

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»

**Методичні вказівки
до виконання
дослідницької лабораторної роботи ЕЗ-2 (2)
"ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ
ПОТУЖНОСТІ НА ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ"**

для студентів напряму підготовки 6.050701
„Електротехніка та електротехнології”

Дніпропетровськ
2010

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»

**Методичні вказівки
до виконання
дослідницької лабораторної роботи ЕЗ-2 (2)
"ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ
ПОТУЖНОСТІ НА ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ"**

для студентів напряму підготовки 6.050701
„Електротехніка та електротехнології”

Затверджено
на засіданні кафедри
систем електропостачання
Протокол № 10
від 02.11.2010 р.

Дніпропетровськ
2010

Методичні вказівки до виконання дослідницької лабораторної роботи ЕЗ-2 (2) "Дослідження впливу компенсації реактивної потужності на втрати електроенергії в системах електропостачання" для студентів напряму підготовки 6.050701 „Електротехніка та електротехнології” / Упоряд.: Ю.Т.Разумний, О.І.Хованська, С.В.Дибрін. – Дніпропетровськ: НГУ, 2010. – 13 с.

Упорядники:

Ю.Т.Разумний, д-р техн. наук, проф.,
О.І.Хованська, к-т техн. наук, доцент,
С.В.Дибрін, асист.

Відповідальний за випуск заст. зав. кафедри систем електропостачання
С.І.Випанасенко, д-р. техн. наук, проф.

Друкується в редакційній обробці упорядників

Лабораторна робота ЕЗ-2 (2)

Дослідження впливу компенсації реактивної потужності на втрати електроенергії в системах електропостачання

1. Мета роботи

Усвідомити: сутність реактивної потужності; її джерела та споживачі; негативні наслідки, що виникають завдяки циркуляції реактивної потужності в системах електроспоживання, в тому числі енергетичні втрати; значення компенсації реактивної потужності; методи зменшення її споживання; значення коефіцієнтів потужності та реактивної потужності, їх відмінності; можливі заходи з енергозбереження стосовно умов дослідження на лабораторній установці. Навчитись отримувати середні значення реактивної та активної потужності за допомогою лічильників, визначати коефіцієнти потужності та реактивної потужності. Дослідити вплив компенсації реактивної потужності на: втрати енергії в мережі загалом, втрати енергії в мережі підприємства, розрахунки за спожиту енергію. Дослідити відмінності у споживанні реактивної потужності при роботі різних двигунів на однакове навантаження та вплив завантаження двигуна на споживання реактивної потужності.

2. Методичні вказівки

Надійне електропостачання спільно з міжнародними конкурентоспроможними цінами на електроенергію має важливе значення для успішного розвитку сучасної економіки. Для України це набуває особливого сенсу, тому що її економіка здебільшого базується на виробництві, а в цьому секторі економіки провідне положення займають енергоємні галузі, відповідальні за виробництво сталі, хімічних продуктів, будівельних матеріалів. Тому вивчення заходів, що сприяють економії енергоресурсів й тим самим підвищують ефективність виробництва – необхідна та актуальна задача.

Реактивна потужність характеризує інтенсивність циркуляції енергії між елементами індуктивного (двигуни) і ємнісного (генератор, конденсатор) характеру в системі електропостачання і не виконує ніякої роботи (не перетворюється на теплову або механічну форму як активна). Разом з тим її передача по системі електропостачання від електростанції до споживача призводить до ряду негативних наслідків:

1) викликає додаткові втрати енергії в лініях і інших елементах системи;

2) знижується пропускна спроможність трансформаторів, ліній і т.д., так як при незмінній повній потужності зменшується її активна складова:

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2};$$

3) викликає додаткові втрати напруги в елементах мережі (лініях, трансформаторах і т.д.).

Більшість приймачів змінного струму – споживачі реактивної потужності (елементи індуктивного характеру). До них належать асинхронні двигуни, трансформатори, зварювальні трансформатори, перетворювачі, реактори, електричні мережі. В асинхронних двигунах (які за балансом споживаємої підприємством реактивної потужності складають 60 %) при повному завантаженні реактивна потужність, що утворює магнітний потік, складає 50 - 70 % від активної потужності.

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

Реактивна потужність, що споживається асинхронним двигуном при номінальному навантаженні та номінальній напрузі:

$$Q_n = P_n \cdot \operatorname{tg} j_n / h_n, \text{ квар,}$$

де P_n – номінальна потужність двигуна, кВт; h_n – номінальний ККД; $\operatorname{tg} j_n$ – відповідає номінальному коефіцієнту потужності $\cos j_n$ двигуна.

