

УДК 621.3.05

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЭС ОПТИМИЗАЦИЕЙ БАЛАНСА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Денисевич Д.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Петруша Ю.С.

### Введение

В отличие от активной мощности реактивная мощность может генерироваться не только генераторами электростанций, но и устройствами, которые называются компенсирующими (КУ). Эти устройства располагают в непосредственной близости от потребителей. К ним относятся:

- синхронные компенсаторы (СК);
- батареи конденсаторов (БК);
- статические источники реактивной мощности (СТК или ИРМ).

Опыт эксплуатации показывает, что при номинальной нагрузке генераторы ЭС вырабатывают около 60 % требуемой реактивной мощности, 20 % генерируется линиями электропередач высокого напряжения, 20 % вырабатывают компенсирующие устройства.

Выработка 1 квар реактивной мощности на ЭС стоит в несколько раз дешевле, чем ее выработка с помощью КУ. Но технико-экономические расчеты показывают, что большая часть реактивной мощности должна вырабатываться КУ. Это объясняется внедрением мощных генераторов с относительно высоким  $\cos \varphi$ , ростом протяженности и напряжения передачи. Поэтому снижается экономичность выработки реактивной мощности генераторами ЭС.

Компенсация реактивной мощности применяется для следующих целей:

- для выполнения баланса реактивной мощности;
- для снижения потерь мощности и электроэнергии;
- для регулирования напряжения.

При использовании КУ необходимо учитывать ограничения их мощности по техническим и режимным требованиям. Мощность КУ должна удовлетворять:

- необходимому резерву мощности в узлах нагрузки;
- располагаемой реактивной мощности на ЭС;
- отклонению напряжения на шинах потребителей;
- пропускной способности ЛЭП.

Для уменьшения перетоков реактивной мощности по ЛЭП и трансформаторам КУ должны размещаться вблизи мест потребления реактивной мощности. При этом элементы сети разгружаются по реактивной мощности. Это приводит к уменьшению потерь мощности и напряжения.

### 1 Современные конденсаторы и конденсаторные батареи

#### 1.1 Устройство высоковольтного косинусного конденсатора

Рассмотрим конструкцию высоковольтного однофазного конденсатора фирмы NOKIAN CAPACITORS, как на рисунке 1.1.

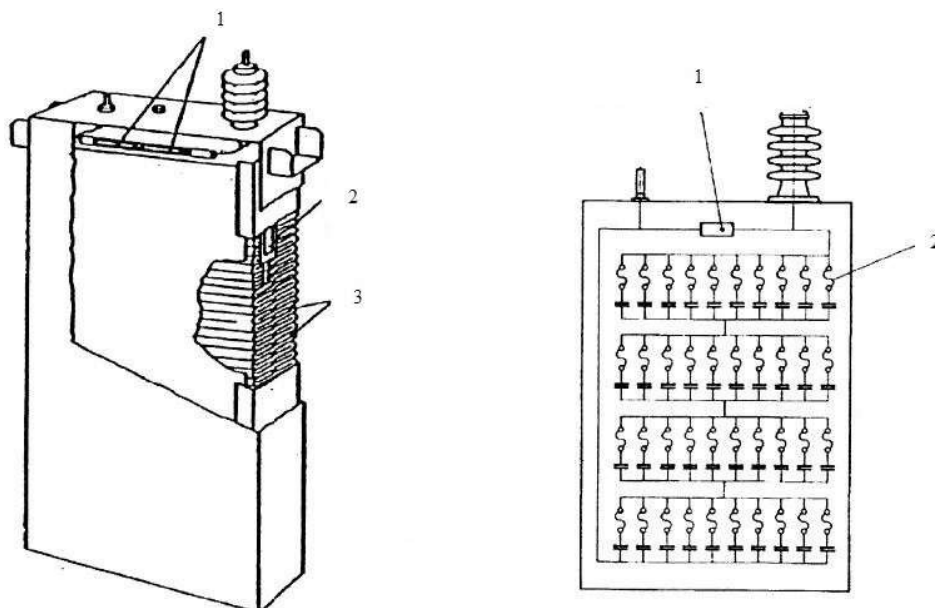


Рисунок 1.1 – Устройство высоковольтного косинусного конденсатора 1 – разрядный резистор; 2 – предохранитель элемента; 3 – элементы (10 элементов параллельно, 4 группы последовательно).

