

**ДВНЗ «Національний гірничий  
університет»**

**Кафедра систем електропостачання**

**Дисципліна «Управління електроспоживанням»**

**ТЕМА 3 – «УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ  
РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ»  
(Витрати на генерацію та  
передачу)**

## **Витрати на генерацію реактивної енергії**

До джерел реактивної потужності відносять:

- лінії електропередачі (ЛЕП): повітряні (напругою 110 кВ і вище), високовольтні кабельні лінії значної довжини;
- синхронні двигуни (СД);
- батареї конденсаторів (БК);
- синхронні генератори електростанцій (СГ);
- синхронні компенсатори (СК)

Застосування того чи іншого джерела реактивної потужності та ступінь його використання при цьому повинні оцінюватися за витратами на генерацію реактивної енергії (включаючи витрати на установку джерела) та її передачу електричними мережами в заданий вузол навантаження.

1. **Лінії електропередачі.** Для практичних розрахунків використовують середню ємнісну питому провідність  $b_0$ . Тоді

$$Q_{л} = U_{ном}^2 b_0 l$$

де  $U_{ном}$  – номінальна напруга лінії, кВ;  $l$  – довжина лінії, км;  $b_0$  – питома ємнісна провідність, См/км

ЛЕП споруджуються для передавання ЕЕ споживачам і тому витрати на її генерацію у кабельних та повітряних лініях дорівнюють нулю.

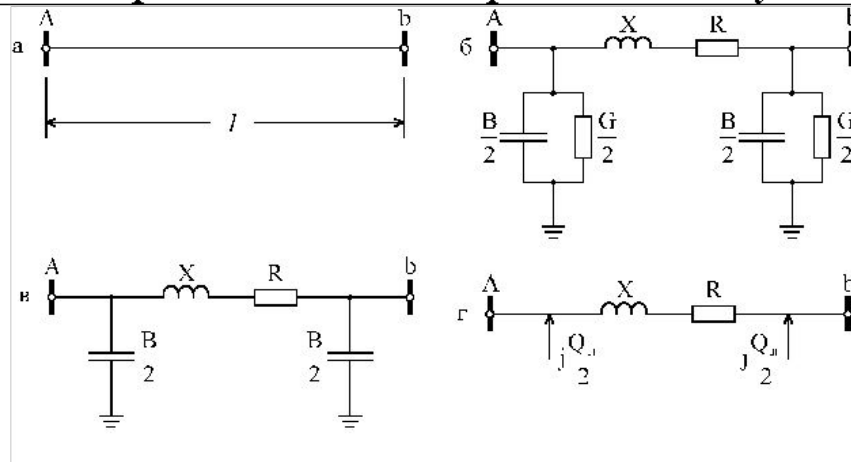


Рис. 1. Схеми заміщення ділянки повітряних (кабельних) ЛЕП

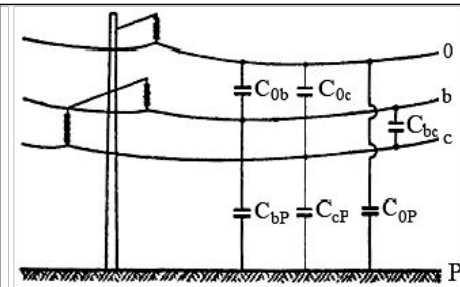


Рис. 2 Ємність одного ланцюга

Ємнісна (реактивна) провідність зумовлена наявністю ємності між проводами фаз одного ланцюга і між цими проводами і поверхнею землі (рис.2). Проводи повітряної ЛЕП розташовані несиметрично один відносно другого і землі. При цьому заряди окремих проводів непропорційні їх потенціалам, а залежать також від потенціалів проводів інших фаз. Ємність повітряної лінії (на 1 км) трифазного струму з допустимою для інженерних розрахунків похибкою в 5% розраховують за формулою

$$C_0 = \frac{24 \cdot 10^{-9}}{\lg \frac{2D_{\text{cp}}}{d}}, \text{ Ф/км.}$$

Питома ємнісна провідність для частоти 50 Гц визначається як

$$b_0 = \omega C_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{2D_{\text{cp}}}{d}}, \text{ 1/Ом} \cdot \text{км}$$

де  $\omega$  – кутова частота.

