

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри
Дмитро БОСІЙ

« 20 » 12 20 21 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ**

Theme **Improving the quality of electricity in 35 kV switchgear**

Керівник дипломної роботи доцент Дмитро БОСІЙ

Нормоконтролер доцент Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студент групи ЕС2021

Денис БЕЗВЕРХИЙ

Student

Denys Bezverkhyi

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

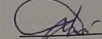
Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

 Дмитро Босий

« 25 » січня 2021р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр
студента групи ЕС2021 Безверхого Дениса Володимировича

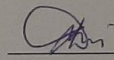
- 1 Тема дипломної роботи: **«Підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ».**
затверджена наказом по університету від «15» січня 2021 р. № 31ст
- 2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.
- 3 Вихідні дані до дипломної роботи: параметри споживаної електроенергії в розподільчих пристроях 35 кВ.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): визначення засобів підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ.
- 5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
1.	ВСТУП	17.09	5
2.	ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	01.10	25
3.	ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	11.11	35
4.	РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ДЛЯ ПІДСТАНЦІЇ 35 КВ	01.12	25
5.	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
6.	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

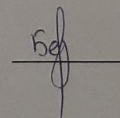
Дата видачі завдань «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи, доцент



Дмитро Босий

Завдання прийняв до виконання



Денис Безверхий

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	9
2 ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	22
2.1 Реактивна потужність, як необхідна складова промислового процесу.....	22
2.2 Вплив реактивної потужності на якість електроенергії.....	23
2.3 Компенсація реактивної потужності.....	26
2.4 Стандартні компенсуючі установки.....	31
2.5 Сучасні статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності для ліній електропередач та підстанцій.....	38
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ДЛЯ ПІДСТАНЦІЇ 35 кВ.....	45
3.1 Теоретичні відомості технічної та економічної доцільності.....	45
3.2 Розрахунок параметрів установки поперечної ємнісної компенсації	47
3.3 Економічне обґрунтування застосування пристроїв поперечної компенсації.....	51
3.3.1 Теоретичні основи техніко-економічного обґрунтування застосування пристроїв поперечної компенсації.....	51
3.3.2 Капітальні витрати на установку поперечно-ємнісної компенсації.....	53
3.3.3 Експлуатаційні витрати на установку поперечно-ємнісної компенсації.....	54
3.3.4 Економічний ефект на УПК.....	56
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

					02.15.ЕС2021.РД.2021-ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробник	Д. Безверхий	7012		2012			5	61
Керівник	Д. Босий	7012		2012				
Н. контр.	В. Перцевий	7012		2012				
						УДУНТ, ІСЕ, гр. ЕС2021		

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____/Дмитро БОСИЙ/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ**

Theme **Improving the quality of electricity in 35 kV switchgear**

Керівник дипломної роботи доцент _____ Дмитро БОСИЙ

Нормоконтролер доцент _____ Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студент групи ЕС2021 _____ Денис БЕЗВЕРХИЙ

Student Denis Bezverkhy

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

_____ Дмитро Босий

« 25 » січня 2021р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр
студента групи ЕС2021 Безверного Дениса Володимировича

1 Тема дипломної роботи: **«Підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ».**

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021 р. № 31ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи: параметри споживаної електроенергії в розподільчих пристроях 35 кВ.

4 Зміст пояснювальної записки {перелік питань до розробки}: визначення засобів підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ.

5 Перелік креслень {демонстраційного матеріалу}: ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
1.	ВСТУП	17.09	5
2.	ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	01.10	25
3.	ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	11.11	35
4.	РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ДЛЯ ПІДСТАНЦІЇ 35 КВ	01.12	25
5.	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
6.	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдань «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи, доцент _____

Дмитро Босий

Завдання прийняв до виконання _____

Денис Безверхий

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 61 сторінок, складається із 3 розділів та містить 6 ілюстрації, 5 таблиць, 20 використаних джерел.

Мета роботи – розробка способів підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ.

У даній роботі проаналізовано показники якості електроенергії та способи їх впливу на роботу електрообладнання. Визначено способи підвищення якості електроенергії за допомогою компенсації реактивної потужності.