Конденсатор состоит из последовательно-параллельно соединенных элементов

Пластины конденсатора изготовлены из алюминиевой фольги. Диэлектриком служит полипропиленовая пленка, толщина которой составляет 10-18 мкм в 2-3 слоя.

У каждого элемента есть встроенный предохранитель, при перегорании которых емкость конденсатора уменьшается на 1,5-3% в зависимости от мощности конденсатора.

Конденсатор имеет встроенное разрядное сопротивление.

Корпус конденсатора с одним выводом находится под напряжением. Важнейший параметр конденсатора – отклонение емкости от номинальной. Оно должно быть в пределах (5-10) %.

Конденсаторы косинусные высоковольтные применяются в электрических установках переменного тока частотой 50 Гц с целью увеличения значения коэффициента его мощности, а также при комплектации различных конденсаторных установок. Использование конденсаторного оборудования направлено на решение таких проблем, как:

- низкий мощностной показатель генераторов и трансформаторов;
- скачки в инженерных сетях (электропередача).

Современные косинусные конденсаторы снабжены предохранителями, оберегающими корпус на случай аварийной эксплуатации, вызванной превышением напряжения. Предельно допустимое превышение напряжения – 110 %, а силы тока – 130 %.

**1.2 МКР (металлопленочные) конденсаторы производства компании Electronicon**

Конденсаторы, наполненные PUR-смолой, выполняются из металлизированной алюминиево-цинковой полипропиленовой пленки с самовосстанавливающимся диэлектриком. Для того, чтобы избежать превышения давления, конденсаторы монтируются в алюминиевый корпус, в соответствии с рисунком 1.2

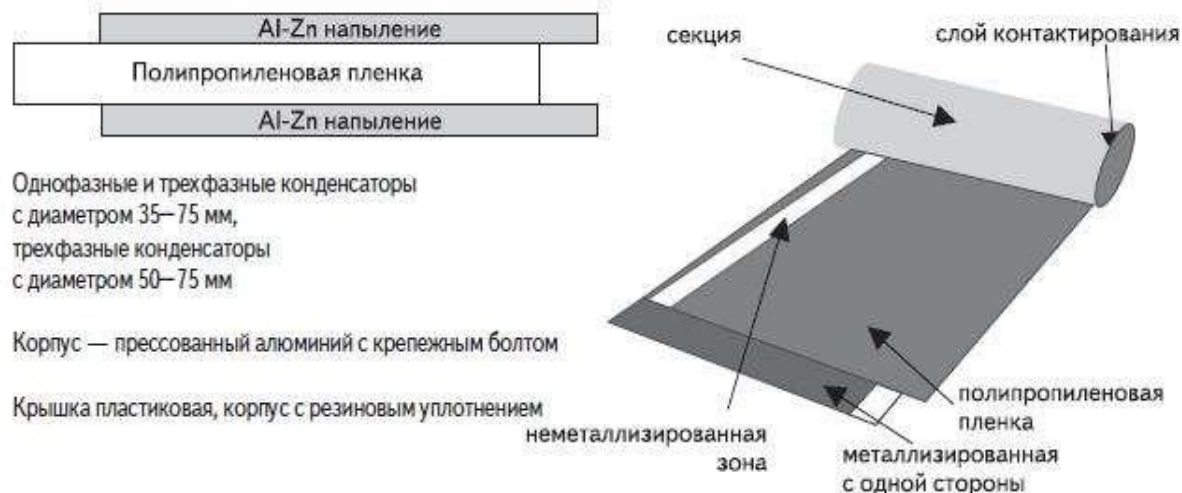


Рисунок 1.2 – устройство металлопленочного конденсатора, который выполнен по технологии МКР/МКРg

Для того, чтобы гарантировать низкоиндуктивный контакт и высокую токовую нагрузку между выводами и секцией, методом напыления металлизуются обе торцевые стороны секции. Прессованный алюминий используется для корпуса конденсатора с крепежным болтом.

