

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни

«Системи електропостачання»

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(Електромеханіка)***

за темою № 3 – Мінімізація споживання реактивної потужності

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

Розробник: викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокарьов Д.А.
2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання КЛК ХНУВС, к.т.н., професор Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Наслідки підвищеного споживання реактивної потужності.
2. Основні визначення.
3. Способи зменшення споживання реактивної потужності.
4. Компенсуючі пристрої.
5. Вибір компенсуючих пристроїв.
6. Розміщення компенсуючих пристроїв.

Рекомендована література:

Основна література:

1. Шкрабець Ф. П. Основи електропостачання: Навч. посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2012.
2. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
3. Разумний Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. Енергозбереження: Навч.посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2005.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.І. и др. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000.
5. Василега П.О. Електропостачання: Навчальний посібник. –Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.

Допоміжна література:

1. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Суми: ВТД „Університетська книга“, 2006. -153 с.
2. Рудницький В.Г. Внутрішньоцехове електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Суми: ВТД „Університетська книга“, 2007. - 280 с.
3. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Електропостачання>
2. <https://www.ukrnafta.com/sistema-elektropostachannya>
3. <https://www.pronet.ua/sistemi-elektropostachannya/>
4. <http://web.kpi.kharkov.ua/elmarsh/wp-content/uploads/sites/108/2017/04/Elektropostachannya-promislovih-pidpriyemstv.-Pidruchnik.Milih-V.I-Pavlenko-T.P.2016.pdf>
5. <https://avenston.com/solutions/mep-systems/power-supply-systems/>

Текст лекції

1. Наслідки підвищеного споживання реактивної потужності

Більша частина промислових приймачів в процесі роботи споживає з мережі, крім активної потужності P , реактивну потужність Q . Основними споживачами реактивної потужності є асинхронні двигуни (60—65% загального споживання реактивної потужності), трансформатори (20—25%), повітряні електричні мережі, реактори, перетворювачі та інші установки (близько 10%). Залежно від характеру електроустаткування його реактивне навантаження може складати до 130% по відношенню до активної. Передача значної реактивної потужності по лініях і через трансформатори не вигідна з наступних основних причин:

1. Виникають додаткові втрати активної потужності та енергії у всіх елементах системи електропостачання, обумовлені завантаженням їх реактивною потужністю. Так, при передачі активної P реактивної Q потужностей через елемент мережі з опором R втрати активної потужності складуть

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_a + \Delta P_P.$$

Додаткові втрати активної потужності ΔP_P , викликані протіканням реактивної потужності Q , пропорційні її квадрату.

2. Виникають додаткові втрати напруги, які особливо істотні в мережах районного значення. Наприклад, при передачі потужностей P і Q через елемент мережі з активним опором R і реактивним X втрати напруги складуть

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

де ΔU_a — втрати напруги, обумовлені активною потужністю;

ΔU_P — втрати напруги, обумовлені реактивною потужністю.

Додаткові втрати напруги ΔU_P збільшують відхилення напруги на затискачах приймача від номінального значення при змінах навантажень і режимів електричної мережі. Це вимагає збільшення потужності, а отже, і вартості засобів регулювання напруги.

3. Завантаження реактивною потужністю ліній електропередачі та трансформаторів зменшує їх пропускну спроможність і вимагає додаткових заходів щодо збільшення пропускну спроможності мережі (збільшення перетинів дротів повітряних і кабельних ліній, збільшення номінальної потужності або числа трансформаторів підстанцій тощо).

Приведені міркування примушують, наскільки це технічно і економічно доцільно, наближати джерела реактивної потужності до місць її споживання. Це розвантажує значну частину ліній електропередачі та трансформаторів від реактивної потужності.

2. Основні визначення

Надалі користуватимемося наступними поняттями і визначеннями:

1. Поточне значення коефіцієнта потужності $\cos\varphi$. Величина $\cos\varphi$ може бути визначена безпосередньо за свідченнями фазометра або обчислена за даними ватметра, вольтметра і амперметра за формулою (середнє значення для трифазної системи)

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI}.$$

Поточне значення $\cos\varphi$ характеризує кут зсуву по фазі між струмом і напругою даної установки в кожний момент часу. По записах поточного значення $\cos\varphi$ можна скласти думку про те, чи стабільна величина споживаної реактивної потужності, коли можна чекати різких змін її тощо. Ці відомості необхідні для вирішення питань, пов'язаних із задачами проектування і експлуатації. Так, наприклад, не дивлячись на високий середньовзвážений коефіцієнт потужності, в установці можуть мати місце підвищені втрати активної потужності та значні відхилення напруги від номінального значення за рахунок коливань споживання реактивної потужності в часі.

2. Середньовзвážене значення коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{CB}$.