Зроблено аналіз впливу реактивної потужності на якість електроенергії та розкрито основні характеристики сучасних компенсуючих установок.

Розкрито особливості компенсації реактивної потужності в електричних мережах 35 кВ. Визначено засоби компенсації реактивної потужності та проведено техніко-економічний розрахунок параметрів установки поперечної компенсації для підстанції 35 кВ.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ, РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	9
2 ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	22
2.1 Реактивна потужність, як необхідна складова промислового процесу.....	22
2.2 Вплив реактивної потужності на якість електроенергії.....	23
2.3 Компенсація реактивної потужності.....	26
2.4 Стандартні компенсуючі установки.....	31
2.5 Сучасні статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності для ліній електропередач та підстанцій.....	38
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ДЛЯ ПІДСТАНЦІЇ 35 КВ.....	45
3.1 Теоретичні відомості технічної та економічної доцільності.....	45
3.2 Розрахунок параметрів установки поперечної ємнісної компенсації	47
3.3 Економічне обґрунтування застосування пристроїв поперечної компенсації.....	51
3.3.1 Теоретичні основи техніко-економічного обґрунтування застосування пристроїв поперечної компенсації.....	51
3.3.2 Капітальні витрати на установку поперечно-ємнісної компенсації.....	53
3.3.3 Експлуатаційні витрати на установку поперечно-ємнісної компенсації.....	54
3.3.4 Економічний ефект на УПК.....	56
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розробник		Д. Безверхий			Підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ		Літ.	Арк.	Аркушів	
								5	61	
Керівник		Д. Босий					УДУНТ, ІСЕ, гр. ЕС2021			
Н. контр.		В. Перцевий								

ВСТУП

Актуальність роботи. Забезпечення необхідної якості електричної енергії це проблема, яка є на всіх етапах існування електричної енергії, включаючи генерацію, передачу, розподіл та споживання. Якість електроенергії, поряд з надійністю, безпекою та економічністю, є однією з обов'язкових вимог, що пред'являються до систем електропостачання.

Відхилення показників якості від допустимих значень наводить до порушення нормальної роботи електроприймачів, скорочення їх терміну служби, виникнення браку продукції, зниження продуктивності у промисловості, тобто до різних збитків.

Економічні збитки від низької якості електричної енергії в Україні, складають значну сумму. Приймаючи велику значимість електричної енергії у житті людей, величезні розміри енергетичної системи України, дуже відчутні щорічні збитки економіці через низьку якість електричної енергії, слід констатувати, що забезпечення якості електричної енергії є найважливішим державним завданням, вирішувати яке потрібно комплексно на основі системного підходу.

Одним із найдешевших і одночасно найефективніших засобів підвищення техніко-економічних показників електричних систем є компенсація реактивної потужності. Даний засіб зменшує всі види втрат і капіталовкладень на мережні об'єкти і електростанції, відсовує терміни їх споруди. Створюється при цьому і база для підвищення якості електроенергії. Проте в Україні цей засіб використовується явно недостатньо. Низький ступінь оснащення вітчизняних мереж компенсуючими пристроями, відставання мережного будівництва від введення генеруючих потужностей і відставання цього введення від зростання навантажень ведуть не тільки до необґрунтовано високих втрат потужності і електроенергії, завищених приведених витрат, розповсюдження місцевих дефіцитів реактивної потужності, а і до зниження показників якості електроенергії.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому використання установок компенсації реактивної потужності це один з найпростіших і ефективних способів підвищення якості електроенергії та енергозбереження в промислових розподільних мережах.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання» Українському державному університеті науки і технологій.

Мета і завдання роботи. Визначення можливості підвищення якості електроенергії в розподільчих пристроях 35 кВ при застосуванні пристроїв компенсації реактивної потужності.

Об'єкт дослідження – якість електроенергії в розподільчих пристроях.

