

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Київський університет економіки і технологій транспорту

*У статті викладено проблеми пов'язані з низьким рівнем якості електроенергії на залізничному транспорті, математичні моделі для розрахунку реактивної потужності та методи компенсації її за допомогою статичних та динамічних конденсаторних установок.*

**Актуальність теми.** Якість електроенергії значним чином залежить від величини реактивної потужності. Економічне значення коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$  полягає в тому, що від його величини певним чином залежать капітальні й експлуатаційні витрати, а також ефективність використання устаткування електричних установок.

**Мета роботи:** розгляд впливу реактивної потужності на електричні мережі і доведення ефективності використання автоматизованих систем компенсації зсуву фаз в умовах залізничного транспорту.

### Вступ

Для електропостачання будь-яких підприємств необхідні електростанції, лінії електропередачі й розподільчі пристрої. Діяльність електричних компаній зосереджена на процесах виробництва, перетворення, розподілення й передачі електричної енергії.

Ця схема повною мірою відноситься й до тягового електропостачання. Однак окремі процеси й компоненти установок тут мають свої особливості, що характерні саме для даної області застосування. Так, замість звичайних для стаціонарних побутових споживачів розеток та вилок, мобільні споживачі (тяговий рухомий склад) використовують контактний провід й струмоприймач. Та ця особливість нічого не змінює в основній схемі електропостачання: виробництво електроенергії – передача – розподіл – споживання.

Купівля, продаж і розрахунки – це процеси, що супроводжують фізичний процес постачання електроенергії, для

якого необхідні електротехнічні пристрої. Таким чином, низькі капітальні витрати й ефективна експлуатація електротехнічних установок є основою успішної діяльності підприємств електропостачання. Виконання цих умов дозволяє задовольняти потреби клієнтів в електроенергії з урахуванням ринкової кон'юнктури.

Якість електроенергії залежить від величини реактивної потужності. Економічне значення коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$  полягає в тому, що від його величини залежать капітальні й експлуатаційні витрати, а також ефективність використання устаткування електричних установок.

### 1. Вплив $\cos \varphi$ на технічні показники

Для з'ясування впливу коефіцієнта потужності на економічні показники електротехнічних установок розглянемо приймач енергії, що працює з постійною активною потужністю при постійній напрузі в мережі.

Струм у приймачі, а отже, і в проводах, що з'єднують його з генератором електричної енергії, при цих умовах залежить від  $\cos \varphi$  [1-2]:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi,$$

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi},$$

де  $I$  – струм у приймачі;

$U$  – напруга на затискачах споживача;

$P$  – активна потужність споживача;

$\varphi$  – зсув фази між струмом та напругою.

Чим менше  $\cos \varphi$  приймача, тим більший струм повинен бути в самому приймачі, у генераторі, у з'єднуючих проводах, трансформаторі й інших елементах мережі електропостачання.

Потужність теплових втрат, відповідно до закону Джоуля-Ленца, пропорційна опору проводів й квадрату струму [1-2]:

$$\Delta P = I^2 \cdot r,$$

де  $r$  – опір живлячих проводів.

Очевидно, чим більше струм приймача, тим більше втрата енергії в електричному ланцюзі. Вартість втраченої енергії входить в експлуатаційні витрати. Збільшення  $\cos \varphi$  приймачів веде до зменшення струму, скороченню втрат енергії й скороченню експлуатаційних витрат.

Якщо електротехнічна установка спроектована з відносно низьким  $\cos \varphi$ , то устаткування (комутаційна апаратура, прилади для контролю й ін.) і провід повинні бути розраховані на більший струм, ніж при високому  $\cos \varphi$ . Це значить, що устаткування повинне бути більших розмірів, а провід – більшого перетину.

Збільшення коефіцієнта потужності приймачів енергії приводить до скорочення капітальних витрат.