Преимущества конденсаторов МКР

- меньшие габаритные размеры в сравнении с конденсаторами, применяемыми ранее.
- большее нагрузочное напряжение (при соответствующей толщине диэлектрика)
- меньшая стоимость (отсутствует необходимость дорогостоящей сушки в вакууме, поскольку отсутствует бумажная прокладка.)
- экологичны;
- герметичность;
- способ монтажа не влияет на рабочие свойства;
- меньший вес, в сравнении с МРР;
- надежность;

МКРg — новое поколение сухих конденсаторов производства компании Electronicon. Отличаются от конденсаторов МКР материалом между обкладками конденсатора. Это пространство заполнено газом, что позволяет уменьшить удельную массу конденсаторов

### 1.3 Конденсаторные установки производства компании ЭЛПРИ

С 1998 года компания ООО «ЭЛПРИ» выпускала установки типа УККРМ2-УККРМ4, после 2005 в производство поступили УККРМ-5, рассчитанные на напряжение 380 В. Начиная с 2007 года, выпускаются установки УККРМ-6 и УККРМ-7, работающие на напряжениях 660 В и 10 кВ соответственно.

Особенности УККРМ:

- Силовые модули расположены в металлических шкафах. Их конструкция позволяет увеличивать мощность УККРМ, а также упрощает ремонт, поскольку элементы установки можно легко заменить.
- На предприятии выполняется сборка комплектующих УККРМ, а подключение и монтаж установки производится на месте их размещения.
- Конденсаторы, применяемые в установках, имеют защиту от коротких замыканий и перенапряжений, а также наполнены экологически чистым инертным газом.
- Охлаждение тепловыделяющих элементов внутри шкафа осуществляется вентиляторами.
- регулирование РМ осуществляется в широком диапазоне и с высокой точностью про помощи микропроцессорного регулятора РМ.

Технические параметры.

Номинальная мощность УККРМ варьируется от 100 до 3600 квар, а номинальное напряжение питающей сети от 380 В до 10 кВ в зависимости от типа установки, частота 50 Гц.

Настраиваемые параметры:

Требуемый коэффициент мощности – от 0,80 индуктивного характера до 0,90 емкостного. Стандартная коэффициента мощности – 0,98 индуктивного характера.

Время переключения ступеней – 5с.

Блокировка повторного включения ступени – 5с.

Установка величины ступеней и способа подключения – автоматически или вручную [8].

## 2 Компенсация реактивной мощности

### 2.1 Поперечная компенсация

Поперечная компенсация применяется для уменьшения перетоков реактивной мощности в сети. В этом случае БК подключают параллельно нагрузке на шины 6-10 кВ подстанций. Это приводит к уменьшению потерь напряжения и мощности во всей сети до места подключения батарей конденсаторов. Рассмотрим этот случай на примере простейшей сети, показанной на рисунке 2.1.

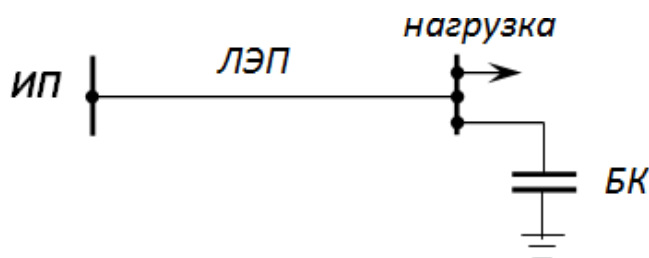


Рисунок 2.1 – Участок сети

На рисунке 2.2 приведены схемы замещения и распределение мощности до и после подключения БК.