Предмет дослідження – виявлення чинників, що впливають на показники якості електроенергії, та визначення пристроїв для підвищення показників якості електроенергії.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань в роботі виконані узагальнення і аналіз матеріалів науково - технічної літератури, методи теоретичних та експериментальних досліджень.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист.

Використовується вдосконалена методика визначення параметрів пристрою компенсації реактивної потужності.

Реалізація наявних технічних рішень дозволить підвищити якість електроенергії та зменшити споживання електроенергії.

Практичне значення отриманих результатів. Отримано розрахункові параметри пристрою компенсації реактивної потужності для застосування в розподільних пристроях 35 кВ для підвищення якості електроенергії та зменшення споживання електроенергії.

Особистий внесок здобувача Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження отримані здобувачем самостійно.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Апробація результатів роботи.

Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на науково-практичній конференції:

81 Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р., Дніпро.

Публікації.

Безверхий Д. В., Підвищення якості електричної енергії в розподільчих пристроях 35 кВ / Енергетика та електромеханіка [електронний ресурс]: збірник тез доповідей секції 81 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р. – Дніпро: Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2021. – 42 с.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Всі електроприймачі повинні забезпечуватись електроенергією необхідної якості. Якість електричної енергії тісно пов'язана з надійністю електропостачання, оскільки нормальним режимом електропостачання споживачів є такий режим, за якого споживачі одержують електроенергію безперебійно, і в кількості, наперед узгодженій з енергозабезпечуючою організацією.

Норми якості електричної енергії (ЯЕ), встановлені стандартом, є рівнями електромагнітної сумісності для кондуктивних електромагнітних завад в системах електропостачання загального призначення. При дотриманні встановлених норм ЯЕ забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж енергозабезпечуючих організацій і електричних мереж споживачів електричної енергії або електроприймачів (ЕП).

Стандартом ГОСТ 13109-97 встановлюються наступні показники якості електроенергії (ПЯЕ):

- стале відхилення напруги δU_v ;
- розмах зміни напруги δU_t ;
- доза флікера P_t ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n -ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$;
- коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності K_{2U} ;
- коефіцієнт несиметрії напруги по нульовій послідовності K_{0U} ;
- відхилення частоти Δf ;
- тривалість провалу напруги $\Delta t_{\text{п}}$;
- імпульсна напруга $U_{\text{імп}}$;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}U}$.

При визначенні значень деяких ПЯЕ стандартом вводяться наступні допоміжні параметри електричної енергії:

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

- частота повторень змін напруги $F_{\delta U_t}$;
- інтервал між змінами напруги $\Delta t_{j,j+1}$;
- глибина провалу напруги δU_n ;
- частота появи провалів напруги F_n ;
- тривалість імпульсу по рівню 0,5 його амплітуди $\Delta t_{\text{імп}0,5}$;
- тривалість тимчасової перенапруги $\Delta t_{\text{пер}U}$.

У таблиці 1.1 наведені властивості електричної енергії, показники, які її характеризують і найвірогідніші винуватці погіршення ЯЕ [1].

Стандартом встановлюються способи розрахунку і методики визначення ПЯЕ і допоміжних параметрів, вимоги до похибок вимірювань і інтервалів усереднювання ПЯЕ, які повинні реалізовуватися в приладах контролю ЯЕ при вимірюваннях показників і їх обробці.

Таблиця 1.1 – Властивості електричної енергії, показники та найвірогідніші чинники погіршення ЯЕ

Властивості електричної енергії	Показник якості електричної енергії	Найбільш вірогідні чинники погіршення ЯЕ
Відхилення напруги	Стале відхилення напруги δU_v	Електропостачальна організація
Коливання напруги	Розмах зміни напруги δU_t Доза флікера P_t	Споживач зі змінним навантаженням
Несинусоїдальність напруги	Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U Коефіцієнт n -ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$	Споживач з нелінійним навантаженням
Несиметрія трифазної системи напруги	Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності K_{2U} Коефіцієнт несиметрії напруги по нульовій послідовності K_{0U}	Споживач з несиметричним навантаженням
Відхилення частоти	Відхилення частоти Δf	Електропостачальна організація
Провал напруги	Тривалість провалу напруги Δt_n	Електропостачальна організація
Імпульс напруги	Імпульсна напруга $U_{\text{імп}}$	Електропостачальна організація
Тимчасова перенапруга	Коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}U}$	Електропостачальна організація

Відхилення напруги від номінальних значень відбуваються через добові, сезонні і технологічні зміни електричного навантаження споживачів; зміни потужності компенсуючих пристроїв; регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистем; зміни схеми і параметрів електричних мереж.

