Снижение потерь электроэнергии путем компенсации реактивной мощности

Основные потребители реактивной мощности:

1. Асинхронные двигатели (45 – 60 % от общей реактивной мощности предприятия);
2. Трансформаторы всех ступеней трансформации (15 – 25 %);
3. Электротехнологические установки (8 – 12 %);
4. Люминесцентные лампы (5 – 8 %).

Реактивная мощность, потребляемая трансформатором, определяется по формуле:

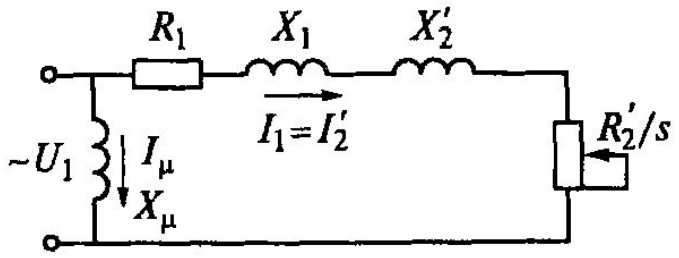
$$Q_{\text{Т}} = \Delta Q_{\text{х}} + {k_{\text{з}}}^2 \cdot \Delta Q_{\text{к}}, \text{вар}$$

Реактивная мощность, потребляемая АД при номинальной нагрузке, определяется по номинальным данным АД:

$$Q_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} tg\varphi_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = 3U_{\text{ф}} I_{1\text{ном}} sin\varphi_{\text{ном}}$$

Для определения потребления реактивной мощности при любой нагрузке необходимо знать ток холостого хода АД, который можно приравнять к току намагничивания двигателя $I_{\text{х}} = I_{\mu}$. Этот ток может быть определен экспериментально или расчетным путем:

$$I_{\mu} = I_{1\text{ном}} \left(sin\varphi_{\text{ном}} - \frac{cos\varphi_{\text{ном}}}{\lambda_{\text{м}} + \sqrt{{\lambda_{\text{м}}}^2 - 1}} \right)$$



Реактивная мощность холостого хода определяется по уравнению:

$$Q_0 = 3U_{\text{ф}} I_{\mu}$$

Реактивная мощность короткого замыкания в номинальном режиме равна:

$$\Delta Q_{\text{к}} = Q_{\text{ном}} - Q_0$$

Потребление реактивной мощности при загрузке АД с коэффициентом $k_{\text{з}}$ равно:

$$Q_{\text{АД}} = Q_0 + {k_{\text{з}}}^2 \cdot \Delta Q_{\text{к}}, \text{вар}$$

При передаче электроэнергии от источника к приемнику в системе электроснабжения имеются потери активной мощности:

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

где I – ток в фазе линии, R – сопротивление фазы линии.

Полная мощность, передаваемая по сети, равна: $S = \sqrt{3}U_л I = \sqrt{P^2 + Q^2}$

В результате после подстановки получим:

$$\Delta P = \frac{S^2}{U_л^2}R = \frac{P^2 + Q^2}{U_л^2}R = \frac{P^2}{U_л^2}R + \frac{Q^2}{U_л^2}R = \Delta P_A + \Delta P_P,$$

где $\Delta P_A = \frac{P^2}{U_л^2}R$ - потери активной мощности при передаче активной мощности

$\Delta P_P = \frac{Q^2}{U_л^2}R$ - потери активной мощности при передаче реактивной мощности

Компенсация (уменьшение) реактивной мощности позволяет уменьшить потери активной мощности и напряжения в линии, снизить ток в линии, уменьшить полную мощность трансформатора (появляется возможность подключения дополнительной мощности).

$$Q = P\left(tg\varphi_{р} - tg\varphi_{д}\right)$$ при cosφ = 0,93, $tg\varphi_{д}$ = 0,39

Снижение потерь путем увеличения напряжения требует установку высоковольтной изоляции, уменьшение сопротивления линии требует дополнительных затрат на увеличение сечения и использование материала с меньшим удельным сопротивлением, уменьшение активной мощности требует выработку электроэнергии на месте.