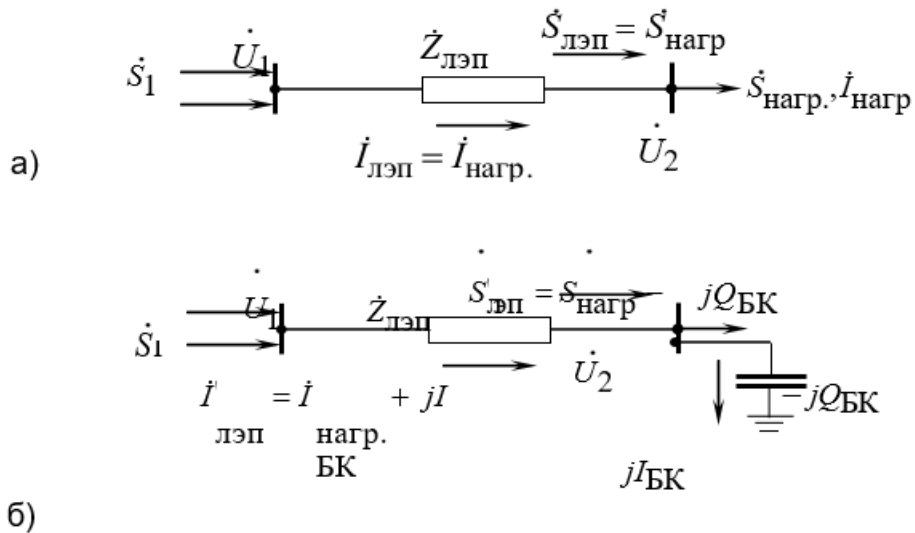


Рисунок 2.2 – Схема замещения сети:  
 а) – без БК; б) – с БК

Параметр	Без БК	С БК
Мощность	$\underline{S}_{\text{лэп}} = \underline{S}_{\text{нагр}} = P_{\text{нагр}} + jQ_{\text{нагр}}$	$\underline{S}_{\text{лэп}} = \underline{S}_{\text{нагр}} = P_{\text{нагр}} + j(Q_{\text{нагр}} - Q_{\text{БК}})$
Ток	$\underline{I}_{\text{лэп}} = \underline{I}_{\text{нагр}} = I_{\text{нагр а}} - jI_{\text{нагр р}}$	$\underline{I}_{\text{лэп}} = \underline{I}_{\text{нагр}} = I_{\text{нагр а}} + j(I_{\text{нагр р}} - I_{\text{БК}})$
Потеря мощности	$\Delta P = \frac{P_{\text{нагр}}^2 + Q_{\text{нагр}}^2}{U_{\text{нагр}}^2} \cdot R_{\text{лэп}}$	$\Delta P = \frac{P_{\text{нагр}}^2 + (Q_{\text{нагр}} - Q_{\text{БК}})^2}{U_{\text{нагр}}^2} \cdot R_{\text{лэп}}$
Потеря напряжения	$\Delta U = \frac{P_{\text{нагр}} \cdot R_{\text{лэп}} + Q_{\text{нагр}} \cdot X_{\text{лэп}}}{U_{\text{нагр}}}$	$\Delta U = \frac{P_{\text{нагр}} \cdot R_{\text{лэп}} + (Q_{\text{нагр}} - Q_{\text{БК}}) \cdot X_{\text{лэп}}}{U_{\text{нагр}}}$

При уменьшении нагрузки колебания напряжения остаются неизменными, как до компенсации, так и после, но уровень напряжения будет выше. (из соотношения), поскольку уменьшение потери напряжения зависит только от  $Q_{\text{БК}}$  и  $X_{\text{лэп}}$ , которые являются постоянными величинами. Отсюда можно сделать вывод, что при поперечной компенсации уровень напряжения в сети повышается на постоянную величину и зависит от реактивного сопротивления элементов и мощности БК.

Векторные диаграммы токов и мощностей показаны на рисунке 2.3

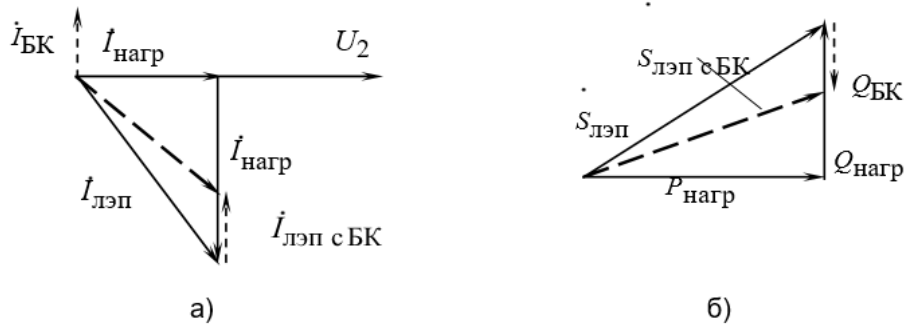


Рисунок 2.3 – Векторные диаграммы:

а) – токов;

б) – мощностей

Векторная диаграмма напряжений приведена на рисунке 2.4

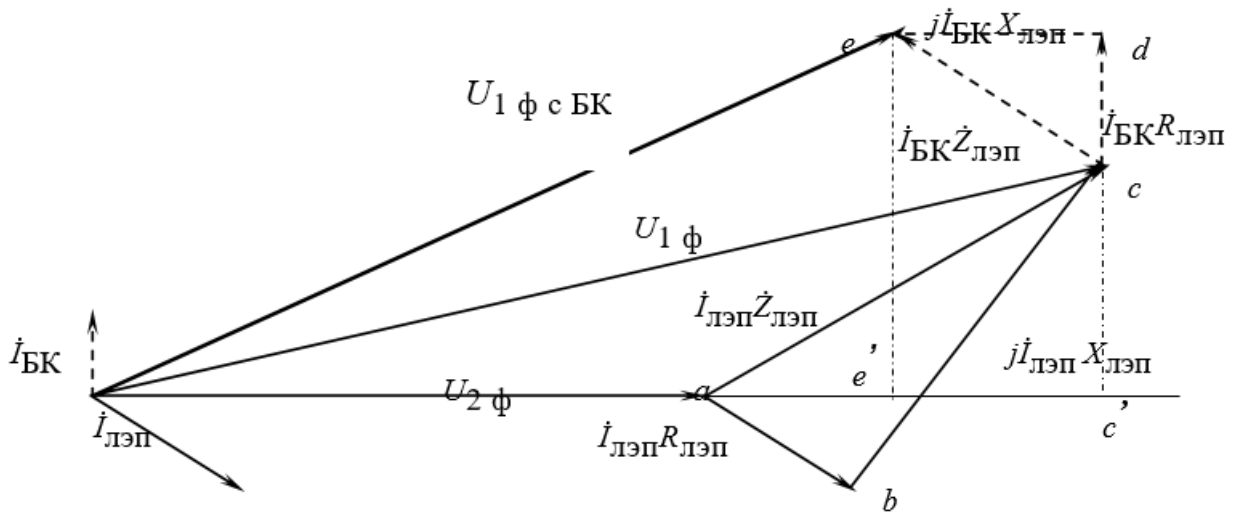


Рисунок 2.4 – Векторная диаграмма напряжений

Сложив напряжение в конце передачи с падением напряжения в реактивном и активном сопротивлениях линий электропередач от тока нагрузки, получим значение падение напряжения в начале передачи. На ВД это треугольник  $abc$ .  $U_{1\phi}$  – есть величина фазного напряжения в начале передачи до подключения конденсаторной установки. Отрезок  $ac'$  численно равен потере напряжения в сети.

Для того, чтобы определить величину  $U_{1\phi}$  с БК необходимо достроить треугольник  $cde$ . Это треугольник падения напряжения от тока батарей конденсаторов в сопротивлениях линий электропередач. Соединим точку  $e$  с точкой начала координат. Видно, что фазное напряжение в начале линий электропередач после установки батарей конденсаторов  $U_{1\phi}$  с БК по модулю меньше напряжения  $U_{1\phi}$ .

Величина потери напряжения после установки БК численно равна отрезку  $ae'$ . Сравнивая отрезки  $ac'$  и  $ae'$  можно заметить, что подключение батарей конденсаторов приводит к уменьшению потери напряжения [5].