Генератори електричної енергії й трансформатори характеризуються номінальною потужністю, що визначається добутком номінальних значень напруги й струму:

Якість електроенергії значним чином залежить від величини реактивної потужності. Економічне значення коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$  полягає в тому, що від його величини певним чином залежать капітальні й експлуатаційні витрати, а також ефективність використання устаткування електричних установок [1-2].

$$S_n = U_n \cdot I_n.$$

Найбільш повне використання генераторів і трансформаторів відповідає режиму роботи з номінальним струмом при номінальній напрузі (особливі випадки, коли допускається деяке перевантаження

устаткування при експлуатації, тут не враховуються).

Величина активної потужності генератора визначається не тільки напругою й струмом, але й  $\cos \varphi$ , величина якого залежить від приймача енергії:  $P = UI \cos \varphi$ .

Якщо приймач має  $\cos \varphi = 1$ , то генератор може розвивати активну потужність, що дорівнює його номінальній потужності, тобто основна функція генератора – перетворення енергії – може бути виконана найбільш повно, а первинний двигун – турбіна, також розрахований на номінальну потужність, буде працювати з повним навантаженням [1].

При  $\cos \varphi < 1$  активна потужність менше номінальної, хоча генератор буде працювати при номінальних значеннях напруги й струму. Таким чином, генератор по потужності виявляється недовантаженим. Не завантажений повністю й первинний двигун. Недовантаження турбіни й генератора приводить до зниження їхнього коефіцієнта корисної дії.

## 2. Підвищення коефіцієнта потужності

З огляду на економічне значення коефіцієнта потужності, необхідно приймати міри для його підвищення: у першу чергу, правильний вибір потужності двигунів змінного струму й трансформаторів і раціональна експлуатація, без недовантаження й роботи вхолосту [1].

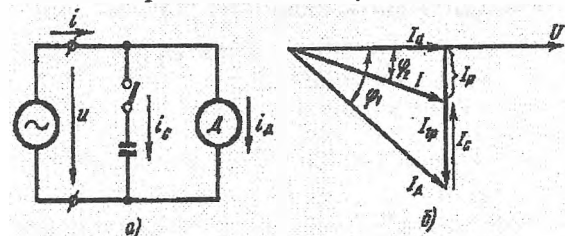


Рис. 1. Схема й векторна діаграма ланцюга паралельного з'єднання двигуна й батареї конденсаторів

У тих випадках, коли ці засоби не можуть забезпечити належного значення коефіцієнта потужності установки, вживають інші заходи його підвищення.

Одним з таких заходів є паралельне включення до приймачів батареї конденсаторів

саторів (рис. 1). Для визначення необхідної величини ємності й потужності батареї конденсаторів потрібно виконати розрахунок, вихідними даними якого є:

$P$  – активна потужність приймача (установки в цілому);

$U$  – напруга в мережі;

$\cos \varphi_1$  й  $\cos \varphi_2$  – середньозважений коефіцієнт потужності до й після підвищення.

Метод розрахунку впливає з векторної діаграми (рис. 1, б), побудованої для схеми (рис. 1, а), на якій паралельно приймачу, наприклад групі асинхронних двигунів, може бути включена конденсаторна батарея. До включення конденсаторів струм у проводах,  $I_d$  відстає по фазі від напруги на кут  $\varphi_1$ . Після включення батареї реактивна складова  $I_{1p}$  струму двигунів частково компенсується ємнісним струмом  $I_c$ , у зв'язку із чим струм у проводах, зменшується до  $I$ , а кут зсуву фаз – до  $\varphi_2$  (в обмінному енергетичному процесі між генератором і приймачем бере участь менша кількість електромагнітної енергії) [1].

Активна складова струму в проводах не змінюється, отже, по активній потужності режим роботи ланцюга залишається колишнім:

$$I \cdot \cos \varphi_2 = I_d \cdot \cos \varphi_1.$$

Щоб збільшити коефіцієнт потужності від  $\cos \varphi_1$  до  $\cos \varphi_2$ , струм конденсатора повинен мати величину [1]:

$$I_c = I_d \cdot \sin \varphi_1 - I \cdot \sin \varphi_2,$$

$$I_d = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi_1},$$

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi_2},$$

$$I_c = \frac{P}{U} \left( \frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} - \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2} \right) = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

Ємність конденсатора [1]

$$C = \frac{I_c}{\omega \cdot U}.$$

Потужність конденсаторів [1]

$$Q_c = U \cdot I_c.$$

Неважно помітити, що потужність конденсаторів можна визначити, не підраховуючи струму  $I_c$ :

$$Q_c = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

Тоді

$$C = \frac{Q_c}{\omega \cdot U^2}.$$

### 3. Математична модель розрахунку трифазної мережі з можливістю включення конденсаторної батареї

В цьому розділі створимо математичну модель розрахунку струмів по фазах у трифазній мережі з можливістю компенсації реактивної потужності шляхом ввімкнення паралельно з активно-індуктивним навантаженням батареї конденсаторів.