Ємнісна провідність ЛЕП довжиною  $l$

$$B = b_0 l.$$

Зарядна потужність лінії  $Q_L = \sqrt{3} U I_L = BU^2$

Зарядна потужність  $Q_L$  – реактивна ємнісна потужність, що генерується лінією, визначається здебільшого рівнем напруги в лінії. Для мереж районного значення, тобто напругою 110 кВ і вище, вона має суттєве значення і тому її врахування в таких мережах обов'язкове. Для ліній електропередачі місцевого значення (35 кВ і нижче) величина зарядної потужності значно менша, ніж ті потужності, що обумовлені навантаженням. Тому в схемах заміщення місцевих ліній не враховують ємнісну провідність або зарядну потужність, що обумовлена нею.

На практиці враховують реактивну потужність, яку генерують струмопроводи та КЛ з  $U_{ном} \geq 6\text{кВ}$  і протяжні (більш 2 км) КЛ з  $U_{ном} = 6\text{кВ}$ .

2. *Синхронні двигуни.* За номінальних умов роботи, коли коефіцієнт завантаження СД  $\beta = P/P_{ном}$  та відносне значення напруги  $U_* = U/U_{ном}$  на його затискачах не виходять за межі 0,95...1,05, СД може тривало генерувати номінальну реактивну потужність  $Q_{ном}$ .

При відхиленнях від номінальних умов роботи значення максимальної реактивної потужності, яку може генерувати СД за умов нагрівання обмоток та заліза статора і ротора, залежить від його завантаження щодо активної потужності  $\beta$  та відносної напруги  $U_*$  на його затискачах і може бути визначена за формулою

$$Q_M = \alpha_M \frac{P_{ном} \operatorname{tg} \varphi_{ном}}{\eta_{ном}} = \alpha_M Q_{ном},$$

де  $\alpha_M$  – коефіцієнт допустимого перевантаження СД за реактивною потужністю ( $\alpha_M = Q_M / Q_{ном}$ ), який (для СД різних серій) визначається за графіками або довідковими таблицями залежно від завантаження за активною потужністю ( $\beta$ ) та напруги  $U_*$  на його затискачах, відношення короткого замикання;  $P_{ном}$  – номінальна активна потужність СД;  $\operatorname{tg} \varphi_{ном}, \eta_{ном}$  – відповідно номінальне значення тангенсу та коефіцієнта корисної дії (ККД) конкретного СД.



Рис. 67. Кривые для определения коэффициента  $\sigma_{max}$

\*\*\*Один из важных параметров синхронной машины – отношение короткого замыкания (ОКЗ), которое представляет собой отношение тока возбуждения  $I_{e0ном}$  соответствующего номинальному напряжению при ХХ, к току возбуждения  $I_{e.к.ном}$  соответствующему номинальному току статора при опыте КЗ. Для турбогенераторов  $OK3 = 0,4 \div 0,7$ ; для гидрогенераторов  $OK3 = 1,0 \div 1,4$ . ОКЗ имеет большое практическое значение при оценке свойств синхронной машины: машины с малым ОКЗ менее устойчивы при параллельной работе, имеют значительные колебания напряжения при изменениях нагрузки, но у таких машин меньшие габариты и, следовательно, они дешевле, чем машины с большим ОКЗ.

$$OK3 = 1/X_d$$

$X_d$  – сопротивление синхронной машины по продольной оси,  
 $X_{d*} = 0,6 \dots 1,6$

З другого боку, при роботі СД у режимі перезбудження втрати активної потужності у СД істотно зростають у порівнянні з його роботою за номінальним коефіцієнтом потужності.

У загальному випадку втрати потужності у СД є функцією коефіцієнта завантаження з реактивної потужності  $\alpha = Q/Q_{ном}$ , активної потужності ( $\beta$ ) та напруги  $U_*$ , тобто  $\Delta P = f(\alpha, \beta, U_*)$ .

Впливом на ці втрати для параметрів у діапазоні  $0,5 \leq \beta \leq 1$  та  $0,95 \leq U_* \leq 1,1$  нехтують і з достатньою для практичних розрахунків точністю розраховують втрати за формулою

$$\Delta P = D_1 \alpha + D_2 \alpha^2 \quad (3.7)$$

де  $D_1, D_2$  – постійні (довідкові) величини, що залежать від конструктивних параметрів двигуна (потужності, частоти обертання, напруги) і характеризують втрати активної потужності в СД на вироблення реактивної.



Для використання СД як джерел реактивної потужності вони додатково оснащуються регуляторами збудження. Для групи з  $N$  однотипних СД капітальні вкладення  $K_0$  в регулятори визначаються за виразом

$$K_0 = NK_{рег},$$

де  $K_{рег}$  – витрати на придбання та монтаж регулятора збудження, грн, які не залежать від генерованої СД потужності.