Величина $\cos\varphi_{CB}$ дає усереднене значення коефіцієнта потужності установки за який-небудь період часу. По величині $\cos\varphi_{CB}$ неможливо судити про фактичні зміни поточної величини $\cos\varphi$.

Величина $\cos\varphi_{CB}$ визначається за формулою

$$\cos\varphi_{CB} = \cos \arctg \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q dt}{\int_{t_1}^{t_2} P dt} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_p}{W_a}\right)^2}} = \cos \arctg \frac{Q_{CP}}{P_{CP}},$$

$$W_p = \int_{t_1}^{t_2} Q dt$$

де — покази лічильника реактивної енергії за час $t = t_2 - t_1$, квар*год;

$$W_a = \int_{t_1}^{t_2} P dt$$

— кількість активної енергії, споживаної приймачами за час t , кВт*год.

3. Природний коефіцієнт потужності. За величину природного коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{пр}$ приймають значення його без урахування роботи спеціальних компенсуючих пристроїв (синхронні компенсатори і конденсатори). Природний коефіцієнт потужності може характеризуватися як поточним, так і середньовзвážеним його значенням.

4. Загальний коефіцієнт потужності. За величину загального коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{заг}$ приймають його значення з урахуванням роботи компенсуючих пристроїв. Так само як і природний коефіцієнт

потужності, $\cos\varphi_{\text{заг}}$ може характеризуватися поточним або середньовзваженим значенням.

3. Способи зменшення споживання реактивної потужності

Поліпшення енергетичних показників системи електропостачання і, як наслідок, підвищення коефіцієнта потужності промислового підприємства можна досягти лише при правильному поєднанні різних способів, кожний з яких повинен бути технічно і економічно обґрунтований. Заходи щодо зменшення споживання реактивної потужності можна розділити на наступні групи:

- а) організаційні - без вживання компенсуючих пристроїв;
- б) спеціальні - вживання компенсуючих пристроїв.

Організаційні заходи щодо зменшення споживання приймачами реактивної потужності повинні розглядатися в першу чергу, оскільки для їх здійснення, як правило, не вимагається значних капітальних витрат. До них відносяться наступні:

- 1) впорядкування технологічного процесу, що веде до поліпшення енергетичного режиму устаткування;
- 2) заміна мало завантажених асинхронних двигунів двигунами меншої потужності;
- 3) зниження напруги біля двигунів, що систематично працюють з малим завантаженням;
- 4) обмеження холостої роботи двигунів;
- 5) вживання синхронних двигунів замість асинхронних у випадках, коли це можливо за умов технологічного процесу;
- 6) підвищення якості ремонту двигунів;
- 7) заміна мало завантажених трансформаторів.

Розглянемо ефективність цих заходів.

Впорядкування технологічного процесу

Цей захід пов'язаний з забезпеченням максимального використання потужностей електродвигунів та других електроприймачів, що приводить до збільшення споживання активної потужності і одночасного зменшення відносного значення реактивної потужності.

Заміна мало завантажених двигунів двигунами меншої потужності. Величина споживання реактивної потужності асинхронними двигунами залежить від коефіцієнта завантаження і номінального коефіцієнта потужності двигунів. При номінальному завантаженні і номінальній напрузі асинхронний двигун споживає реактивну потужність, рівну

$$Q_n = \frac{P_n}{\eta_{\partial.n}} \operatorname{tg} \varphi_n$$

де $\eta_{\partial.n}$ — к. к. д. двигуна при повному завантаженні.

Реактивна потужність, споживана двигуном з мережі при холостому ході, може бути знайдена з виразу

$$Q_{x.x} \approx \sqrt{3} U_n I_{x.x},$$

де $I_{x.x}$ — струм холостого ходу асинхронного двигуна.

Для двигунів з номінальним коефіцієнтом потужності $\cos \varphi_n = 0,91 - 0,93$ реактивна потужність х. х. складає близько 50% реактивної потужності при номінальному завантаженні двигуна. Для двигунів з $\cos \varphi_n = 0,77 \div 0,79$ вона досягає 70%.

Збільшення споживання реактивної потужності при повному завантаженні двигуна в порівнянні із споживанням при х. х. складає

$$\Delta Q_n = Q_n - Q_{x.x} \approx \frac{P_n}{\eta_{\partial,n}} \operatorname{tg} \varphi_n - \sqrt{3} U_n I_{x.x}.$$

При навантаженнях асинхронного двигуна, менших номінальною, приріст споживання реактивної потужності в порівнянні з холостим ходом пропорційний квадрату коефіцієнта завантаження двигуна:

$$\Delta Q = k_3^2 \Delta Q_n,$$

де $k_3 = P/P_n$ — коефіцієнт завантаження двигуна.

