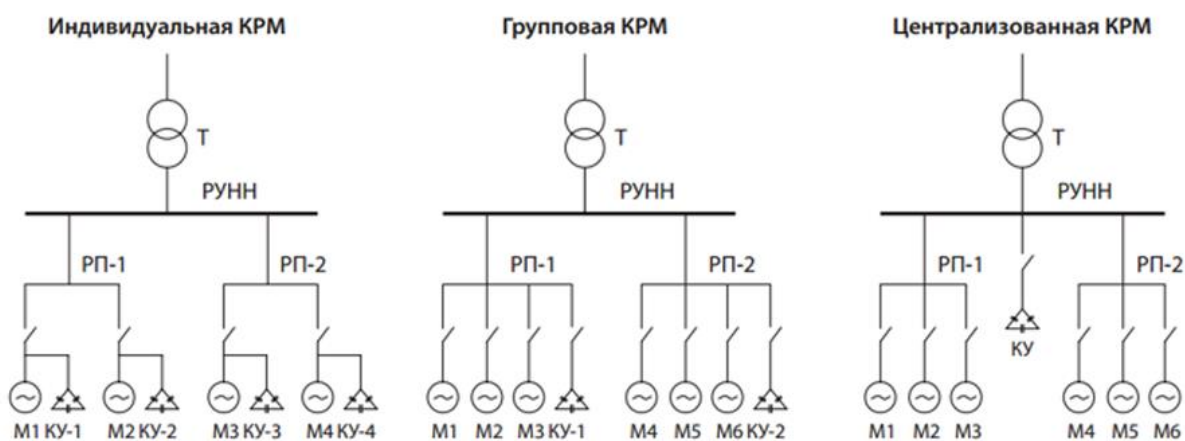


Рисунок 1 – Способы размещения компенсирующих устройств

Для понимания плюсов и минусов каждого из них следует выделить следующие критерии оценки:

- гибкость и масштабируемость – возможность расширения и простота настройки при изменении конфигурации общей сети;
- эффективность – точность компенсации и скорость реагирования на изменение нагрузки;
- начальные затраты – стоимость оборудования;
- эксплуатационные затраты – затраты, требуемые на дальнейшую эксплуатацию компенсирующего устройства;
- управляемость – простота контроля и обслуживания;

Соответствие данным критериям приведены на рисунке 2 для каждого типа подключения.

Из критериев видно, что самым удобной и эффективной является индивидуальная компенсация, однако ее высокая стоимость делает возможным ее применение в небольших сетях. Таким образом главным критерием выбора можно назвать размер и общую конфигурацию сети.