Реактивна потужність, що споживається в режимі холостого ходу (якщо знехтувати втратами енергії у двигуні):

$$Q_x = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_x \cdot 10^{-3}, \text{ квар,}$$

де I_x – струм холостого ходу двигуна.

Хоча зі зменшенням завантаження двигуна від P_n до 0 абсолютне значення споживаної реактивної потужності і зменшується від Q_n до Q_0 разом з тим збільшується її відносне значення (по відношенню до активної потужності), тобто на кожен ват активної потужності доводиться більше вар реактивної, а це означає більше

втрат енергії від передачі реактивної потужності на одиницю роботи, виконаної двигуном. Як наслідок, в результаті такого збільшення зменшується $\cos \varphi$ двигуна. При холостому ході буде споживатися тільки реактивна потужність (якщо не враховувати втрати енергії в двигуні), викликаючи втрати від її передачі без виконання корисної роботи.

Таким чином, головними причинами збільшеного споживання реактивної потужності на підприємствах є недовантаження та холостий хід асинхронних двигунів.

Усі дії щодо зменшення споживання реактивної потужності із мережі можна розподілити на дві групи:

- а) що не потребують спеціальних (компенсуючих) пристроїв, як наприклад:
 - збільшення навантаження асинхронних двигунів ;
 - зменшення холостого ходу асинхронних двигунів методом широкого застосування обмежувачів холостого ходу;
 - заміна асинхронних двигунів, навантажених менше ніж на 60% на двигуни меншої потужності;
 - при можливості заміна асинхронних двигунів синхронними;
 - відключення або заміна трансформаторів, завантажених менше, ніж на 30%;
 - оптимізація роботи напівпровідникового устаткування;
- б) пов'язані з застосуванням спеціальних компенсуючих пристроїв, установка яких повинна бути обґрунтована техніко-економічними розрахунками. В якості компенсуючих пристроїв можуть бути використані:
 - синхронні електродвигуни, які при перезбудженні здатні гасити дефіцит реактивної потужності;
 - синхронні компенсатори - синхронні двигуни полегшеної конструкції, призначені для роботи на холостому ході. При роботі в режимі перезбудження є генератором реактивної потужності;
 - статичні конденсатори - конденсатори, призначені для компенсації реактивних навантажень, складаються з секцій, які в залежності від робочої напруги та необхідної реактивної потужності з'єднуються паралельно, або паралельно-послідовно;
 - компенсаційні перетворювачі та статичні (тиристорні) джерела реактивної потужності - пристрої на напівпровідникових елементах, що при

своїй роботі спроможні генерувати реактивну потужність.

Реактивна потужність, вироблена конденсатором у систему, визначається як:

$$Q = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot 10^3, \text{ квар,}$$

де ω – кутова частота; C – ємність конденсатора; U – напруга мережі.

Таким чином, **компенсація реактивної потужності** – це переніс джерела реактивної потужності до шин споживача.

Слід зазначити, що стосовно систем електричного приводу крім дій щодо зменшення споживання реактивної потужності із мережі існують інші шляхи підвищення ефективності споживання енергії:

- скорочення або знищення проміжних передач;
- впровадження енергоефективних електродвигунів (двигунів з покращеними енергетичними характеристиками);
- підвищення ефективності роботи двигунів (в тому числі ті, що перераховані вище як заходи зменшення споживання реактивної потужності що не потребують спеціальних пристроїв, але з позиції, наприклад, експлуатації в режимі якнайбільшого ККД);
- впровадження більш досконалої або вдосконалення існуючої системи регулювання (на основі регуляторів напруги або частотного регулювання тощо).

Техніко-економічний ефект від зниження втрат активної потужності після впровадження компенсації можна проілюструвати наступним прикладом.

Якщо вся реактивна потужність передається споживачу від електростанції, тоді втрати активної потужності у трифазній мережі:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R,$$

де P – активна потужність, що передається мережею; Q – реактивна потужність, що передається мережею; U – лінійна напруга мережі; R – активний опір дроту фази мережі.