- продольная (отрезок  $ad'$ )

$$\Delta U_{\phi}^{yнк} = I_2 [R \cos \phi_2 + (X - X_c) \sin \phi_2] \quad (2.20)$$

- поперечная (отрезок  $dd'$ )

$$\delta U_{\phi}^{yнк} = I_2 [(X - X_c) \cos \phi_2 - R \sin \phi_2] \quad (2.21)$$

Если подобрать УПК так, что  $X = X_c$ , т.е. обеспечить полную компенсацию индуктивного сопротивления ЛЭП, то падение напряжения будет определяться только величиной активного сопротивления ЛЭП:

$$\Delta U_{\phi} = I_2 R \cos \phi_2 \quad (2.22)$$

$$\delta U_{\phi} = I_2 X \cos \phi_2 \quad (2.23)$$

В этом случае напряжение в начале передачи будет равно отрезку  $ob$ . Можно найти такое значение  $X_c$ , чтобы потеря напряжения в сети равнялась нулю. Если пренебречь поперечной составляющей падения напряжения, имеем:

$$\Delta U_{\phi}^{yнк} = I_2 [R \cos \phi_2 + (X - X_c) \sin \phi_2] = 0 \quad (2.24)$$

Найдем величину  $X_c$ :

$$R \cos \phi_2 = (X - X_c) \sin \phi_2 \quad (2.25)$$

$$X_c = X + R \operatorname{ctg} \phi_2 \quad (2.26)$$

По величине  $X_c$  подбирают мощность батареи конденсаторов. На практике чаще всего не применяют полную компенсацию и сопротивление УПК рассчитывают из потери напряжения, которая обеспечивает желаемый уровень напряжения в сети

Из формулы для расчета потери напряжения с учетом УПК видно, что применение конденсаторов целесообразно при значительной реактивной составляющей тока, т.е. когда  $\operatorname{tg} \phi_2$  близок к единице. При малых значениях  $\operatorname{tg} \phi_2$  потеря напряжения в ЛЭП определяется в основном активным сопротивлением.

Достоинства УПК:

- автоматическое и безынерционное регулирование напряжения;
  - увеличение устойчивости системы;
- отсутствие движущихся частей делает установки простыми и надежными в эксплуатации;
- при одинаковом регулирующем эффекте мощность БК, выбранной только для регулирования напряжения, меньше чем при поперечной компенсации.

Недостатки:

- сложные в эксплуатации;
- дорогостоящие установки;
- возможны резонансные явления, которые вызывают качания роторов двигателей, мигание ламп накаливания;
- ограниченные возможности регулирования последовательными конденсаторами;
- увеличение токов короткого замыкания;
- при коротких замыканиях возникает опасность появления на



конденсаторах высокого напряжения. Поэтому для шунтирования БК при коротких замыканиях применяют быстродайствующие разрядники; шунтирование УПК происходит в тот момент, когда система электроснабжения больше всего нуждается ней.

### **2.3 Сравнение продольной и поперечной компенсаций**

Поперечная компенсация получила распространение для повышения коэффициента мощности промышленных предприятий. Это стало возможным благодаря:

- простоте устройства;
- простоте защиты и управления;
- простоте обслуживания и эксплуатации;
- возможности дробления мощности конденсаторных батарей;
- установке их в любом месте, где это экономически целесообразно с учетом технических и эксплуатационных условий.

При поперечной компенсации уровень напряжения повышается, но колебания напряжения при изменении нагрузки сохраняются, как и до компенсации. В часы минимума нагрузки системы напряжение на зажимах конденсаторов может оказаться выше номинального. Отклонение напряжения возрастает при совпадении минимума нагрузки предприятия с минимумом нагрузки системы. В таких ситуациях необходимо принимать меры к его снижению. Одной из мер является регулирование мощности присоединенных к сети конденсаторов автоматически или действиями эксплуатационного персонала путем отключения конденсаторной батареи полностью или частично по заранее разработанному графику.

Повторно-кратковременные и ударные нагрузки вызывают колебания напряжения на шинах источников питания, а, следовательно, и у других приемников с безударной нагрузкой. Питание таких нагрузок по отдельным линиям и даже от отдельных трансформаторов не всегда оказываются экономически целесообразными.