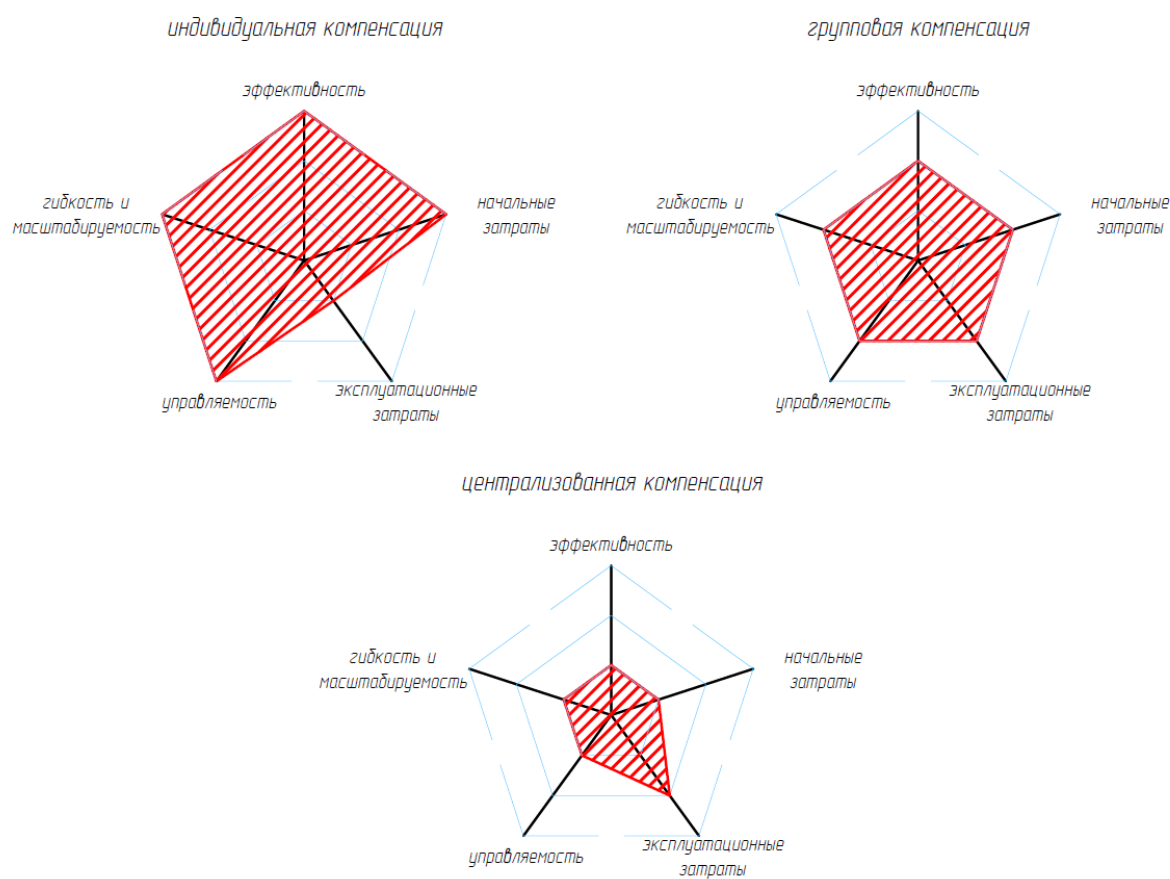


Рисунок 2 – Критерии способов размещения компенсирующих устройств

Далее рассмотрим средства компенсации реактивной мощности, то есть непосредственно само используемое для осуществления компенсации оборудование.

Самый простой вариант – батарея конденсаторов (КБ). Они обладают самыми низкими собственными потерями мощности (порядка тысячных долей кВт на квар). При работе не издают посторонних шумов и легки как в монтаже, так и в эксплуатации. При этом являются относительно простыми и дешевыми устройствами.

Однако, КБ обладают существенными недостатками: повышенный риск возгораний, высокая чувствительность к скачкам тока и напряжения. Также главным минусом является либо полное отсутствие возможности регулирования выдаваемой мощности, либо грубое ступенчатая регулировка. Недокомпенсация или перекомпенсация при таких условиях гарантирована, поэтому данные устройства могут использоваться только в сетях со стабильным потреблением реактивной мощности и низкими требованиями к качеству электроэнергии. В целом, точность КБ можно оценить относительно количества ступеней регулирования. При этом максимальная разница между требуемой реактивной мощностью и выдаваемой компенсатором будет, если компенсируемая

мощность окажется между ступенями КБ. При этом погрешность составит 40-5% (чем ближе к максимальной мощности, тем меньше погрешность).

В целом, можно выделить два критерия классификации конденсаторных установок. С наличием фильтров гармоник (УКРМФ) и без. А также по типу регулирования. В данном случае могут быть 3 варианта: полное отсутствие возможности регулирования, ступенчатое регулирование при помощи контакторов (УКРМ, УКРМФ) и самый совершенный вариант – при помощи тиристоров (УКРМФТ, УКРМТ). Тиристоры обеспечивают в данном случае высокое быстродействие и не дают скачков тока при коммутации, как при контакторном способе. [6] Однако, как следует из графика на рисунке 3 [7], данный тип коммутации является более дорогим, что ограничивает диапазон их применения. Более того, при малых мощностях, разница в цене значительно увеличивается.