Відхилення напруги визначається різницею між діючим U і номінальним $U_{ном}$ значеннями напруги, В:

$$\delta U = U - U_{ном},$$

або, %

$$\delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%.$$

Стале відхилення напруги δU_y рівне, %:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

де U_y - стале (діюче) значення напруги за інтервал усереднювання.

Стандартом нормується відхилення напруги на затискачах приймачів електричної енергії. Нормально допустимі та гранично допустимі значення сталого відхилення напруги встановлені відповідно ± 5 і ± 10 % від номінального значення напруги і в точках загального приєднання споживачів електричної енергії повинні бути встановлені в договорах енергопостачання для годин мінімуму і максимуму навантажень в енергосистемі з урахуванням необхідності виконання норм стандарту на затисках приймачів електричної енергії відповідно до нормативних документів.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Коливання напруги викликаються різкою зміною навантаження на даній ділянці електричної мережі, наприклад, включенням асинхронного двигуна з великою кратністю пускового струму, технологічними установками з швидкозмінним режимом роботи, який супроводжується поштовхами активної і реактивної потужності, такими, як привід реверсивних прокатних станів, дугові сталеплавильні печі, зварювальні апарати та інші [2].

Коливання напруги характеризуються двома показниками:

- розмахом зміни напруги;
- дозою флікера.

Розмах зміни напруги δU_t обчислюють по формулі, %

$$\delta U_t = \frac{U_i - U_{i+1}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

де U_i , U_{i+1} - значення наступних один за іншим екстремумів (або екстремуму і горизонтальної ділянки) огинаючих середньоквадратичних значень напруги.

Частота повторення змін напруги $F_{\delta U_t}$ (1/с, 1/хв) визначається виразом:

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{T},$$

де m - число змін напруги за час T ;

T - інтервал часу вимірювання, що приймається рівним 10 хв.

Якщо дві зміни напруги відбуваються з інтервалом меншим 30 мс, то їх розглядають як одну. Інтервал часу між змінами напруги рівний:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i,i+1} - t_i.$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Оцінка допустимості розмахів зміни напруги (коливань напруги) здійснюється за допомогою кривих залежності допустимих розмахів коливань від частоти повторень змін напруги або інтервалу часу між подальшими змінами напруги.

Гранично допустимі значення розмаху зміни напруги δU_t визначаються в точці загального приєднання до електричних мереж по кривих, наведених в ГОСТ. Ці залежності мають строгий енергетичний сенс – величини, пропорційні квадратам ординат, характеризують середнє значення потужності коливань напруги і пропорційне йому значення коливань світлового потоку (доза флікера), безболісно сприйнятим зоровим аналізатором людини протягом 10...15 хв [3].

Гранично допустиме значення суми сталого відхилення напруги δU_y і розмаху змін напруги δU_t в точках приєднання до електричних мереж напругою 0,38 кВ рівне $\pm 10\%$ від номінальної напруги.

Несинусоїдальність напруги виникає в процесі вироблення, перетворення, розподілу і споживання електроенергії, коли мають місце спотворення форми синусоїдальних струмів і напруг. Джерелами спотворень є синхронні генератори електростанцій, силові трансформатори, що працюють при підвищених значеннях магнітної індукції в сердечнику (при підвищеній напрузі на їх виводах), перетворювальні пристрої змінного струму в постійний і електрообладнання з нелінійними вольт-амперними характеристиками (або нелінійні навантаження).