У випадку, коли після установки компенсаційного пристрою реактивна потужність, що передається мережею зменшиться до $a \cdot Q$, а активна збільшиться через втрати в компенсуючому пристрої до $b \cdot P$, де a – доля зменшеної реактивної потужності у складі початкової, а b –

кратність збільшення активної потужності, тоді втрати активної потужності:

$$\Delta P_{\kappa} = \frac{(b \cdot P)^2 + (a \cdot Q)^2}{U^2} R.$$

Враховуючи, що $\operatorname{tg}(j) = Q/P$, відносне зниження втрат активної потужності:

$$dP = \frac{\Delta P - \Delta P_{\kappa}}{\Delta P} = \frac{\operatorname{tg}^2(j) \cdot (1 - a^2) - (b^2 - 1)}{\operatorname{tg}^2(j) + 1}.$$

Тобто зменшення втрат активної потужності в мережі від впровадження заходів з компенсації реактивної потужності сягає $dP \cdot 100$ відсотків. Це означає зниження на $(dP \cdot 100)\%$ генераторної потужності, необхідної для покриття цих втрат, а також зменшення витрати палива для покриття втрат електроенергії.

Слід зауважити, що компенсація реактивної потужності може сприяти оптимізації роботи і інших елементів системи електропостачання. Наприклад, зниження до 70 % завантаження після компенсації повністю завантаженого трансформатора відповідатиме більш економічному режиму його роботи, так як при цьому активні і реактивні втрати в ньому будуть менші, ніж при завантаженні на 100%.

3. Описання лабораторної установки

На стенді змонтовані вимірювальні прилади (амперметр, фазометр, лічильники активної та реактивної потужності), комутаційні апарати, два асинхронних двигуни різної потужності, активне навантаження, три різні за потужністю групи батарей статичних конденсаторів для компенсації реактивних навантажень.

На передній панелі лабораторної установки розташовані вимірювальні прилади, комутаційні апарати та сигнальні лампочки.

4. Порядок виконання роботи

1. Увімкнути двигун АД1 на холостому ході (ХХ) (без конденсаторів та навантаження) та рахувати оберти дисків лічильників протягом $T=5$ хв. Записати $\cos \varphi$ та кількість обертів до табл.1.
2. Увімкнути двигун АД1 з навантаженням (Н) (без конденсаторів) та рахувати оберти дисків лічильників протягом $T=5$ хв. Записати напругу, $\cos \varphi$ та кількість обертів до табл.1.

3. Увімкнути двигун АД1 і навантаження (Н) та, відслідковуючи за фазометром, підібрати таку комбінацію компенсуючих конденсаторів (КК), щоб споживання реактивної енергії з мережі відповідало середньому значенню $\cos \varphi$ між мінімальним та одиницею. Рахувати оберти дисків лічильників впродовж терміну $T=5$ хв. Записати $\cos \varphi$ та кількість обертів до табл.1.
4. Увімкнути двигун АД1 і навантаження (Н) та, відслідковуючи за фазометром, підібрати таку комбінацію компенсуючих конденсаторів (КК), щоб споживання реактивної енергії з мережі було як найменшим ($\cos \varphi \rightarrow 1$), при цьому виключаючи варіанти перекомпенсації. Рахувати оберти дисків лічильників впродовж терміну $T=5$ хв. Записати кількість обертів до табл.1.
5. Виконати вимірювання згідно пунктам 2-4, для двигуна АД2.
6. Відповідно кожному експерименту розрахувати і внести до таблиці 2:

а) витрати активної енергії за зміну

$$W = (n'_w / 1750) \cdot K_I \cdot K_U, \text{ кВт} \cdot \text{г.},$$

де $n'_w = n_w \cdot (T_{зм} / T) = n_w \cdot 96$ - число обертів диска лічильника активної енергії за зміну; n_w - число обертів диска лічильника активної енергії за час експерименту T ; $T_{зм} = 8$ годин - тривалість зміни; 1750 - число обертів диска лічильника відповідне 1 кВт·год.; K_I, K_U - коефіцієнти трансформації трансформатора струму та трансформатора напруги (відповідно варіанту з табл. 3);

б) витрати реактивної енергії за зміну

$$V = (n'_v / 1750) \cdot K_I \cdot K_U, \text{ квар} \cdot \text{г.},$$

де $n'_v = n_v \cdot (T_{зм} / T) = n_v \cdot 96$ - число обертів диска лічильника реактивної енергії за зміну; n_v - число обертів диска лічильника реактивної енергії за час експерименту T ;

в) середню активну потужність

$$P_c = W / T_{зм}, \text{ кВт};$$

г) середню реактивну потужність

$$Q_c = V / T_{зм}, \text{ квар};$$

д) розрахунковий коефіцієнт потужності:

$$\cos j = W / \sqrt{W^2 + V^2};$$

е) розрахунковий коефіцієнт реактивної потужності:

$$\text{tgj} = Q_c / P_c = V / W.$$

7. Для кожного з двигунів розрахувати і внести до таблиці 2:

а) долю зменшеної реактивної потужності у складі реактивної потужності споживаної перед компенсацією та кратність збільшення активної потужності:

$$a = \frac{Q_{c(H+KK)}}{Q_{c(H)}}, \quad b = \frac{P_{c(H+KK)}}{P_{c(H)}}$$

де $Q_{c(H)}$, $P_{c(H)}$ - середні споживані з мережі двигуном відповідно реактивна й активна потужності (пункт бв, г) з навантаженням без компенсації; $Q_{c(H+KK)}$, $P_{c(H+KK)}$ - середні споживані з мережі двигуном реактивна й активна потужності (пункт бв, г) з навантаженням і компенсацією;

б) відносно зниження втрат активної потужності у всій мережі

$$dP = \frac{\operatorname{tg}^2(j) \cdot (1 - a^2) - (b^2 - 1)}{\operatorname{tg}^2(j) + 1},$$

де $\operatorname{tg}(j) = Q_{c(H)} / P_{c(H)}$ - тангенс, що відповідає випадку з навантаженням та без компенсації.

8. За умови, що живлення двигунів здійснюється мережею підприємства з еквівалентною довжиною L (табл. 3), мідним дротом з питомим опором $r = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ та еквівалентним перерізом S (табл. 3) для обох двигунів розрахувати і внести до таблиці 2:

а) абсолютні зниження втрат активної потужності в мережі підприємства

$$\Delta \Delta P = dP \cdot \frac{P_{c(H)}^2 + Q_{c(H)}^2}{U_n^2} \cdot r \cdot \frac{L}{S}, \quad \text{кВт}$$

де $U_n = \sqrt{3} \cdot 100 \cdot K_U$ - лінійна напруга; 100 - вторинна напруга вимірюючого трансформатора напруги;

б) зниження втрат енергії в мережі підприємства, що живить двигуни, за рік (при 3-х змінному робочому дні та 250-ти робочих днях у році)

$$\Delta W = \Delta \Delta P \cdot T_{зм} \cdot 3 \cdot 250, \quad \text{кВт} \cdot \text{г};$$

в) економію коштів за рік, враховуючи, що роздрібний тариф на електроенергію для 1 групи споживачів (юридичні особи та фізичні особи-суб'єкти підприємницької діяльності крім підприємств міського електричного транспорту) 2 класу (напруга менша 35 кВ) встановлено у розмірі $C = 87,48 \text{ коп.} / \text{кВт} \cdot \text{г}$:

$$\Delta C = \Delta W \cdot \frac{C}{100}, \quad \text{грн.}$$

9. Проаналізувати отримані результати та:

- а) зробити висновки стосовно впливу компенсації на: втрати енергії в мережі загалом, втрати енергії в мережі підприємства, розрахунки за спожиту енергію, витрати палива електростанції при живленні досліджуваних двигунів;
- б) побудувати і співставити діаграми залежностей відносних знижень втрат активної потужності у всій мережі при впровадженні компенсації від $\cos \varphi$ для першого (пункт 2-4) та другого (пункт 5) досліджень;
- в) визначити в якому випадку компенсація дає кращий результат, від чого це залежить;
- г) співставити перші два експерименти. Як впливає завантаження двигуна на споживання реактивної потужності?

Таблиця 1
Результати вимірів

Режими	$\cos \varphi$	Обертів диска лічильників	
		n_w	n_v
АД1+ХХ			
АД1+Н			
АД1+Н+КК ($\cos \varphi$) _{mid}			
АД1+Н+КК ($\cos \varphi$) _{max}			
АД2+Н			
АД2+Н+КК ($\cos \varphi$) _{mid}			
АД2+Н+КК ($\cos \varphi$) _{max}			

Таблиця 2

Результати розрахунків

Режими	Витрати електроенергії		Середні потужності		$\cos \varphi$	$\pm \varphi$	Техніко-економічні показники ефекту від впровадження компенсації					
	W, кВт·г	V, квар·г	P _c , кВт	Q _c , квар			a	b	ΔP, кВт	ΔW, кВт·г	ΔC, грн	
АД1+ХХ							-	-	-	-	-	-
АД1+Н							-	-	0	0	0	0
АД1+Н+КК ($\cos \varphi$) _{mid}						-						
АД1+Н+КК ($\cos \varphi$) _{max}						-						
АД2+Н							-	-	0	0	0	0
АД2+Н+КК ($\cos \varphi$) _{mid}						-						
АД2+Н+КК ($\cos \varphi$) _{max}						-						