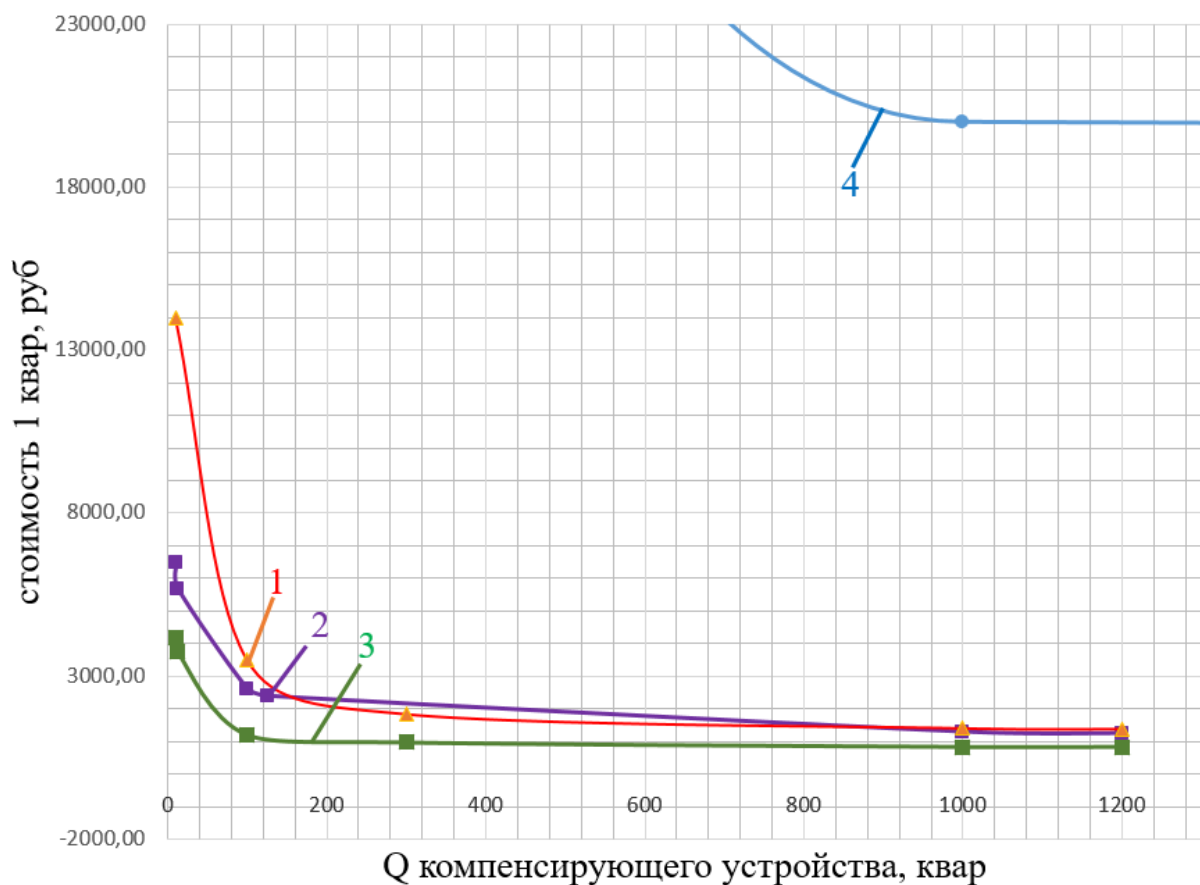


Рисунок 3 – График зависимости стоимости компенсирующих устройств от их номинальной мощности
(1 – УКРМФТ, 2 – УКРМФ, 3 – УКРМ, 4 – STATCOM)

Данные устройства следует применять только для предприятий с быстро меняющейся нагрузкой (сварочное, буровое, крановое оборудование). Для наглядности сравнения, можно взять УКРМ на 1 Мвар, так как при данных мощностях динамика изменения цен от мощности максимально стабилизируется (Рисунок 4). Отсюда видно, что тиристорная коммутация примерно в два

раза дороже контакторной и в 5 раз дороже компенсации без дополнительных фильтров гармоник.