Продольная компенсация, повышая напряжение у приемного конца, обеспечивает колебания напряжения в меньших пределах. Ее целесообразно использовать при кратковременных и резко изменяющихся нагрузках. Включение последовательно в сеть батарей конденсаторов снижает реактивное сопротивление цепи (сети и питающего трансформатора), что приводит к увеличению токов короткого замыкания. В установках напряжением до 1000 В это обстоятельство имеет особое значение, так как не всегда удается подобрать отключающую аппаратуру с достаточной устойчивостью к токам короткого замыкания. Из-за этого нередко приходится прибегать к ограничению единичной мощности устанавливаемых трансформаторов.

Свойства поперечной и продольной компенсации разграничивают их область применения в системах электроснабжения. Продольная компенсация применяется как способ регулирования и стабилизации напряжения в электрических сетях с резкопеременными нагрузками. Поперечная компенсация применяется для повышения косинуса и для регулирования напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий.

### 3 Расчет устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности

#### 3.1 Расчет устройств поперечной компенсации

По линии напряжением 3 кВ длиной 6 км, передается активная мощность  $P = 100$  кВт при  $\cos \phi = 0,75$ . Найти мощность компенсирующего устройства поперечной компенсации, позволяющую увеличить пропускную способность линии до  $P_k = 150$  кВт без увеличения потерь напряжения. Предполагается, что дополнительные потребители подключаются с тем же  $\cos \phi$ .

Решение. Приняв из справочников удельные сопротивления, найдем сопротивления линии с учетом заданной длины:

$$R = r_0 l = 0.64 * 6 = 3.84 \text{ Ом}$$

$$X = x_0 l = 0.355 * 6 = 2.13 \text{ Ом}$$

Необходимая мощность компенсирующих устройств при  $\cos \phi = 0.75$ ,  $\text{tg} \phi = 0.882$ .

$$Q_{\text{ку}} = (P_k - P) \left( \frac{R}{X} + \text{tg} \phi \right) = (150 - 100) \left( \frac{3.84}{2.13} - 0.822 \right) = 121 \text{ квар}$$

Реактивная мощность потребителя в линии до установки компенсирующего устройства

$$Q = P \text{tg} \delta = 100 * 0.882 = 88.2 \text{ квар}$$

Реактивная мощность потребителя при  $P_k = 150$  кВт

$$Q_k = P_k \text{tg} \delta = 150 * 0.882 = 132 \text{ квар}$$

А в линии

$$Q_l = Q_k - Q_{\text{ку}} = 132 - 121 = 11 \text{ квар}$$

Потери напряжения до установки компенсирующего устройства

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{100 * 3.84 + 88.2 * 2.13}{3000} = 0.19 \text{ кВ}$$

После установки компенсирующего устройства:

$$\Delta U_k = \frac{P_k R + Q_l X}{U} = \frac{150 * 3.84 + 11 * 2.13}{3000} = 0.19 \text{ кВ}$$

т. е. потеря напряжения не изменилась, а передаваемая активная мощность увеличилась со 100 до 150 кВт.

#### 3.2 Расчет устройств продольной компенсации

Определить число и общую мощность батареи конденсаторов, включаемую в сеть последовательно и предназначенную для регулирования напряжения. В режиме максимальной нагрузки потери напряжения в сети должны быть снижены на 50%. Напряжение сети 3 кВ. Активное

сопротивление сети  $R = 4$  Ом. Реактивное сопротивление сети  $X_L = 4$  Ом. Передаваемая по линии мощность  $P = 100$  кВт. Коэффициент мощности нагрузки равен 0,8. Проверить возможность использования конденсаторов, имеющих рабочее напряжение 600 В, мощность 8,5 квар, емкость 75 мкФ.

Используя исходные данные и выражения (3.31) и (3.32), определяется необходимая емкость и реактивное сопротивление конденсаторов.