Таблиця 3

Вхідні дані для розрахунків

Варіант	K_I	K_U	L, км	S, мм ²	Варіант	K_I	K_U	L, км	S, мм ²
1	140	4	2,4	330	21	40	63	2,8	38
2	40	63	1	38	22	60	105	3,5	68
3	80	12	1,1	109	23	40	63	4,3	38
4	20	31,5	3,5	15	24	100	105	3,4	164
5	40	4	2,5	38	25	60	4	4,4	68
6	80	6,9	2,1	109	26	20	4	3,6	15
7	40	31,5	1,8	38	27	60	12	2	68
8	40	12	1,5	38	28	40	31,5	2,6	38
9	40	63	4,8	38	29	60	4	4	68
10	80	105	2,4	109	30	20	4	1,2	15
11	60	105	2	68	31	60	105	3,2	68
12	40	63	3,3	38	32	80	105	4,7	109
13	100	6,9	4,8	164	33	40	63	4,4	38
14	40	63	2,5	38	34	40	6,9	4,5	38
15	120	6,9	1	236	35	20	4	1,7	15
16	40	31,5	1,5	38	36	100	12	4,8	164
17	60	63	2,1	68	37	120	6,9	2,2	236
18	100	12	2,8	164	38	120	105	1,8	236
19	40	12	2,5	38	39	40	6,9	3,3	38
20	20	4	2	15	40	100	4	1,5	164

6. Домашня підготовка до роботи

Використовуючи рекомендовану літературу, вивчити наступні питання:

1. Причини необхідності та фізичне значення компенсації реактивних навантажень.
2. Трикутник потужностей, співвідношення між повною, активною та реактивною потужностями.
3. Фізичний зміст та оптимальні значення коефіцієнту потужності, коефіцієнту реактивної потужності.
4. Джерела реактивної потужності.
5. Методи компенсації реактивних навантажень.
6. Вплив реактивної потужності на ефективність передачі електричної енергії

7. Зміст звіту

1. Назва та мета лабораторної роботи.
2. Негативні наслідки викликані передачею реактивної потужності.
3. Коротка характеристика методів зменшення споживання реактивної потужності.
4. Сутність компенсації реактивної потужності
5. Вхідні данні свого варіанту (табл. 3).
6. Таблиці з даними вимірів та розрахунків (табл. 1 та табл. 2), діаграми.
7. Приклади розрахунків.
8. Аналіз отриманих результатів та висновки щодо заходів з енергозбереження.

8. Контрольні запитання

1. Для чого необхідна реактивна потужність?
2. Чому споживання індуктивного струму мало збільшується при зростанні навантаження на валу двигуна?
3. Які недоліки викликає низький $\cos \varphi$?
4. Що характеризує величина $\cos \varphi$ та її фізичне значення?
5. Що таке компенсація реактивної потужності?
6. Якими засобами можна підвищити ефективність роботи двигунів?

9. Список літератури

1. Ермилов А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий'. -М.: Энергоатомиздат, 1986. -С.144-157.
2. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию./Под общ. ред. А.А. Федорова.-М.: Энергия, 1986.-С.221-248.
3. Инструктивные материалы главэнергонадзора: Минэнерго СССР.-М.: Энергоатомиздат, 1986.-С.276-339.
4. Копытов Ю.М., Чуланов Б.А. Экономия электроэнергии в промышленности: Справочник.- М.: Энергоатомиздат, 1989.-234с.
5. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. - М.: ЭНАС, 2009. - 456 с.: ил.
6. Компенсация реактивной мощности. Библиотека электромонтёра / Б. А. Константинов, Г. З. Зайцев. - Л., "Энергия", 1976. 104 с. с ил. (Б-ка электромонтера. Вып. 445.)

Упорядники:
Юрій Тимофійович Разумний
Олена Ігорівна Хованська
Сергій Володимирович Дибрін

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ
ДОСЛІДНИЦЬКОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ ЕЗ-2 (2)
"ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ
ПОТУЖНОСТІ НА ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ"
ДЛЯ СТУДЕНТІВ НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ 6.050701
„ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ”

Редакційно-видавничий комплекс

Підписано до друку . Формат 30x42/4.
Папір Rollux. Ризографія. Умови, друк. арк. . Обліково-видавн.
арк. . Тираж 100 прим. Зам. № . Безкоштовно.

Державний вищий навчальний заклад
„Національний гірничий університет”
49600, ДСП, м. Дніпропетровськ, просп. К.Маркса, 19