Для компенсации реактивной мощности уменьшают потребление реактивной мощности за счет изменения режима работы приемника или используются специальные компенсирующие устройства:

- **Конденсаторные батареи** (нашли наибольшее применение на предприятиях) $Q_{\text{к}} = \omega C {U_{\text{ном}}}^2$

достоинства – малые потери активной мощности (0,003-0,005 кВт на 1 квар); простота и дешевизна в обслуживании; низкие удельные габариты и масса; отсутствуют механические вращающиеся детали и фундамент; возможность установки вблизи к электроприемникам; возможность регулирования реактивной мощности в автоматизированных конденсаторных установках;

недостатки – зависимость генерируемой реактивной мощности от напряжения и частоты сети; чувствительность к наличию высших гармоник тока и напряжения сети (приводит к дополнительному нагреву конденсаторов). $Q_{\text{КУ}} = Q_{\text{КУном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}}\right)^2 \left(\frac{f}{f_{\text{ном}}}\right)$.

- **Синхронные двигатели** – мощностью 0,4 – 12 МВт применяются для привода компрессоров, вентиляторов, насосов. Имеют номинальный опережающий cosφ=0,9 и могут длительно работать в режиме генерации реактивной мощности. Достоинство – плавное регулирование реактивной мощности путем изменения тока возбуждения с помощью статического управляемого выпрямителя. В сетях до 1 кВ и 6 – 10 кВ целесообразно использовать для компенсации реактивной мощности СД установок и механизмов предприятия.

- **Синхронные компенсаторы** – синхронные двигатели облегченной конструкции без нагрузки на валу мощностью 5 – 75 Мвар. Достоинства – плавное и автоматическое регулирование генерируемой реактивной мощности, независимость генерации реактивной мощности от напряжения на его зажимах. Недостатки – большие потери активной мощности в них по сравнению с другими КУ, значительный шум в работе. Целесообразно применять при необходимости генерации изменяющейся во времени значительной реактивной мощности.

- **Статические тиристорные компенсаторы** – включают конденсаторные батареи с тиристорными переключателями для регулирования реактивной мощности. Также могут содержать фильтры высших гармоник напряжения и тока (фильтрокомпенсирующие устройства ФКУ). Обладают высоким быстродействием и применяются в схемах электроснабжения с резкопеременной нагрузкой.

Как правило, на предприятиях со спокойной нагрузкой для компенсации реактивной мощности применяются статические конденсаторы с регулируемой емкостью батарей и СД, работающие в режиме перевозбуждения.

Выбор КУ для конкретной сети электроснабжения осуществляется путем технико-экономического анализа, в результате которого сопоставляются снижение стоимости потерь ЭЭ и затрат на установку КУ. Наибольший экономический эффект достигается при размещении КУ в непосредственной близости от приемника (на низкой стороне трансформатора).

Единичная, групповая и централизованная компенсация реактивной мощности. ***Поперечная и продольная компенсация.***

Снижение потерь мощности в звене системы электроснабжения (например, линии), обусловленное снижением проходящей по нему реактивной мощности, может быть рассчитано по следующей формуле:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ДК}} - \Delta P_{\text{ПК}} - \Delta P_{\text{КУ}}$$

$$\Delta P = \frac{P^2 + {Q_{\text{ДК}}}^2}{U^2} R - \frac{P^2 + \left(Q_{\text{ДК}} - Q_{\text{КУ}}\right)^2}{U^2} R - \Delta P_{\text{КУ}}$$

$$\Delta P = \frac{Q_{\text{КУ}}\left(2Q_{\text{ДК}} - Q_{\text{КУ}}\right)R}{U^2} - \Delta P_{\text{КУ}},$$

Где $Q_{\text{КУ}}$ - реактивная мощность компенсирующего устройства; $Q_{\text{ДК}}$ - реактивная мощность до компенсации; R – активное сопротивление звена; U – напряжение; $\Delta P_{\text{КУ}}$ - потери мощности в компенсирующем устройстве.