Таким чином, реактивна потужність, споживана двигуном при довільному завантаженні, складає

$$Q = Q_{x.x} + \Delta Q_n k_3^2.$$

Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна при довільному завантаженні виходить з виразу

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{x.x} + \Delta Q_n k_3^2}{P_n k_3} \right)^2}}.$$

Коефіцієнт потужності двигуна зменшується при зменшенні його завантаження. Наприклад, якщо для якогось конкретного двигуна при 100%-ному завантаженні $\cos \varphi = 0,8$, то при 50%-ному завантаженні $\cos \varphi = 0,65$, при 30%-ному завантаженні $\cos \varphi = 0,51$. Звідси витікає, що заміна систематично мало завантажених двигунів двигунами меншої потужності сприяє підвищенню коефіцієнта потужності електроустановки.

Умови рентабельності вимагають, щоб заміна двигуна спричиняла економічно вигідне зменшення сумарних втрат активної потужності в енергосистемі та двигуні. Для сумарних втрат $\Delta P_{\text{сум}}$ справедливий вираз

$$\Delta P_{\text{сум}} = Q k_{e,n} + \Delta P,$$

де ΔP — повні втрати активної потужності в двигуні; $k_{e,n}$ — коефіцієнт зміни витрат, кВт/квар, що задається підприємству енергосистемою.

Коефіцієнт зміни витрат $k_{e,n}$, чисельно дорівнює питомому зниженню втрат активної потужності у всіх елементах системи електропостачання (від джерел живлення до місць споживання електроенергії), що одержується при зменшенні передаваної підприємству реактивної потужності. Як показали

розрахунки, найменше значення кв.п дорівнює приблизно 0,02 (кВт/квар) для трансформаторів, приєднаних безпосередньо до шин станції.

Одержимо:

$$\Delta P_{\text{зм}} = [Q_{x.x} (1 - k_3^2) + k_3^2 Q_n] k_{\text{в.л}} + \Delta P_{x.x} + k_3^2 \Delta P_{a.n},$$

$$\Delta P_{x.x} = P_n \left(\frac{1 - \eta_{n.\partial}}{\eta_{n.\partial}} \right) \left(\frac{\gamma}{1 + \gamma} \right) \text{ — втрати активної потужності при холостому ходу двигуна, кВт;}$$

$$\Delta P_{a.n} = P_n \left(\frac{1 - \eta_{n.\partial}}{\eta_{n.\partial}} \right) \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right) \text{ — приріст втрат активної потужності в двигуні при завантаженні 100\%, кВт;}$$

$$\gamma = \frac{\Delta P_{x.x}}{\Delta P_{a.n}} \text{ — розрахунковий коефіцієнт, що залежить від конструкції двигуна і визначається з виразу}$$

$$\gamma = \frac{\Delta P_{x.x} \%}{(100 - \eta_{n.\partial} \%) - \Delta P_{x.x} \%};$$

$\Delta P_{x.x} \%$ — втрати х. х., виражені у відсотках активної потужності, споживаної двигуном при завантаженні 100%.

Досвід показав, що якщо середнє завантаження двигуна складає менше 45% номінального значення його потужності, то заміна його меншим по потужності завжди доцільна й перевірки розрахунками не вимагається. При завантаженні двигуна більше 70% номінальній потужності можна вважати, що заміна його в загальному випадку недоцільна. При завантаженні двигунів в межах від 45 до 70% доцільність заміни їх повинна бути підтверджено достатнім зменшенням сумарних витрат активної потужності в електричній системі і двигуні.

Слід зазначити, що для промислових підприємств розглядати питання про заміну двигунів меншими за потужністю доцільно тільки для двигунів, що не вбудовані в механізм. Заміна мало завантажених двигунів, вбудованих в механізм, настільки дорога і складна, що вона практично недоцільна.

Зниження напруги в мало завантажених двигунах При неможливості заміни мало завантаженого асинхронного двигуна слід перевірити доцільність зниження напруги на його затисках. Зниження напруги на виводах асинхронного двигуна до певного мінімально допустимого значення Умін приводить до зменшення споживання їм реактивної потужності (за рахунок зменшення струму намагнічування). При цьому одночасно зменшуються витрати активної потужності та, отже, збільшується к.к.д. двигуна. На практиці застосовуються наступні способи зниження напруги в мало завантажених асинхронних двигунах:

- 1) перемикання обмотки статора з трикутника на зірку;
- 2) секціонування обмоток статорів;
- 3) зниження напруги у фабрично-заводських силових мережах шляхом перемикання відгалужень знижувальних трансформаторів.

Перше уявлення про ефективність перемикання обмотки статора асинхронного двигуна з трикутника на зірку дає табл. 1.

Таблиця 1.