Потери напряжения до компенсации:

$$\Delta U = \frac{PR + QX_L}{U_n} = \frac{PR + PX_L \operatorname{tg} \phi}{U_n} = \frac{100 * 4 + 100 * 4 * 0.75}{3}$$

Потери напряжения после компенсации:

$$0.5 \Delta U = \frac{PR + Q(X_L - X_C)}{U_n}$$

Подставляя в последнюю формулу численные значения, получим:

$$0.5 * \frac{100 * 4 + 100 * 4 * 0.75}{3} = \frac{100 * 4 + 75 * (4 - X_C)}{3}$$

отсюда искомое емкостное сопротивление составит:

$$X_C = \frac{350}{75} = 4.67 \text{ Ом.}$$

Необходимая емкость конденсаторной батареи для одной фазы может быть определена из выражения:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

То есть:

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{10^6}{314 * 4.67} = 628 \text{ мкФ.}$$

Зная заданную емкость одного конденсатора  $C_0 = 75$  мкФ, рассчитывается нужное их число при параллельном соединении:

$$n = \frac{C}{C_0} = \frac{682}{75} = 9$$

$$n_{\Sigma} = 3n = 3 * 9 = 27$$

Рабочий ток одной фазы линии электропередачи:

$$I_{\text{раб}} = \frac{P}{\sqrt{3} U_n \cos \phi} = \frac{100}{\sqrt{3} * 3 * 0.8} = 24 \text{ А}$$

Ток в каждой ветви конденсаторной батареи:

$$I_C = \frac{I_{\text{раб}}}{n} = \frac{24}{9} = 2.67 \text{ A}$$

Сопротивление каждого конденсатора:

$$X_{C0} = \frac{1}{\omega C_0} = \frac{10^6}{314 * 75} = 42.5 \text{ A}$$

а напряжение на конденсаторах в рабочем режиме:

$$U_C = I_C X_{C0} = 2.67 * 42.5 = 113 \text{ B}$$

Общая мощность батареи конденсаторов:

$$Q_C = 3I_{\text{раб}}^2 X_C = 3 * 24^2 * 4.67 * 10^{-3} = 8.05 \text{ квар}$$

Из расчетов следует, что нет необходимости устанавливать для целей компенсации индуктивного сопротивления конденсаторы, рассчитанные на рабочие напряжения сети, так как напряжение между их обкладками определяется не рабочим напряжением сети, а произведением тока на сопротивление.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы являлся анализ технических параметров современных конденсаторов и конденсаторных установок и их использование в системах электроснабжения.

Рассмотрено влияние реактивной мощности на системы электроснабжения. Выявлены как потребители реактивной мощности, так и ее источники. Проведен анализ конденсаторов и разрядных устройств. Выявлено, что разрядные устройства необходимо ставить на батареи конденсаторов для того, чтобы обезопасить эксплуатацию. Рассмотрено устройство высоковольтных и низковольтных косинусных конденсаторов. Подробно рассмотрено устройство металлопленочных конденсаторов и их исполнение. Сделан вывод о необходимости автоматического регулирования мощности конденсаторных установок. Приведены характеристики регулируемых конденсаторных установок. Дано теоретическое обоснование продольной и поперечной компенсаций, проведен сравнительный анализ устройств компенсации. Выполнен расчет устройств продольной и поперечной компенсации.

#### Литература

1. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. М.: Томский политехнический университет, 2012, 234с.
2. Костин Н.В., Распопов Е.В., Родченко Е.А. Передача и распределение электроэнергии. М.: Северо-Западный технический университет, 2003, 145с.
3. Тимофеев А.С. Компенсация реактивной мощности. М.: СибГИУ. Новоку- нецк, 2010, 67с.
4. Герасименко А.А., Нешатаев В.Б. Оптимальная компенсация реактивной мощности в системах распределения электрической энергии. М.: Сибирский федеральный университет,

2015, 219с.

5. Железко Ю.С., Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2011, 456с.

6. Голубев И. Обзор современных конденсаторов // Современная электроника. 2010, вып. (№) 5. С. 16 – 21.

7. Юшков А. Конденсаторы Electronicon для компенсации реактивной мощности // Компоненты и технологии. 2006, вып. (№) 3. С. 3 – 4.

8. Лавров А.Г., Колпаков В. Конденсаторные установки ООО «ЭЛПРИ» - наиболее эффективное средство компенсации реактивной мощности // Сило- вая электроника. 2011, вып. (№) 3. С. 116 – 119.