Втрати активної потужності  $\Delta P$  в поодинокі працюючому СД на генерацію реактивної потужності  $Q$  згідно з формулою (3.7) визначаються таким чином:

$$\Delta P = \frac{D_1}{Q_{ном}} Q + \frac{D_2}{Q_{ном}^2} Q^2.$$

Для групи з  $N$  двигунів одного типу, які однаково завантажені та працюють паралельно, повні втрати активної потужності на генерацію сумарної реактивної потужності  $Q$  визначаються за формулою

$$\Delta P = N \left( \frac{D_1 Q}{Q_{ном} N} + \frac{D_2 Q^2}{Q_{ном}^2 N^2} \right) = \frac{D_1}{Q_{ном}} Q + \frac{D_2}{Q_{ном}^2} N Q^2.$$

У багатьох випадках СД на діючому підприємстві вже використовуються для компенсації, тому частково завантажені реактивною потужністю в розмірі  $Q_{ч.з}$ .

Якщо таку групу однотипних двигунів планується використати, наприклад, для генерації реактивної потужності  $Q$  новому об'єкту, то це викличе додаткові втрати активної потужності  $\delta P$ . Підраховуються вони за відомим принципом: від втрат активної потужності  $\Delta P_2$ , які виникають при генерації реактивної потужності  $Q_{ч.з} + Q$ , віднімаються втрати  $\Delta P_1$ , що відповідають попередньому завантаженню, тобто

$$\delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1. \quad (3.8)$$

Після розкриття складових у формулі (3.8) та спрощень маємо

$$\begin{aligned} \delta P = & \left[ \frac{D_1}{Q_{ном}} (Q_{ч.з} + Q) + \frac{D_2}{Q_{ном}^2 N} (Q_{ч.з} + Q)^2 \right] - \\ & - \left( \frac{D_1}{Q_{ном}} Q_{ч.з} + \frac{D_2}{Q_{ном}^2 N} Q_{ч.з}^2 \right) = \left( \frac{D_1}{Q_{ном}} + \frac{2D_2 Q_{ч.з}}{Q_{ном}^2 N} \right) Q + \frac{D_2}{Q_{ном}^2 N} Q^2 \end{aligned}$$



У найбільш загальному випадку вартість втрат електроенергії на генерацію реактивної енергії групою вже частково завантажених нею СД визначається за формулою:

$$C_W = c_0 \delta P = c_0 \left( \frac{D_1}{Q_{\text{НОМ}}} + \frac{2D_2 Q_{\text{ч.з}}}{Q_{\text{НОМ}}^2 N} \right) Q + c_0 \frac{D_2}{Q_{\text{НОМ}}^2 N} Q^2, \quad (3.9)$$

де  $c_0$  – питома вартість втрат активної потужності, грн/кВт·рік.

Позначимо  $c'_{\text{в.}} = c_0 \left( \frac{D_1}{Q_{\text{НОМ}}} + \frac{2D_2 Q_{\text{ч.з}}}{Q_{\text{НОМ}}^2 N} \right)$ ,  $c''_{\text{в.}} = c_0 \frac{D_2}{Q_{\text{НОМ}}^2 N}$ , тоді вираз (3.9) перетвориться до вигляду

$$C_W = c'_{\text{в.}} Q + c''_{\text{в.}} Q^2.$$

Тут  $c'_{\text{в.}}$  – питомі витрати на один Мвар потужності, яка генерується СД, грн/Мвар;  $c''_{\text{в.}}$  – питомі витрати на один Мвар<sup>2</sup> потужності, яка генерується СД, грн/Мвар<sup>2</sup>.

Питомі приведені витрати на генерацію реактивної потужності високовольтними СД визначаються для конкретного об'єкта-підприємства за достовірними даними.

При техніко-економічному порівнянні альтернативних варіантів, щодо компенсації реактивної потужності, крім вартості втрат електроенергії  $C_w$ , слід ураховувати відрахування на амортизацію  $C_a$  та вартість утримання обслуговуючого персоналу  $C_n$ .

Таким чином, у загальному випадку витрати на генерацію реактивної потужності при використанні групи однотипних СД  $Z_{г.сд}$  складаються з витрат на регулятор збудження, вартості втрат електроенергії та інших експлуатаційних витрат. До цього слід додати, що втрати електроенергії на генерацію СД реактивної потужності в основному залежать від його коефіцієнта корисної дії. Із зменшенням номінальної потужності СД та частоти обертання ККД двигуна спадає, тому для компенсації у першу чергу повинні використовуватися потужні та швидкохідні двигуни.