Расчетные затраты на генерацию реактивной

Средние значения $\alpha_м$ для синхронных двигателей серий СДН, СТД, СД и СДЗ

Серия, номинальное напряжение и частота вращения двигателя	Напряжение на зажимах	Коэффициент загрузки β		
		0,9	0,8	0,7
СДН, 6 и 10 кВ (для всех частот вращения)	0,95 1,0 1,05	1,31 1,21 1,06	1,39 1,27 1,12	1,45 1,33 1,17
СДН, 6 кВ: 600 – 1000 об/мин 375 – 500 об/мин 187 – 300 об/мин 100 – 167 об/мин СДН, 10кВ: 1000 об/мин 250 – 750 об/мин	 1,1 1,1 1,1 1,1 1,1 1,1	 0,89 0,88 0,86 0,81 0,9 0,86	 0,94 0,92 0,88 0,85 0,98 0,9	 0,96 0,94 0,9 0,87 1,0 0,92
СТД, 6 и 10 кВ (частота вращения 3000 об/мин)	0,95 1,0 1,05 1,1	1,3 1,23 1,12 0,9	1,42 1,34 1,23 1,08	1,52 1,43 1,31 1,16
СД и СДЗ 380 В (для всех частот вращения)	0,95 1,0 1,05 1,1	1,16 1,15 1,1 0,9	1,26 1,24 1,18 1,06	1,36 1,32 1,25 1,15

Технические данные синхронных двигателей серии СДН напряжением 6 кВ, cosφ = 0,9

Тип двигателя	Номинальная мощность		КПД, %	Коэффициент, кВт	
	активная, кВт	реактивная, кВАр		D_1	D_2
1000 об/мин					
СДН-14-49-6	1000	511	95,37	5,09	3,99
СДН-14-59-6	1250	633	95,95	4,74	4,42
СДН-15-30-6	1600	812	95,75	6,65	6,8
СДН-15-49-6	2000	1010	96,06	8,06	7,53
750 об/мин					
СДН-14-46-8	800	407	94,86	4,9	4,57
СДН-14-59-8	1000	511	95,61	4,37	4,96
СДН-15-30-8	1250	637	94,84	7,73	7,29
СДН-15-49-8	1600	812	95,77	7,22	7,33
СДН-15-64-8	2000	1010	96,12	8,08	6,98
600 об/мин					
СДН-14-44-10	630	325	93,98	5,6	4,06
СДН-14-56-10	800	410	94,65	5,76	4,63
СДН-15-39-10	1000	511	94,68	7,66	5,38
СДН-15-49-10	1250	637	95,16	7,54	6,56
СДН-15-64-10	1600	812	95,78	7,79	6,99
СДН-16-54-10	2000	1010	95,66	10,7	8,68
500 об/мин					
СДН-14-36-12	400	209	92,66	3,88	2,97
СДН-14-44-12	500	257	93,45	5,05	3,63
СДН-15-34-12	630	327	93,82	5,16	4,72
СДН-15-39-12	800	412	94,15	6,48	5,54
СДН-15-49-12	1000	511	94,89	6,61	5,88
СДН-16-41-12	1250	637	94,78	8,44	6,09
СДН-16-51-12	1600	816	95,39	8,63	7,61
СДН-16-64-12	2000	1020	95,95	9,22	8,29

Технические данные некоторых типов комплектных конденсаторов установок

Тип установки	Мощность, кВАр	Количество ступеней	Удельные потери, кВт/кВАр	Удельная стоимость, у.е./кВАр	Приведенные затраты, у.е./кВАр, в год	Габариты (длина×ширина ×высота), мм
Для осветительных сетей 380 В						
УК2-0,38-50У3	50	2	0,0045	6,7	1,48	375×430×650
УК3-0,38-75У3	75	3	0,0045	5,8	1,28	580×430×650
УК2-0,38-100У3	100	2	0,0045	5,6	1,23	375×430×965
Для силовых сетей 380 В						
УКБН-0,38-100-50У3	100	2	0,0045	10,5	2,31	800×440×895
УКБТ-0,38-150У3	150	1	0,0045	8	1,76	630×520×1400
УКТ-0,38-150У3	150	1	0,0045	7,5	1,65	700×560×1660
УКБ-0,38-150У3	150	—	0,0045	6,2	1,36	580×460×1200
УКБН-0,38-200-50У3	200	4	0,0045	9,3	2,05	800×440×1685
Для силовых сетей 6 и 10 кВ						
УКМ-6,3-400-У1	400	1	0,0030	4,9	1,08	2140×860×2060
УК-6,3-450-ЛУ3	450	1	0,0030	4,1	0,90	2140×880×1800
УК-6,3-900-ЛУ3	900	1	0,0030	3,7	0,81	3540×880×1800
УК-6,3-1125-ЛУ3	1125	1	0,0030	3,7	0,81	4240×880×1800

Примечание: для сетей 10 кВ в типе установки 6,3 заменяется на 10,5.