Спотворення, які створюються синхронними генераторами і силовими трансформаторами, малі і не мають істотного впливу на систему електропостачання і на роботу електрообладнання. Головною причиною спотворень є вентильні перетворювачі, сталеплавильні електродугові і руднотермічні печі, установки дугового і контактного зварювання, перетворювачі частоти, індукційні печі, ряд електронних технічних засобів (телевізійні приймачі, ПЕВМ), газорозрядні лампи і ін. Електронні приймачі електроенергії і газорозрядні лампи створюють при своїй роботі невисокий рівень гармонійних спотворень на виході, але загальна кількість таких ЕП велика.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Несинусоїдальність напруги характеризується наступними показниками:

- коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнтом n -ої гармонійної складової напруги.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U визначається виразом, %

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100,$$

де $U_{(n)}$ - діюче значення n -ої гармонійної складової напруги, В;

n – порядок гармонійної складової напруги;

N – порядок останньої з гармонійних складових напруги що враховуються стандартом, встановлюється $N=40$;

$U_{(1)}$ – діюче значення напруги основної частоти, В.

Допускається визначати K_U за виразом, %

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{ном}} \cdot 100,$$

де $U_{ном}$ - номінальна напруга мережі, В.

Коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги рівний, %

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100.$$

Допускається обчислювати $K_{U(n)}$ за виразом, %

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{ном}} \cdot 100.$$

Для обчислення $K_{U(n)}$ необхідно визначити рівень окремих гармонік напруги, що генеруються нелінійним навантаженням.

Фазну напругу гармоніки в розрахунковій точці мережі знаходять з виразу:

$$U_{(n)} = \frac{I_{(n)} \cdot n \cdot U_{нл} \cdot U_{ном}}{S_k},$$

де $I_{(n)}$ – діюче значення фазного струму n -ої гармоніки;

$U_{нл}$ – напруга нелінійного навантаження (якщо розрахункова точка співпадає з точкою приєднання нелінійного навантаження, то $U_{нл} = U_{ном}$);

$U_{ном}$ – номінальна напруга мережі;

S_k – потужність короткого замикання в точці приєднання нелінійного навантаження.

Для розрахунку $U_{(n)}$ необхідно заздалегідь визначити струм відповідної гармоніки, який залежить не тільки від електричних параметрів, але і від виду нелінійного навантаження.

Гранично допустиме значення коефіцієнта n -ої гармонійної складової напруги обчислюють по формулі:

$$K_{U(n)zp} = 1,5 \cdot K_{U(n)ном},$$

де $K_{U(n)ном}$ – нормальне допустиме значення коефіцієнта n -ої гармонійної складової напруги.

Несиметрія напруги. Найпоширенішими джерелами несиметрії напруги в трифазних системах електропостачання є такі споживачі електроенергії, симетричне багатofазне виконання яких або неможливе, або недоцільне з

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

техніко-економічних міркувань. До таких установок відносяться індукційні і дугові електричні печі, тягові навантаження залізниць, виконані на змінному струмі, агрегати електрозварювання, спеціальні однофазні навантаження, освітлювальні установки. Несиметричні режими напруги в електричних мережах мають місце також в аварійних ситуаціях – при обриві фази або несиметричних коротких замиканнях. Несиметрія напруг характеризується наявністю в трифазній електричній мережі напруг зворотної або нульової послідовностей, значно менших по величині відповідних складових напруги прямої (основної) послідовності.

Несиметрія трифазної системи напруг виникає в результаті накладання на систему прямої послідовності напруг системи зворотної послідовності, що приводить до змін абсолютних значень фазних та міжфазних напруг.

Окрім несиметрії, яка викликається напругою системи зворотної послідовності, може виникати несиметрія від накладення на систему прямої послідовності напруг системи нульової послідовності. В результаті зсуву нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазних напруг при збереженні симетричної системи міжфазних напруг [4].

Несиметрія напруг характеризується наступними показниками:

- коефіцієнтом несиметрії напруг по зворотній послідовності;
- коефіцієнтом несиметрії напруг по нульовій послідовності.

Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності визначається як:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100,$$

де $U_{2(1)}$ – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В;

$U_{1(1)}$ – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, В.