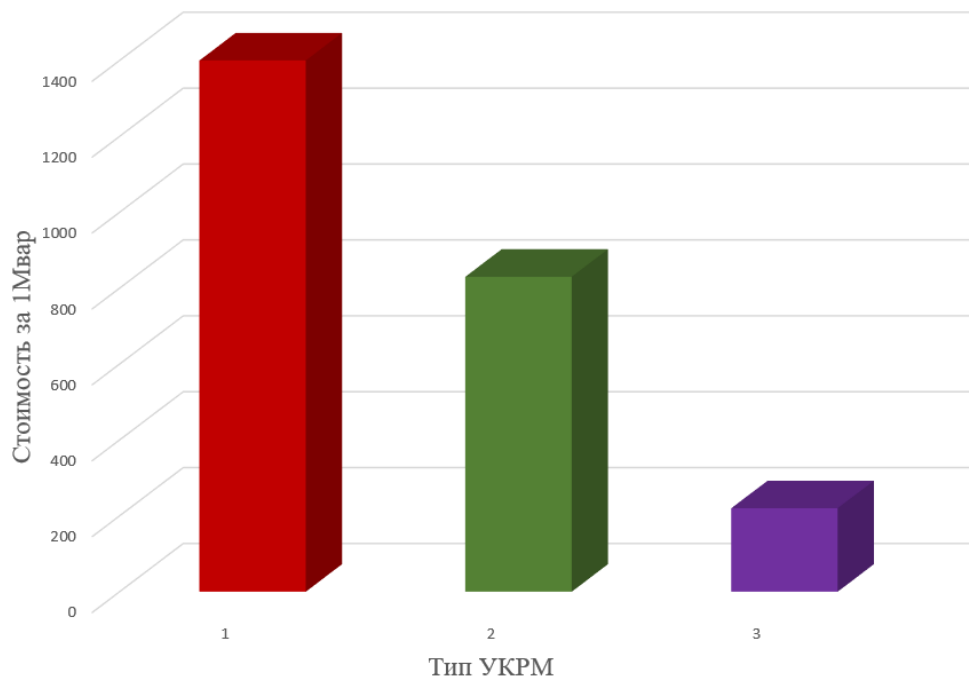


Рисунок 4 – Стоимость УКРМ мощностью 1 Мвар
(1 – УКРМФТ, 2 – УКРМФ, 3 – УКРМ)

Другой вариант компенсирующего устройства – синхронный двигатель (СД), способный выдавать реактивную мощность при перевозбуждении.

В отличие от КБ, СД хорошо поддается плавному регулированию, однако потери мощности значительнее.

СД в качестве устройства компенсации используются в двух вариантах:

- в качестве полноценного двигателя, выполняющего полезную работу вместо асинхронного двигателя. Данный вариант подразумевает переход предприятия с асинхронных двигателей на синхронные, что положительно скажется на потреблении реактивной мощности всем предприятием.

- в качестве синхронного компенсатора, то есть машины облегченной конструкции без нагрузки на валу. [3]

Последнее средство компенсации – статические компенсаторы (STATCOM). Они могут быть выполнены на базе тиристоров или по более совершенной технологии, на базе IGBT транзисторов. Основная структура состоит из трех блоков: источника постоянного напряжения, то есть конденсатора, реактора и управляемого инвертора напряжения, который позволяет регулировать выходной сигнал по величине, фазе и форме. Точность данного оборудования сложно точно оценить, так как она разнится в зависимости от конкретного устройства, однако, как правило, погрешность STATCOM не превышает 1%. Если сравнивать STATCOM с другими средствами компенсации (таблица 1), то можно заметить его явное преимущество над другими устройствами, однако статические компенсаторы все еще остаются малодоступными,

что заставляет продумывать и рассчитывать целесообразность их использования в каждом конкретном случае. [4, 5, 8]