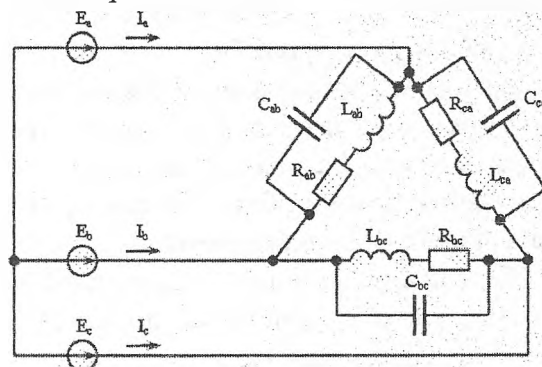


Рис. 2. Зведена принципова схема трифазної системи з навантаженнями зібраними за схемою трикутника

В трифазних мережах загального користування та в тому числі залізниці навантаження представляє собою активну та індуктивну складові, що ввімкнені послідовно. Це зображено на рис. 2,  $L$  та  $R$  в різних плечах трикутника.

Для компенсації реактивної потужності з активно-індуктивним характером мережі на схемі наведеної на рис. 2 паралельно з приймачем електроенергії включено ємність  $C$ , що насправді представляє собою батарею конденсаторів, які знаходяться на трансформаторних підстанціях.

Розрахунок струмів в фазах трифазної мережі пропонується вести за методом накладення [2], для чого виконуються три незалежні розрахунки.

На рис. 3 наведена схема для розрахунку струмів по фазах при виключенні джерел напруги в фазах В і С, що призводить до замикання навантаження в плечі ВС, в зв'язку з цим воно виключене зі схеми.

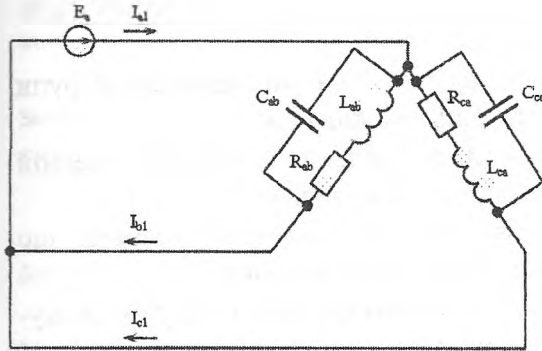


Рис. 3. Принципова схема для розрахунку струмів з джерелом у фазі А по методу накладення

Для спрощення символічних позначень перетворюємо схему на рис. 3 у схему на рис. 4 шляхом заміни навантаження одним розрахунковим опором, що має комплексну форму в залежності від величини характеристик елементів ввімкнених в це коло.

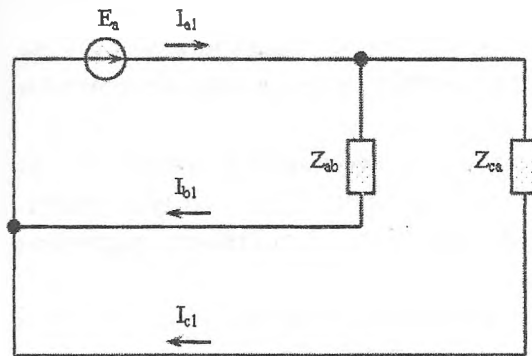


Рис. 4. Схема зі спрощеним позначенням елементів

Для обчислення струмів у фазах в першу чергу необхідно врахувати опір кожного елемента кола. Розрахунок буде наведений для плеча АВ, але він підходить і до всіх інших.