Номинальний коефіцієнт потужності двигуна	Відношення $\cos\varphi_Y/\cos\varphi_\Delta$ при коефіцієнтах завантаження k_3				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,78	1,94	1,8	1,64	1,49	1,35
0,80	1,85	1,73	1,58	1,43	1,30
0,82	1,72	1,61	1,46	1,32	1,22
0,84	1,72	1,61	1,52	1,37	1,26
0,86	1,66	1,55	1,41	1,27	1,18
0,88	1,60	1,49	1,35	1,22	1,14
0,90	1,57	1,43	1,29	1,17	1,10
0,92	1,50	1,36	1,29	1,11	1,06

При перемиканні двигуна з трикутника на зірку зважаючи на зменшення максимального обертаючого моменту в 3 рази необхідно проводити перевірку по граничному коефіцієнту завантаження двигуна, визначуваному умовами стійкості. Граничний коефіцієнт завантаження приблизно рівний

$$k_{з.гр} = \frac{k_{м.м}}{4,5},$$

де $k_{м.м}$ — кратність максимального обертаючого моменту по відношенню до номінального; значення $k_{м.м}$ приводяться в каталогах на двигуни.

Секціонування обмоток статорів асинхронних двигунів можна рекомендувати в тих випадках, коли неможливо здійснити перемикання обмотки статора з трикутника на зірку. Якщо двигуни виготовлені з паралельними гілками в обмотці статора, то секціонування здійснюється відносно просто шляхом перепаювання лобових з'єднань обмотки. Складніше перемкнути обмотку статора двигуна на іншу схему з'єднань, якщо вона виконана одиночним дротом. В таких випадках перемикання секцій обмотки можливе лише при капітальних ремонтах, двигунів.

Перемикання відгалужень знижувального трансформатора для зниження робочої напруги асинхронних двигунів також є нормальним експлуатаційним прийомом, направленим на зменшення споживання реактивної потужності, якщо даний трансформатор не живить одночасно інші приймачі, що не допускають зниження напруги на їх затисках.

Обмеження холостого ходу працюючих асинхронних двигунів

Робота більшості асинхронних двигунів характерна тим, що вперервах між навантаженнями вони обертаються на холостому ходу.

Для ряду споживачів час роботи двигунів на холостому ходу досягає 50 – 65% всього часу роботи. Якщо проміжки роботи на холостому ходу

достатньо великі, то доцільно на цей час відключати двигун від мережі. Споживання активної і особливо реактивної енергії при цьому значно зменшується. У разі вживання обмежувачів холостого ходу підрахунок економії робиться по графіках активної і реактивної потужності, споживаної асинхронними двигунами.

Підвищення якості ремонту асинхронних двигунів. При виконанні ремонту двигунів необхідно враховувати та точно дотримувати номінальні дані двигунів. Інакше з ремонту можуть бути випущені двигуни з підвищеним споживанням реактивної потужності, великою нерівномірністю завантаження окремих фаз, збільшеним струмом холостого ходу, значними відхиленнями від заводських обмотувальних даних та іншими серйозними недоліками. Все це створює підвищення споживання реактивної потужності і, як наслідок, збільшує втрати енергії і погіршує природний коефіцієнт потужності підприємства.

Заміна трансформаторів

Великих успіхів в підвищенні природного коефіцієнта потужності промислового підприємства можна досягти за рахунок раціоналізації роботи трансформаторів, яка проводиться шляхом їх заміни і перегруповування, а також шляхом відключення деяких трансформаторів в години малих навантажень. Якщо при цих заходах знижується споживання реактивної потужності й зменшуються втрати активної потужності, то здійснення їх, без сумніву, доцільно.

4. Компенсуючі пристрої

Зменшення споживання реактивної потужності спеціальними заходами, це застосування пристроїв компенсації. Для компенсації реактивної потужності, споживаної електроустановками промислового підприємства, можуть бути застосовані синхронні компенсатори і статичні конденсатори, а також використані наявні синхронні двигуни.

Синхронні компенсатори по суті є синхронними двигунами полегшеної конструкції без навантаження на валу. Вони можуть працювати як в режимі генерації реактивної потужності (при перезбуджуванні компенсатора), так і в режимі її споживання (при недозбудженні). Зміна значення реактивної потужності компенсатора, що генерується або споживається, здійснюється регулюванням його збудження.

У даний час промисловість виготовляє синхронні компенсатори потужністю від 5000 до 75000 квар. Втрати активної потужності в синхронних компенсаторах при їх повному завантаженні залежно від номінальної потужності коливаються в межах 0,32 — 0,15 кВт/квар, тобто складають значну величину.

До недоліків синхронних компенсаторів відносяться також дорожчання і ускладнення експлуатації (по порівнянню, наприклад, з конденсаторними батареями) і значний шум під час роботи. Позитивними властивостями синхронних компенсаторів як джерел реактивної потужності є можливість

плавного і автоматичного регулювання величини реактивної потужності, що генерується, незалежність генерації реактивної потужності від напруги на їх шини, достатня термічна і динамічна стійкість обмоток компенсаторів під час коротких замикань, можливість відновлення пошкоджених синхронних компенсаторів шляхом проведення ремонтних робіт.