**Конденсаторні елементи** виготовляють на номінальну напругу 660 В і нижче – потужністю 12,5...50 квар у три- та однофазному виконанні, а на 1,05 кВ та вище потужністю 25...100 квар в однофазному виконанні. З таких елементів складають батареї конденсаторів (БК) необхідної потужності.

Порівняно з іншими джерелами БК мають менші питомі втрати активної потужності ( $p_{БК} = 0,0025...0,0045$  кВт/квар), прості щодо монтажу та експлуатації, дешеві, можуть виготовлятися на будь-яку потужність та вмикатися в будь-якій точці мережі. Недолік БК – квадратична залежність генерованої ними реактивної потужності від напруги, чутливість до ВГ, недостатня міцність, особливо при КЗ та перенапругах.

Вартість БК повністю враховується при визначенні витрат на генерацію реактивної потужності. Повна вартість БК складається з незмінної частини  $K_0$  і змінної –  $k_y Q_{ном}$ , тобто

$$K = K_0 + k_y Q_{ном} \quad (3.10)$$

де  $k_y$  – питома вартість батареї конденсаторів, грн/Мвар.

Незмінна частина  $K_0$  складається з вартості ввідного пристрою, а для регульованих БК додатково вартості регулятора. Змінна складова визначається вартістю конденсаторів із запобіжниками, монтажу шаф, апаратів, які призначені для комутації секцій БК.

У загальному випадку напруга в точці приєднання БК не дорівнює номінальній. Крім цього, конденсатори для мереж з напругою 380-660 В виготовляються на номінальну напругу мережі, до якої вони приєднуються; конденсатори, які призначені для експлуатації в мережах 6 та 10 кВ, виготовляються з напругою на 5% вищою за напругу мережі. Тому реактивна потужність, яку фактично генерує БК, необхідно уточнювати за формулою:

$$Q = (U_* / U_{*БК})^2 Q_{ном} \quad (3.11)$$

де  $U_*$  – відносна напруга в точці ввімкнення БК;  $U_{*БК}$  – відносна паспортна напруга БК.

З урахуванням (3.11) формула (3.10) для визначення капіталовкладень приймає вигляд

$$K = K_0 + k_y (U_{*БК} / U_*)^2 Q.$$

Вартість втрат ЕЕ в конденсаторах на генерування реактивної потужності  $Q$ , Мвар, оцінюється за формулою

$$C_{БК} = c_0 p Q, \quad (3.12)$$

де  $p_{БК}$  – питомі втрати активної потужності в конденсаторах, кВт/квар.

Загальні витрати  $Z_{Г.БК}$  на використання БК як джерел реактивної потужності підраховуються за допомогою формул (3.10) та (3.12) за будь-який період.

*Генератори електростанції (ТЕС)* лише умовно можна вважати основними джерелами реактивної потужності, оскільки вона складає всього 48-62% активної. Якщо врахувати її втрати у трансформаторах та лініях, то реактивна потужність, яку вони можуть видати в мережі підприємств, значно менше. Тому це реальні джерела тільки для споживачів, які отримують живлення на генераторній напрузі.

Проте втрати ЕЕ в СГ на генерацію реактивної потужності визначаються за тими ж формулами, що і для СД. Для СГ постійна складова капіталовкладень дорівнює нулю, оскільки вони комплектуються регуляторами незалежно від вимог щодо компенсації реактивної потужності.

Для потужних генераторів ( $P_{СГ} > 100$  МВт) питомі втрати активної потужності на генерацію реактивної дуже малі, тому в багатьох техніко-економічних розрахунках ними нехтують.



*Синхронні компенсатори* на промислових підприємствах застосовуються дуже рідко. Вони дорогі, мають значні питомі втрати активної потужності, складні умови пуску. В окремих випадках їх застосування може виявитися доцільним на крупних підстанціях районного значення при великих потужностях компенсуючих пристроїв. Основна перевага СК – можливість швидкодіючого автоматичного плавного у широких межах регулювання рівня напруги. Варіант компенсації з використанням СК можна зіставити із застосуванням автоматично регульованих потужних БК, так як при цьому можливо зменшити регульований діапазон трансформаторів, а в певних випадках і відмовитися від трансформаторів з РПН.

В проектах реконструкції підприємств розглядається доцільність застосування у якості СК наявних на підприємстві СГ і СД, які не використовуються за своїм прямим призначенням і при неможливості отримання в даний час інших компенсуючих пристроїв.