Активний опір в колі змінного струму не змінює його фази, тому комплекс в його величину не вноситься [1]:

$$Z_{Rab} = R_{ab}.$$

Для обчислення опору індуктивності необхідно не тільки додати комплексну

величину, що виражає зсув фази, але й розрахувати сам опір, який залежить від величини індуктивності ( $L_{ab}$ ) та кутової частоти живлячої мережі ( $100 \cdot \pi$ ) [1]:

$$Z_{Lab} = i \cdot 100 \cdot \pi \cdot L_{ab}.$$

Опір конденсаторної батареї теж залежить від величини ємності ( $C_{ab}$ ) та кутової частоти живлячої мережі ( $100 \cdot \pi$ ), але розрахунок ведеться за іншою формулою (наведеною нижче). Комплекс опоры ємності є величина від'ємна, тому що кут фази вона змінює в протилежну сторону від індуктивності:

$$Z_{Cab} = \frac{-i}{100 \cdot \pi \cdot C_{ab}}.$$

В одному плечі маємо два кола, що з'єднані паралельно. В першому знаходяться послідовно ввімкнені індуктивність та активний опір, а в другому – ємність. В такому випадку загальний опір плеча обчислюється за допомогою наступної формули. Розрахунок необхідно проводити з врахуванням комплексної величини:

$$Z_{ab} = \frac{Z_{Cab}(Z_{Rab} + Z_{Lab})}{Z_{Rab} + Z_{Lab} + Z_{Cab}}.$$

Коли загальні опори всіх плечей ( $Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca}$ ) знайдено, переходимо до визначення струмів для першої схеми (рис. 4) де існує джерело напруги тільки у фазі А.

Струм в фазі А для першої схеми згідно закону Ома прямо пропорційний е.р.с. ( $E_a$ ) і обернено пропорційний загальному опорю паралельно з'єднаних плечей АВ і СА. Розрахунок струму необхідно проводити з врахуванням комплексу опорю та зсуву вази джерела напруги у фазі А:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{\left( \frac{Z_{ab} \cdot Z_{ca}}{Z_{ab} + Z_{ca}} \right)}.$$

Струм в фазах В та С для першої схеми за тим же принципом, але з врахуванням опорю тільки свого плеча:

$$I_{b1} = \frac{E_a}{Z_{ab}},$$

$$I_{cl} = \frac{E_a}{Z_{ca}}$$

Такі розрахунки струмів у фазах виконуються для трьох схем: з джерелом напруги у фазі А, у фазі В та у фазі С.

Щоб визначити дійсні струми у фазах, необхідно векторно скласти значення струмів для певної фази, які були отримані у розрахунках по трьом схемам. У кожній формулі дві величини наведені зі знаком мінус, тому що у фазах, де немає джерела напруги, до кута фази струму додається  $180^\circ$ :

$$I_a = I_{a1} - I_{a2} - I_{a3},$$

$$I_b = I_{b2} - I_{b1} - I_{b3},$$

$$I_c = I_{c3} - I_{c1} - I_{c2}.$$

В ідеальному випадку кут фази струму повинен дорівнювати куту фази напруги, тобто, повний струм у фазах буде дорівнювати активній складовій.

Максимальне значення коефіцієнта корисної дії досягається тоді, коли в мережі змінного струму присутня тільки активна складова струму.

В зв'язку з тим, що на залізничному транспорті змінного струму використовується інший метод під'єднання навантаження, при розрахунку показників необхідно виключити з наведеної моделі плече АВ.

#### 4. Динамічна компенсація реактивної потужності

Навантаження в промислових мережах звичайно мають індуктивну складову, що призводить до споживання реактивної потужності, не пов'язаної з виконанням корисної роботи. В результаті збільшується плата постачальникові електроенергії, тому що виникають додаткові втрати в провідниках внаслідок збільшення струму, підвищується потужність трансформаторів і перетин кабелів, має відхилення напруга мережі від номіналу.

Для боротьби із цими явищами застосовують компенсацію реактивної потужності шляхом підключення конденсаторів у різних частинах мережі. Найбільш ефективні автоматичні установки, які під-

ключають необхідну кількість силових конденсаторів залежно від реактивного навантаження мережі.