Конденсатори — спеціальні ємності, призначені для вироблення реактивної потужності. За своєю дією вони еквівалентні синхронному компенсатору в режимі перезбудження і можуть працювати лише як генератори реактивної потужності. Звичайно батареї конденсаторів включаються в мережу трифазного струму по схемі трикутника. При відключенні конденсаторів необхідно, щоб запасена в них енергія розряджалася автоматично без участі чергового персоналу на активний опір, приєднаний до батареї «наглухо» (рис. 1).

Конденсатори в порівнянні з іншими джерелами реактивної потужності мають ряд переваг:

- 1) малі втрати активної потужності (0,0025 — 0,005 кВт/квар);
- 2) простота експлуатації (зважаючи на відсутність частин, що обертаються і труть);
- 3) простота виробництва монтажних робіт (мала вага, відсутність фундаментів);
- 4) для установки конденсаторів може бути використано будь-яке сухе приміщення.

Серед недоліків конденсаторів слід зазначити залежність реактивної потужності, що генерується ними, від напруги $Q = U^2 \omega C \cdot 10^{-3}$ квар; недостатню міцність (легко ушкоджуються, особливо при КЗ і напругах вище номінального).

Питома вартість 1 квар конденсаторної батареї залежить від напруги, але практично не залежить від потужності самої батареї. Тому для компенсації реактивної потужності до 10 Мвар на промислових підприємствах найбільше поширення набули конденсаторні батареї.

Установки конденсаторів бувають індивідуальні, групові та централізовані. Індивідуальні установки застосовуються частіше за все на напругах до 660 В. В цих випадках конденсатори приєднуються наглухо до затисків приймача. Такий вид установки компенсуючих пристроїв володіє істотним недоліком — поганим використанням конденсаторів, оскільки з відключенням приймача відключається й компенсуюча установка. При груповій установці конденсатори приєднуються до розподільних пунктів мережі. При цьому використання встановленої потужності конденсаторів дещо збільшується.

При централізованій установці батарей конденсаторів вони можуть приєднуватися на стороні вищої напруги трансформаторної підстанції промислового підприємства. Використовування встановленої потужності конденсаторів в цьому випадку виходить найвищим.

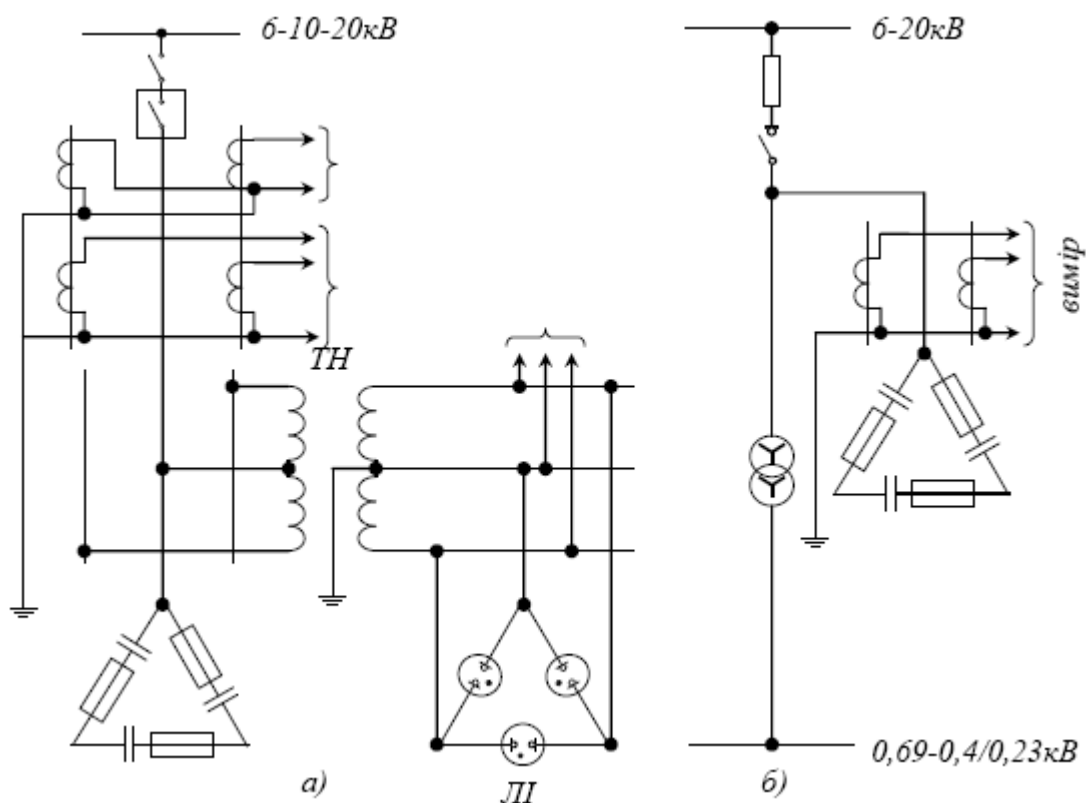


Рисунок - 1. Схема вмикання батарей статичних конденсаторів:
а — під окремий вимикач, б — під вимикач навантаження споживача.

