

1.1 Актуальность проблемы компенсации реактивной мощности

Проблема компенсации реактивной мощности (КРМ) всегда занимала важное место в общем комплексе вопросов повышения эффективности передачи, распределения и потребления электрической энергии. Правильное решение таких задач в значительной мере предопределяет экономию денежных и материальных ресурсов, повышение качества электроснабжения. Основные вопросы компенсации реактивной мощности должны рассматриваться с учетом современных взглядов и с учетом новых технических решений в этой области.

Электроустановки, в общем случае, могут потреблять как активную, так и реактивную составляющие полной мощности и электрической энергии. Активная составляющая эта та ее часть, которая идет на создание полезной работы и связана с преобразованием электрической энергии в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и др.). Выработка электрической энергии требует расхода энергетического топлива (уголь, газ, мазут и др.).

Реактивная мощность Q может рассматриваться как характеристика скорости обмена энергией между генератором и магнитным полем приемника электроэнергии. В отличие от активной мощности, полезно используемой в работе, реактивная мощность не выполняет полезной работы, она служит лишь для создания магнитных полей в индуктивных приемниках (например, в электродвигателях, трансформаторах и т. п.), циркулируя все время между источником тока и приемниками.

Из сказанного, очевидно, что традиционный термин "потребители реактивной мощности", широко используемый электриками как в повседневной практике, так и в технической литературе, является термином условным, не отражающим физической сущности реактивной мощности. Более правильным является термин "индукционные приемники электроэнергии", а в ряде случаев может быть применен термин "реактивные нагрузки".

Реактивная мощность, протекая по элементам электрической сети, обладающим активным сопротивлением, вызывает в них дополнительные потери мощности и электрической энергии. Кроме того, перетоки реактивной мощности снижают пропускную способность линий электропередач и трансформаторов, либо вынуждают увеличивать сечение проводов, прокладку дополнительных кабельных линий, замену трансформаторов на большую номинальную мощность.

Однако величины перетоков реактивной мощности могут быть уменьшены и даже полностью устранены с помощью конденсаторов, устанавливаемых

непосредственно в местах потребления реактивной мощности. Обмен энергией, в этом случае, будет происходить между индуктивностью и емкостью цепи. Между индуктивностью же и источником энергии будет происходить обмен только некомпенсированной части энергии (рисунок 1).

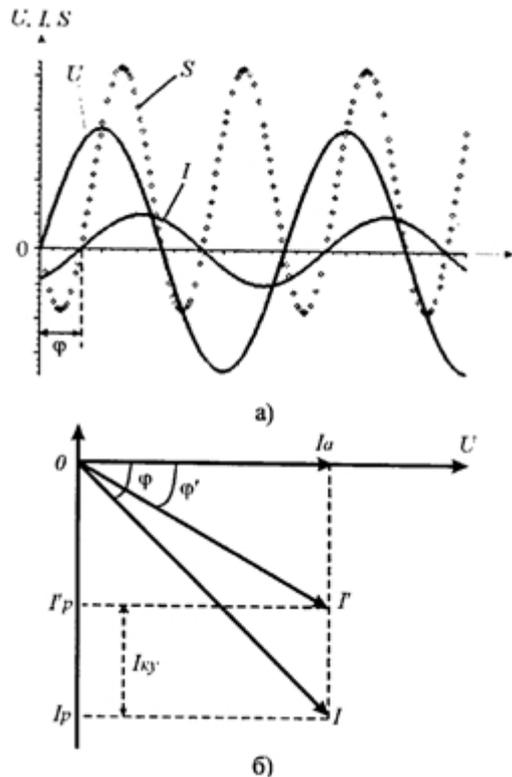


Рисунок 1 - Диаграммы напряжения, тока и мощности

В электрических синусоидальных и симметричных трехфазных сетях справедливы следующие соотношения:

$$\begin{cases} S = \sqrt{P^2 + Q^2}; P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi; Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi; \\ S = P - jQ; \operatorname{tg} \varphi = Q / P; \cos \varphi = P / S. \end{cases}$$

В сетях с нелинейной нагрузкой при заметной несинусоидальности тока и напряжения появляется реактивная мощность искажений, которая не позволяет полностью использовать указанные выше соотношения. Для анализа режимов в таких сетях требуются специальные подходы.

Острота проблемы компенсации реактивной мощности на современном этапе вызвана рядом обстоятельств:

- концентрацией и централизацией генерирующих источников. Передача дешевой реактивной мощности от генераторов электростанции к потребителю по линиям электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения стала экономически нецелесообразной;

- осуществление повсеместно политики ресурсо- и энергосбережения. Оптимизация реактивной мощности, в том числе с помощью местных компенсирующих устройств, позволяет существенно снизить потери мощности и электрической энергии в сетях;
- повышенные требования к качеству электрической энергии в соответствии с нормами ГОСТ13109-97. Реактивная мощность существенно влияет на изменения режима напряжения в электрических сетях;
- недостаточная установленная мощность компенсирующих установок в питающих и распределительных электрических сетях, в том числе комплектных автоматически управляемых конденсаторных батарей.