По місцю підключення розрізняють наступні схеми компенсації [3]:

- загальна – на вводі цеху або підприємства;
- групова – на лінії живлення групи однотипних споживачів;
- індивідуальна – у безпосередній близькості до споживача.

За типом регуляторів установки, що компенсують, діляться на [3]:

- звичайні (релейні) – в яких комутація конденсаторів виконується за допомогою електромеханічних реле;
- статичні (тиристорні) – в яких застосовуються тиристорні ключі.

У статичних установках комутація конденсаторів відбувається в момент нульової напруги, внаслідок чого вони здобувають у порівнянні зі звичайними наступні переваги [3]:

- висока швидкодія – до 14 комутацій у секунду замість одного в 5...20 секунд;
- малий рівень завад внаслідок відсутності кидків струму в момент комутації;
- мале зношування конденсаторів;
- висока надійність комутаційних апаратів внаслідок відсутності механічних частин;
- зниження втрат внаслідок відсутності розрядних резисторів.

Ємнісні компенсатори реактивної потужності критичні до спотворень напруги гармоніками. При їхньому застосуванні рівень гармонік може зрости завдяки явищу резонансу. Крім того, гармоніки дають додаткове навантаження на конденсатори, що може вивести їх з ладу. Сучасні установки мають захист, що відключає конденсатори при перевищенні встановленого порога гармонік. Для свідомо "брудних" мереж застосовуються так звані установки фільтрокомпенсації з вбудованими фільтрами вищих гармонік.

При виборі установки визначають наступні характеристики:

- тип установки – звичайний або статичний;
- потужність – максимальна реактивна потужність, що може бути скомпенсована;
- ступінь компенсації – мінімальна величина збільшення, на яку змінюється смність включених конденсаторів;
- необхідність фільтрації гармонік;
- номінал трансформатора струму для підключення регулятора.

Оптимально спроектована система конденсаторних установок при порівняно невеликих витратах забезпечує максимальне зниження сумарних втрат активної потужності й енергії, підтримку заданого рівня напруги на електричному споживачі. Система дозволяє знизити витрати на оплату електроенергії і на експлуатацію розподільних мереж.

### Висновки

1. В статті було проведено аналіз впливу реактивної потужності на мережі змінного струму трифазної системи. Доведено що відсутність системи компенсації реактивної потужності призводить до:

- додаткових втрат у провідниках внаслідок збільшення струму;
- відхилення напруги мережі від номіналу;
- завищення потужності трансформаторів;
- перевантаження передавальної електромережі;
- збільшення перетину кабелів.

2. Запропоновано рішення даної проблеми шляхом ден омичної компенсації компенсація реактивної потужності.

Впровадження автоматизованої системи компенсації реактивної потужності дозволяє:

- знизити витрати по оплаті електроенергії;
- зменшити споживання реактивної потужності;
- знизити витрати на експлуатацію розподільних мереж;
- мінімізувати втрати активної потужності й енергії в елементах мережі електропостачання;
- підвищити коефіцієнт потужності до необхідної величини;
- передати більшу потужність через існуючу кабельну мережу;
- оптимізувати режим роботи електричних мереж;
- виключити генерацію реактивної енергії в мережі в години мінімальних навантажень;
- розвантажити лінії електропередачі, трансформатори й розподільчі мережі;
- забезпечити одержання інформації про параметри й стан електричної мережі.

3. На залізничному транспорті, для підвищення надійності та зниження вартості, систему керування конденсаторними батареями можна виконати на базі автоматизованої системи обліку електроенергії [4].

### Список літератури

1. Свдокимов Ф. Є. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1975. – 496 с.
2. Зевек Г. В., Ионкин П. А. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1965. – 444 с.
3. К. Niekamp. Elektrische Bahnen. – 2000. – № 10. – С. 347-353.
4. Хіргій А. Г. Організація локальних систем комерційного обліку електроенергії на залізничному транспорті//матеріали конференції "Швидкість – комфорт – безпека – ефективність". – К., 2004. – С. 191-192.