В цьому випадку розрядним опором служить сам силовий трансформатор, ТН — трансформатор напруги, що використовується в якості розрядного опору для батареї конденсаторів, ЛП — сигнальні індикаторні лампи.

Захист конденсаторів здійснюється плавкими запобіжниками, що включаються поодиночі в ланцюг кожного з них. Крім того, батарея в цілому захищається також за допомогою запобіжників в ланцюзі батареї.

Схеми приєднання батарей конденсаторів на напругу 3 - 6 кВ дані на рис. 1. Схема на рис. 1, а забезпечує незалежність роботи батареї від роботи приймачів, але вимагає великої кількості апаратури високої напруги. На рис. 1, б батарея приєднується до ланцюга приймача наглухо і для включення батареї в цьому випадку не потрібна установка окремих вимикачів.

Щоб уникнути істотного зростання витрат на відключаючу апаратуру, вимірювальні прилади тощо не рекомендується установка батарей конденсаторів 3 - 10 кВ потужністю менше 400 квар при приєднанні конденсаторів за допомогою окремого вимикача (рис. 1, а) і менше 100 квар при приєднанні конденсаторів через загальний вимикач з силовим трансформатором, асинхронним двигуном та іншими приймачами (рис. 1, б).

Батареї конденсаторів середньої та великої потужності розділяються на секції за допомогою роз'єднувачів. Секціонування дає можливість грубого регулювання приєднаної потужності батареї, огляду і заміни елементів по

секціях без відключення всієї батареї. Звичайно батареї конденсаторів розділяються не більше ніж на дві або три однакові секції.

Синхронні двигуни. Вживання синхронних двигунів в умовах промислових підприємств може бути доцільним в наступних випадках:

- 1) установка синхронних двигунів на приводних механізмах замість асинхронних там, де це можливо за технологічних умов;
- 2) установка синхронних двигунів більшої потужності, ніж вимагає приводний механізм.

Перший захід завжди доцільний. Тому при недостатньому значенні коефіцієнта потужності слід розглянути питання про те, на яких механізмах можливе вживання синхронних двигунів замість асинхронних. Доцільність другого заходу повинна бути техніко-економічно обґрунтована шляхом порівняння з іншими варіантами підвищення коефіцієнта потужності.

5. Вибір компенсуючих пристроїв

Вибір компенсуючих пристроїв проводиться на підставі техніко-економічного порівняння варіантів. Серед технічно прийнятих варіантів економічно доцільним буде той, який забезпечує мінімум розрахункових витрат:

$$Z = C_e + 0,15K = \min.$$

При виборі засобів компенсації реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств необхідно розрізняти за функціональними ознаками дві групи промислових мереж залежно від складу їхніх навантажень: 1-а група - мережі загального призначення, мережі з режимом прямої послідовності основної частоти 50 Гц; 2-а група - мережі зі специфічними нелінійними, несиметричними й різкозмінними навантаженнями. Рішення задачі компенсації для обох груп є різними.

На початковій стадії проектування визначаються найбільші сумарні розрахункові активні та реактивні електричні навантаження підприємства P_m і Q_m при природному коефіцієнті потужності. Найбільше сумарне реактивне навантаження підприємства, прийняте для визначення потужності пристроїв, що компенсують,

$$Q_{m1} = KQ_m$$

де K – коефіцієнт, що враховує розбіжність за часом найбільших активного навантаження енергосистеми й реактивної потужності промислового підприємства.

Значення коефіцієнта розбіжності K для всіх об'єднаних енергосистем приймаються відповідно до галузей промисловості:

Нафтопереробна, текстильна.....	0,95
Чорна та кольорова металургія, хімічна, нафтовидобувна, харчова, будівельних матеріалів, паперова.....	0,90
Вугільна, газова, машинобудівна та металообробна.....	0,85

Торфопереробна, деревообробна.....	0,80
Інші.....	0,75

Значення найбільших сумарних реактивного $Q_{\Sigma 1}$ та активного P_{Σ} навантажень передаються в енергосистему для визначення значення економічно оптимальної реактивної (вхідної) потужності, що може бути передана підприємству в режимах найбільшого і найменшого активного навантаження енергосистеми, відповідно Q_{E1} та Q_{E2} . За вхідною реактивною потужністю Q_{E1} визначається сумарна потужність пристроїв, що компенсують, для підприємства, а відповідно до заданого значення Q_{E2} – регульована частина пристроїв, що компенсують.