Допускається обчислювати K_{2U} виразом, %:

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{ном}} \cdot 100,$$

де $U_{ном}$ – номінальне значення міжфазної напруги мережі, В.

Коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності визначається як:

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де $U_{0(1)}$ – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В.

Допускається обчислювати K_{0U} по формулі:

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{ном.ф}} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

де $U_{ном.ф}$ – номінальне значення фазної напруги, В.

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг по нульовій послідовності проводять в чотирьохпроводній мережі.

Відносна похибка визначення K_{2U} і K_{0U} по формулах (1.1) і (1.2) чисельно рівна значенню відхилень напруги $U_{1(1)}$ від $U_{ном}$.

Нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності в точці загального приєднання до електричних мереж рівні 2,0 і 4,0 % [5].

Нормовані значення коефіцієнта несиметрії напруг по нульовій послідовності в точці загального приєднання до чотирьохпроводних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ також рівні 2,0 і 4,0 %.

Відхилення частоти – різниця між дійсним і номінальним значеннями частоти, Гц

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}},$$

або, %

$$\Delta f = \frac{f - f_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \cdot 100.$$

Стандартом ГОСТ 13109-97 встановлюються нормально і гранично допустимі значення відхилення частоти, рівні $\pm 0,2$ Гц і $\pm 0,4$ Гц, відповідно.

Частота f є загальносистемним параметром режиму електроенергетичної системи (ЕЕС) і визначається балансом активної потужності. При виникненні дефіциту потужності, що генерується, в системі відбувається зниження частоти до такого значення, при якому встановлюється новий баланс потужності, що генерується і споживаної; при надлишку генерованої потужності, навпаки, частота підвищується.

Частота змінного струму в електричній системі визначається частотою обертання генераторів електричних станцій. Номінальне значення частоти 50 Гц (у деяких країнах 60 Гц) може бути забезпечене за наявності резерву активної потужності на електростанціях.

Якість електроенергії по частоті характеризується сталим відхиленням частоти $\Delta f = f_y - f_{\text{ном}}$, де $f_{\text{ном}}$ і f_y - номінальне і усталене (фактичне) значення частоти, Гц.

Провал напруги. До провалів напруги відноситься раптова значна зміна напруги в точці електричної мережі нижче за рівень $0,9 U_{\text{ном}}$, за яким слідує відновлення напруги до первинного або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд. Характеристикою провалу напруги є його тривалість Δt_n , яка рівна:

$$\Delta t_n = t_n - t_k,$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

де t_n і t_k – початковий і кінцевий моменти часу провалу напруги.

Провал напруги характеризується також глибиною провалу напруги δU_n – різницею між номінальним значенням напруги і мінімальним діючим значенням напруги U_{md} , вираженим в одиницях напруги або у відсотках від її номінального значення. Провал напруги обчислюється за виразами:

$$\delta U_n = U_{ном} - U_{md},$$

або, %

$$\delta U_n = \frac{U_{ном} - U_{md}}{U_{ном}} \cdot 100.$$

Гранично допустиме значення тривалості провалу напруги в електричних мережах напругою до 20 кВ включно рівне 30 с [6]. Тривалість провалу напруги в будь-якій точці приєднання, що автоматично усувається, для електричних мереж визначається витримками часу релейного захисту і автоматики.

Імпульс напруги і тимчасова перенапруга. Спотворення форми кривої живлячої напруги може відбуватися за рахунок появи високочастотних імпульсів при комутаціях в мережі, роботі розрядників та ін. Імпульс напруги – різка зміна напруги в точці електричної мережі, за якою слідує відновлення напруги до первинного або близького до нього рівня. Величина спотворення напруги при цьому характеризується показником імпульсної напруги. Імпульсна напруга у відносних одиницях рівна:

$$\delta U_{имп} = \frac{U_{имп}}{\sqrt{2}U_{ном}},$$

де $U_{имп}$ – значення імпульсної напруги, В.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Амплітудою імпульсу називається максимальне миттєве значення імпульсу напруги. Тривалість імпульсу ($\Delta t_{\text{імп}}$) – це інтервал часу між початковим моментом імпульсу напруги і моментом відновлення миттєвого значення напруги до первинного або близького до нього рівня.