Проблема компенсации реактивной мощности включает в себя ряд технико-экономических задач, а именно:

- проведение мероприятий для снижения реактивной мощности самих электроприемников;
- выбор типа и мест установки компенсирующих устройств;
- многокритериальная оптимизация режимов работы компенсирующих устройств при развитии и функционировании систем электроснабжения.

1.2 Ущерб от перетоков реактивной мощности

Рассмотрим ущерб, который может возникать в системах электроснабжения при увеличении перетоков реактивной мощности Q . Для сравнения будем сопоставлять случай, когда $Q=0$, $\cos \phi = 1,0$, $\operatorname{tg} \phi = 0$ и случай - $\cos \phi = 0,7$, $\operatorname{tg} \phi = 1,0$.

1. Увеличение перетоков реактивной мощности приводит к увеличению величины полного тока.

$$I = P \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \phi} / \sqrt{3} \cdot U.$$

При увеличении Q до $\operatorname{tg} \phi = 1$, ток в линии увеличился бы в 1,41 раза. Это привело бы к уменьшению пропускной способности линий электропередачи по нагреву, необходимости увеличения сечений проводов и жил кабелей на одну или две ступени стандартных сечений, а в ряде случаев возникает необходимость сооружения новых линий электропередач и замены трансформаторов на большую мощность.

2. Увеличение перетоков реактивной мощности связано с возрастанием активных ΔP и реактивных потерь мощности.

$$\Delta P = P^2(1 + \operatorname{tg}^2 \phi)R/U^2, \Delta Q = P^2(1 + \operatorname{tg}^2 \phi)X/U^2$$

При возрастании перетоков реактивной мощности до значений $\text{tg}\phi = 1$ величина потерь может удвоиться. Это, в свою очередь, приведет к перерасходу электроэнергии, увеличению тарифов на электроэнергию и перерасходу энергетического топлива.

3. Увеличение перетоков реактивной мощности вызывает дополнительные потери напряжения:

$$\Delta U = (P \cdot R - Q \cdot X) / 10U_n^2 = P \cdot (R - \text{tg} \phi X) / 10U_n^2$$

При этом увеличивается скольжение s асинхронных двигателей, понижается освещенность рабочих поверхностей, что приводит к снижению производительности труда. Снижение уровня напряжения оказывает влияние на статическую устойчивость электроэнергетической системы и на устойчивость узла нагрузки в результате возникновения явления «лавины напряжения».

1.3 Источниками реактивной мощности (ИРМ) являются:

- высоковольтные линии электропередачи воздушные и кабельные;
- силовые статические конденсаторы;
- синхронные двигатели в режиме перевозбуждения;
- генераторы электростанций;
- синхронные компенсаторы;
- статические тиристорные компенсаторы;
- компенсационные преобразователи с искусственной коммутацией.

Наиболее распространенными ИРМ являются конденсаторные батареи. В последнее время все большее распространение получают автоматические устройства компенсации реактивной мощности (АУКРМ). Данные устройства позволяют регулировать реактивную мощность путем включения и отключения необходимого количества ступеней (секций) с конденсаторами в автоматическом режиме.

1.4 Потребители реактивной мощности:

Работа многих электроприемников сопровождается потреблением из сети не только активной, но и реактивной мощности. Долевое участие отдельных видов электроприемников в общем балансе реактивной мощности может быть представлена таблицей 1.

Таблица 1 - Долевое участие электроустановок в формировании РМ

№п/п	Вид потребителя	Долевое участие в %
1	Асинхронные двигатели	50
2	Силовые трансформаторы	25
3	Электробытовые приборы и лампы	10
4	Электропечные установки	6
5	Воздушные ЛЭП и реакторы	5
6	Электросварка	2
7	Преобразовательные установки	2
8	Прочие	1

Наиболее распространенным электроприемником, потребляющим из сети реактивную мощность, является асинхронный двигатель. Величина коэффициента реактивной мощности асинхронного двигателя изменяется в широких пределах в зависимости от мощности, числа оборотов, от коэффициента его загрузки КЗ и от величины напряжения, подведенного к его зажимам, в соответствии статической характеристики.

1.5 Выбор необходимой мощности КРМ

В соответствии с "Указаниями по компенсации реактивной мощности" выбор средств компенсации должен производиться для режима наибольших реактивных нагрузок. Если все выбранные с учетом этого требования компенсирующие устройства будут постоянно, независимо от режима реактивных нагрузок, подключены к сети, то в периоды понижения нагрузок вырабатываемая избыточная реактивная мощность компенсирующих устройств будет передаваться от потребителя в энергосистему. При этом токовая нагрузка в сети возрастет, увеличатся потери мощности в сети, напряжение в сетях также увеличится и может достигнуть недопустимых значений. Для того чтобы избежать этих явлений, необходимо оборудовать компенсирующие установки устройствами регулирования их реактивной мощности.