Сумарна потужність пристроїв, що компенсують, $Q_{\Sigma 1}$ визначається необхідним балансом реактивної потужності на межі електричного розподілу підприємства і енергосистеми у період її найбільшого активного навантаження:

$$Q_{\Sigma 1} = Q_{\Sigma 1} - Q_{E1}$$

Для промислових підприємств з приєднаною сумарною потужністю трансформаторів менше 750 кВ·А значення потужності пристроїв, що компенсують, $Q_{\Sigma 1}$ задається безпосередньо енергосистемою і є обов'язковим при виконанні проекту електропостачання промислового підприємства. За узгодженням із енергосистемою, яка видала технічні умови на приєднання споживачів, допускається приймати більшу в порівнянні із $Q_{\Sigma 1}$ сумарну потужність пристроїв, що компенсують (відповідно менше значення $E1 Q$), якщо це знижує наведені витрати на систему електропостачання в цілому по підприємству.

На підприємстві зі специфічними навантаженнями засоби компенсації повинні забезпечувати належні показники якості електроенергії в електроприймачах і на межі електричного розподілу підприємства та енергосистеми. При живленні від окремого вузла мережі підприємства тільки специфічних електроприймачів допускається перевищення нормованих показників якості електроенергії у цьому вузлі за умови забезпечення нормальної роботи інших електроустановок у системі електропостачання підприємства.

Як показують розрахунки, при потужності компенсуючого пристрою менше 5000 квар при напрузі 6 кВ і 10000 квар при напрузі 10кВ економічно доцільною є установка статичних конденсаторів. Якщо необхідна потужність компенсуючого пристрою більше вказаних величин, то слід виконати техніко-економічні розрахунки, враховуючи графік споживання реактивного навантаження і вимоги енергосистеми з метою виявлення ефективності вживання синхронних компенсаторів.

6. Розміщення компенсуючи пристроїв

Після попереднього орієнтовного визначення необхідної потужності та вибору типів компенсуючих пристроїв виникає задача оптимального розподілу їх в мережі електропостачання промислового підприємства. Від вибору місця установки компенсуючого пристрою залежать його вартість і величина втрат електричної енергії. Найменша вартість конденсаторних установок виходить при розміщенні їх в мережі напругою 6 – 10 кВ, проте втрати електричної енергії в мережах промислового підприємства при цьому будуть максимальними зважаючи на передачу значної кількості реактивної потужності по мережах напругою нижче 6 – 10 кВ.

Оптимальному розміщенню компенсуючих установок відповідає технічно прийнятний варіант з мінімальними розрахунковими витратами. Оптимальні вибір і розміщення пристроїв, що компенсують, у системі електропостачання промислових підприємств дозволяють не тільки знизити втрати активної потужності й енергії в розподільних і живильних мережах, але одночасно підвищити рівень напруги на затискачах приймачів електричної енергії. Відхилення напруги від номінального значення впливає й на техніко-економічні показники системи електропостачання, і на кількісні і якісні показники продукції, що випускається. Тому завдання визначення раціонального ступеня компенсації реактивних навантажень і регулювання напруги в електричних мережах повинні вирішуватися спільно.

Спільний вибір компенсуючих і регулюючих пристроїв являє собою складне завдання. Складність її обумовлена великій кількістю взаємозалежних факторів. Так, підвищення напруги в технічно припустимих межах для промислових підприємств з великим числом асинхронних двигунів і електротермічних установок викликає прискорення технологічного процесу й, як наслідок, підвищення продуктивності промислових механізмів. З іншого боку, підвищене напруга викликає додаткове споживання активної й реактивної потужностей, що приводить до зростання втрат активної потужності й енергії, скороченню терміну служби елементів системи електропостачання. Можна вказати цілий ряд інших прикладів подібного роду взаємозалежних факторів, у багатьох випадках суперечливих по своїй природі.

Тому рішення питань оптимального вибору й розміщення пристроїв, що компенсують, в електричних мережах промислових підприємств із урахуванням економічних збитків від низької якості напруги може бути здійснене на основі системного підходу, який би враховував весь комплекс виникаючих при цьому взаємозалежних факторів і зв'язків. У зв'язку із цим становить інтерес побудова комплексних математичних моделей, у яких повною мірою відбиті як питання компенсації реактивних навантажень, так і питання оптимального регулювання напруги з урахуванням народногосподарських збитків від низької якості напруги:

$$3(Q, U) = 3_{\kappa} + 3_{\nu} \rightarrow \min.$$

Необхідно вказати на два можливих підходи до рішення поставленого завдання:

– рішення визначається з урахуванням дійсної зміни напруги й дійсних графіків реактивних навантажень у характерних вузлах системи електропостачання. Така постановка завдання вимагає знаходження не тільки оптимальних значень потужностей пристроїв, що компенсують, і макет їхньої установки, але й визначення закону регулювання цими установками;

– більше спрощений підхід заснований на використанні числових статистичних характеристик досліджуваних процесів (математичне очікування відхилення напруги й реактивних навантажень) і припускає установку нерегульованих пристроїв, що компенсують.