Тимчасова перенапруга – підвищення напруги в точці електричної мережі вище $1,1U_{\text{ном}}$ тривалістю більше 10 мс, що виникають у системах електропостачання при комутаціях або коротких замиканнях.

Тимчасова перенапруга характеризується коефіцієнтом тимчасового перенапруження ($K_{\text{пер}U}$) – це величина, рівна відношенню максимального значення огинаючої амплітудних значень напруги за час існування тимчасового перенапруження ($U_{a\text{max}}$) до амплітуди номінальної напруги мережі:

$$K_{\text{пер}U} = \frac{U_{a\text{max}}}{\sqrt{2}U_{\text{ном}}}.$$

Тривалістю тимчасової перенапруги ($\Delta t_{\text{пер}U}$) називається інтервал часу між початковим моментом виникнення тимчасової перенапруги і моментом її зникнення.

$$\Delta t_{\text{пер}U} = t_{n,\text{пер}U} - t_{к,\text{пер}U}.$$

Коефіцієнт тимчасової перенапруги стандартом не нормується.

Зниження якості електроенергії може привести до ряду негативних наслідків технологічного і електромагнітного характеру. Серед них такі як:

- збільшення втрат активної потужності і електроенергії;
- скорочення терміну служби електроустаткування;
- збільшення капітальних вкладень в електричну систему;
- порушення нормального ходу технологічних процесів споживачів.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Звідси розрізняють два види збитків від погіршення якості електричної енергії: електротехнічний та технологічний.

Електротехнічні збитки викликані збільшенням втрат активної потужності і електроенергії, скороченням терміну служби приладів та електроустаткування, раптовими зворотніми та незворотними відмовами технічних засобів.

Технологічні збитки викликані недовипуском або браком продукції, відмовами в роботі обладнання, які викликають порушення технологічного процесу.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2 ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

2.1 Реактивна потужність, як необхідна складова промислового процесу

На сучасному етапі розвитку майже все побутове навантаження, не кажучи про промислове виробництво, в тій чи іншій мірі має індуктивний характер. Поява терміна «реактивна» потужність пов'язана з необхідністю виділення складової потужності, споживаного навантаженням, яка формує електромагнітні поля і забезпечує обертаючий момент двигуна. Ця складова має місце при індуктивному характері навантаження.

На відміну від активної енергії, яка перетворюється в корисні - механічну, теплову та інші види енергії, реактивна енергія не пов'язана з виконанням корисної роботи, а витрачається на створення електромагнітних полів в електродвигунах, трансформаторах, індукційних печах, зварювальних трансформаторах, дроселях, освітлювальних приладах.

Споживачами реактивної потужності, необхідної для створення магнітних полів, є як окремі ланки електропередачі (трансформатори, лінії, реактори), так і такі електроприймачі, які перетворюють електроенергію в інший вид енергії, які за принципом своєї дії використовують магнітне поле (асинхронні двигуни, індукційні печі та інші). До 80...85% всієї реактивної потужності, пов'язаної з утворенням магнітних полів, споживають асинхронні двигуни та трансформатори [7]. Відносно невелика частина в загальному балансі реактивної потужності доводиться на частку інших її споживачів, наприклад на індукційні печі, зварювальні трансформатори, перетворюючі установки, люмінісцентне освітлення і т.п.

Трансформатор є одним з основних ланок у передачі електроенергії від електростанції до споживача. Трансформатор є споживачем значної частини реактивної потужності, яка необхідна для створення змінного магнітного потоку, за допомогою якого енергія з однієї обмотки трансформатора передається в іншу.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Асинхронний двигун також являється споживачем реактивної потужності. Асинхронні двигуни поряд з активною потужністю споживають до 60...65% всієї реактивної потужності навантажень енергосистеми [8]. За принципом дії асинхронний двигун подібний трансформатору. Як і в трансформаторі, енергія первинної обмотки двигуна - статора передається у вторинну - ротор за допомогою магнітного поля.