Если просмотреть имеющиеся предложения на рынке, то можно узнать, что примерная цена за 1 Мвар конденсаторной установки составляет 1,5 млн. р. При этом 1 Мвар статического компенсатора просчитать не получится, так как цена за единицу мощности падает с ростом общей мощности устройства. Так, за STATCOM на 5 Мвар придется заплатить по 80 млн. за Мвар, а при 1 Мвар – 20 млн. При такой тенденции, представленной на рисунке 3, маломощные STATCOM окажутся в 10 раз дороже альтернативного конденсатора при той же мощности. Данная проблема может частично быть решена, например, комбинированием средств компенсации – использовании конденсаторов для компенсации минимальных границ графика реактивной нагрузки, что позволит значительно уменьшить требуемую мощность STATCOM, избежав при это возможной перекомпенсации и сохранив все плюсы статического компенсатора. [5]

Таблица 1 – Средства компенсации

Средство компенсации	STATCOM с тиристорным управлением	STATCOM с транзисторным управлением	КБ с контакторным управлением	КБ с тиристорным управлением	Синхронный компенсатор
Диапазон регулирования	0-100% (плавное регулирование с компенсацией и индуктивной, и емкостной мощностей)	0-100% (плавное регулирование с компенсацией и индуктивной, и емкостной мощностей)	0-100% (ступенчато)	0-100% (ступенчато)	0-100% (плавное регулирование с компенсацией и индуктивной, и емкостной мощностей)
Время реакции	1-10 мс	0,1-1 мс	100-200 мс	10-20 мс	100-200 мс
Потери мощности	2-3 %	1-2 %	0,2-0,5 %	0,5-1 %	3-5 %
Стоимость	10000 р/квар	20000 р/квар	830 р/квар	1400 р/квар	5000р/квар
Точность	>99%	>99%	95-60% (зависит от кол-ва ступеней)	95-60% (зависит от кол-ва ступеней)	98% (зависит от способа регулирования тока возбуждения)
Уровень шума	низкий	низкий	Шум при переключении контакторов	низкий	высокий

Однако, Цены на STATCOM в последние годы имеют тенденцию к снижению. Это связано с несколькими факторами:

Снижение стоимости компонентов: Стоимость силовых электронных модулей, конденсаторов и других компонентов, используемых в STATCOM, в последние годы снизилась.

Увеличение конкуренции: На рынке STATCOM появилось больше производителей, что привело к усилению конкуренции и снижению цен.

Улучшение технологий: Разработки в области силовой электроники привели к созданию более эффективных и компактных STATCOM, что также способствовало снижению цен.

Так, в 2010 году примерная цена за 1 Мвар составляла 30 млн. р, в 2020 – 20 млн. р. Ожидаемая цена в 2030 порядка 13 млн. р.

Таким образом, выбор оптимального средства компенсации реактивной мощности зависит от конкретных потребностей потребителя, его бюджета и требований к качеству электроснабжения. Каждый тип компенсации имеет свои преимущества и недостатки, и их сравнительный анализ позволяет выбрать наиболее подходящее решение для конкретной ситуации.

Список литературы:

1. Коновалова Л.А., Рожкова Л.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528с.
2. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: Учебник для учащихся техникумов. - М.: Высшая школа, 1981. - 376с.
3. Минин Г.П. Реактивная мощность. - М.: Энергия, 1978. - 88с.
4. Sciencedirect [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004773> (дата обращения 20.03.2024).
5. Энергозапад [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energozapad.ru/staticheskij-generator-sgrm-na-1-mvar> (дата обращения 20.03.2024).
6. Славэнерго [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://slavenergo.ru/kondensatornie_ustanovki_tiristornie (дата обращения 25.03.2024).
7. Проммашэлектро [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.prom-elec.ru/catalog/k-8066157-ukrmf> (дата обращения 25.03.2024).
8. Статический генератор реактивной мощности СТАТКОМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ukkz.com/ru/catalog/novinka-staticheskij-generator-reaktivnoj-mosh-nosti-statcom.html> (дата обращения 25.03.2024).