Однією з умов успішного рішення цільової функції є побудова техніко-економічних характеристик вузлів навантаження, що представляють собою математичне вираження сумарних збитків на шинах цехової підстанції у функції зміни рівня напруги. Такі характеристики дозволяють визначити не тільки оптимальний рівень напруги розподільної, але й проаналізувати можливі відхилення від оптимуму, викликані наявністю складової 3_k .

Якщо відомо оптимальний рівень напруги на вторинній стороні цехового трансформатора, то можна визначити раціональна напруга на шинах ГЗП (ЦРП)

$$U_{p.ГПП} = U_{opt. тп} + \Delta U_{\Sigma} - \delta U_{\Sigma}.$$

де ΔU_{Σ} – сумарні втрати напруги в лініях і трансформаторах системи електропостачання; δU_{Σ} – сумарна добавка напруги за рахунок трансформатора, лінійного регулятора й т.п.

Аналізуючи наведене вираження, укажемо можливі шляхи регулювання напруги:

– безпосередній вплив на величину напруги, сюди ставляться перемикання обмоток трансформаторів цехових ТП (сезонні) і ГЗП (добові);

– непряме регулювання здійснюється за допомогою зміни параметрів і режимів роботи електричної мережі, найчастіше зміною коефіцієнта реактивної потужності $tg \varphi$ або потужності встановлених компенсуючих пристроїв

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n \frac{P_i R_i + (Q_i - Q_{куі}) x_i}{U_{ном}} = \sum_{i=1}^n \Delta U_a + \sum_{i=1}^n \Delta U_p,$$

де ΔU – сумарні втрати напруги на n ділянках мережі; P_i , Q_i – активна й реактивна потужності, передані по i-ой ділянці мережі; R_i , x_i – активний і реактивний опори i-ой ділянки мережі; $Q_{куі}$ – потужність пристрою, що компенсує, встановленого наприкінці i-ої ділянки; $U_{ном}$ – номінальна напруга мережі.

Для попереднього орієнтування в питанні про технікоєкономічне обґрунтовування розміщення компенсуючих пристроїв слід користуватися наступними положеннями з Керівних вказівок:

1. На підприємствах, що мають силові мережі 0,66 кВ, як правило, повинні встановлюватися конденсатори на напругу 0,66 кВ.

Якщо на цих підприємствах є асинхронні двигуни високої напруги, то для компенсації їх реактивних навантажень доцільна установка конденсаторів на напругу 6 – 10 кВ.

2. На підприємствах, що мають силові мережі 0,38 кВ, найвигіднішою може виявитися або змішана установка конденсаторів 0,38 і 6 – 10 кВ, або установка конденсаторів тільки 0,38 кВ. Вибір варіанту проводиться на підставі техніко-економічних розрахунків і зіставлень.

3. На підприємствах, що мають силові мережі 0,22 кВ, допускається установка конденсаторів на напругу 0,22 кВ, якщо природний коефіцієнт потужності на стороні 0,22 кВ менше 0,7. При коефіцієнті потужності вище 0,7 слід встановлювати конденсатори 6 — 10 кВ.

4. Конденсатори 0,22 — 0,5 кВ повинні встановлюватися з дотриманням вимог пожежної безпеки біля групових щитків, оскільки централізована установка конденсаторів на трансформаторних підстанціях, як правило, менш доцільна. В тих випадках, коли є необхідність в розвантаженні силових трансформаторів, а установка конденсаторів напругою 0,22 — 0,5 кВ біля групових щитків чого-небудь неможлива, допускається централізована установка цих конденсаторів.

5. Потужність батареї конденсаторів, встановлюваних біля групового щитка, рекомендується приймати не менше 30 квар щоб уникнути істотного зростання витрат на відключаючу апаратуру, вимірювальні прилади і настановну шафу.

Контрольні питання

1. До яких електричних ланцюгів застосовується поняття “реактивна потужність”?

2. Який напрямок має реактивна потужність (РП)?

3. У чому різниця балансу активних та реактивних потужностей?

4. Як розрізняють споживачів та джерела реактивної потужності у системах електропостачання?

5. Коефіцієнт потужності та способи його підвищення.

6. Синхронні компенсатори.

7. Переваги батареї статичних конденсаторів, як джерел РП?

8. Назвіть основні джерела РП у системах електропостачання підприємств.

9. Як оцінюються витрати на передачу РП?

10. Сформулюйте задачу вибору потужності компенсуючих установок у загальному вигляді.

11. Поясніть суть підходу при виборі потужності компенсуючих установок у мережах до 1кВ.

12. Як визначається реактивна потужність, що видається споживачу енергосистемою?

13. Якими критеріями керуються при розподілі потужності компенсуючих установок у мережах підприємства?