Число секций регулируемой конденсаторной батареи должно выбираться в зависимости от характера графика потребления реактивной мощности. Во многих случаях оказывается достаточным ограничиться тремя - четырьмя

секциями. При значительной неравномерности графика электрических нагрузок по часам суток число секций может быть увеличено до пяти-шести. Дальнейшее увеличение числа секций не рекомендуется, так как это усложняет и удорожает установку. Необходимость применения батарей с числом секций, большим шести, должна быть подтверждена технико-экономическими расчетами.

Для того чтобы при резко неравномерном графике реактивной нагрузки добиться наилучшего эффекта с наименьшим числом секций, а следовательно, и с наименьшими затратами на коммутационную аппаратуру, целесообразно выполнить конденсаторные установки из секций, значения мощности которых составляют геометрическую прогрессию. Так, например, при установке, состоящей из трех секций мощностью 100, 200 и 400 квар, можно получить семь ступеней регулирования от 100 до 700 квар включительно. При трех секциях, значения мощности которых составляют арифметическую прогрессию (100, 200 и 300 квар), можно получить только шесть ступеней регулирования - от 100 до 600 квар, а при трех секциях равной мощности (по 100 квар) получаются только три ступени - от 100 до 300 квар. Суммарная мощность нерегулируемых компенсирующих устройств, как правило, не должна превышать величину наименьшей реактивной нагрузки.

1.5 Выбор способа регулирования

Регулирование мощности конденсаторных установок может производиться вручную или автоматически. Регулирование вручную нельзя считать достаточно надежным способом регулирования, так как оно существенно зависит от различных субъективных факторов. Ручное регулирование является приемлемым на тех предприятиях, где осуществляется диспетчерское управление режимами работы энергетического оборудования.

Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок может осуществляться по следующим параметрам: времени суток, напряжению, току нагрузки, значению и направлению реактивной мощности. Выбор параметра регулирования определяется конкретными условиями - характером графиков активной и реактивной нагрузок, характеристиками сети, режимом напряжения в сети и т. п.

В настоящее время существует целый ряд контроллеров, которые реализуют функции регулирования и защиты АУКРМ. Рассмотрим например контроллер NOVAR-314 RS:

Регуляторы реактивной мощности модели Novar - это полностью автоматические приборы, осуществляющие оптимальное управление компенсацией реактивной мощности. Регуляторы оснащены точными измерительными контурами тока и напряжения, и цифровой обработкой измеренных величин достигнута высокая точность определения как актуальной эффективной величины тока, так и коэффициента мощности. Приборы осуществляют вычисление основной гармонической составляющей активного и реактивного тока алгоритмом FFT. Подобным способом вычисляется и основная гармоника напряжения, чем обеспечивается точность измерения и регулирования и в условиях сильного искажения высшими гармониками.

Измерительный контур напряжения у гальванически отделен и позволяет подключать к нему переменное напряжение от 100 до 690 V. Измерительный контур тока является универсальным для номинальных значений вторичного тока измерительных трансформаторов 1А или 5А. Измеряемые сигналы можно подключить к регулятору в произвольной комбинации, то есть произвольное фазное или линейное напряжение и ток любой фазы.

Запуск (инсталляция) прибора полностью автоматизирован. Регулятор автоматически определит как способ подключения, так и величину отдельных присоединенных компенсирующих ступеней. Ручное задание этих параметров также возможно. Регулирование протекает во всех четырех квадрантах комплексной плоскости (U,I). Секция транзисторных выходов регулирует со скоростью, задаваемой в диапазоне от 1 до 5 регулирующих воздействий в секунду. Скорость регулирования секции релейных выходов зависит как от величины ошибки регулирования, так и от ее полярности (перекомпенсация/недокомпенсация). Подключение и отключение компенсирующих конденсаторов осуществляется так, чтобы оптимальное состояние компенсации (требуемый косинус) было достигнуто одним циклом регулирования и минимальным количеством переключаемых ступеней. При этом прибор выбирает отдельные ступени с учетом их равномерной загрузки и сначала подключает ступени, которые были отключены раньше всего и их остаточный заряд минимальный. Во время регулирования прибор проводит текущий контроль компенсирующих ступеней. При обнаружении пропадания или изменения величины ступени данная ступень временно исключается из процесса регулирования (при соответствующей настройке параметров). Временно исключенная ступень периодически тестируется и может быть обратно введена в процесс регулирования.

Используемая литература.

1. Зорин В. В., Тисленко В. В. Системы электроснабжения общего назначения. - Чернигов: ЧГТУ, 2005 год. -341 с.

2. Компенсация реактивной мощности. Константинов Б. А. Зайцев Г. З. Компенсация реактивной мощности. Л., "Энергия", 1976. 104 с.