Перетворювальні установки, які використовуються на залізничному транспорті та перетворюють змінний струм в постійний за допомогою випрямлячів, також відносяться до великих споживачів реактивної потужності.

Показником споживання реактивної енергії (потужності) є коефіцієнт потужності $\cos\varphi$. Він показує співвідношення активної потужності P і повної потужності S , споживаної електроприймачами з мережі:

$$\cos \varphi = P / S.$$

Таким чином, $\cos\varphi$ зменшується, коли споживання реактивної потужності навантаженням збільшується. Чим нижче значення $\cos\varphi$, тим менш ефективно працюють енергетичні установки.

2.2 Вплив реактивної потужності на якість електроенергії

Всі електроприймачі проектуються і виготовляються з розрахунку на певні номінальні електричні параметри: частоту, напругу, струм і т.д. При цьому передбачається що підведена напруга змінного струму синусоїдальна і для трифазних систем симетрична. В основі проектування електроприймачів лежить вимога забезпечення їх найекономнішої роботи саме при номінальних параметрах.

Якість електроенергії, що підводиться до споживачів, характеризується ступенем близькості напруги і струму до перерахованих вище номінальних параметрів.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Якість електроенергії на виході з електростанцій достатньо висока, але в процесі її передачі по мережі і споживання вона погіршується.

По-перше, унаслідок втрат напруги в мережі значення його у споживача зменшується; по-друге, в результаті впливу ряду специфічних електроприймачів і перетворювачів електроенергії виникають несиметрія і несинусоїдальність напруги.

Дуже важливо підтримувати рівень напруги, що підводиться до споживачів електроенергії, в певних межах. Для цього проводять різні заходи для компенсації і зниження втрат напруги в електричних мережах живлячої енергосистеми які дозволяють забезпечити при змінах її навантаження достатньо стабільний рівень напруги на приєднаних до енергосистеми електроустановках. Ці заходи проводять як в самій системі, так і в установках, приєднаних до неї споживачів зокрема в пристроях електричної тяги.

Характерною особливістю роботи електроспоживачів є вплив їх на якість електроенергії живильних мереж. У свою чергу нормальна робота електрообладнання залежить від якості електроенергії живильної системи. Такий взаємний вплив електрообладнання і живильної системи визначають терміном "електромагнітна сумісність".

Вирішення проблеми електромагнітної сумісності пов'язано з визначенням і підтримкою оптимальних показників якості електроенергії, при яких виконуються технічні вимоги з мінімальними витратами.

При розробці нових приймачів електроенергії необхідно враховувати той негативний вплив, який вони можуть чинити на живлячу електричну мережу. При оцінці повинні прийматися в увагу додаткові пристрої, що запобігають погіршенню якості електричної енергії. Необхідні норми якості електричної енергії можуть бути досягнуті вже на стадії проектування електропостачання промислових підприємств шляхом відповідних розрахунків і застосування технічних засобів.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Розглядаючи проблему з іншого боку, елементи розподільної мережі (лінії електропередачі, підвищуючі та понижуючі трансформатори) в силу особливостей конструктивного виконання мають позовжний індуктивний опір. Тому, навіть для навантаження яке споживає тільки активну потужність, на початку розподільчої мережі буде мати місце індуктивна складова - реактивна потужність. Величина цієї реактивної потужності залежить від індуктивного опору розподільної мережі і повністю витрачається на втрати в елементах цієї розподільної мережі [9].

Повний струм I , втрати напруги ΔU і потужності ΔP лінії пов'язані з навантаженнями P і Q і опорами лінії R і X співвідношеннями:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{P \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2}}{\sqrt{3} \cdot U},$$

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} = \frac{P \cdot R \cdot (1 + \xi \cdot \operatorname{tg})}{U},$$

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R = \frac{P^2 (1 + \operatorname{tg}^2)}{U^2} \cdot R,$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ - коефіцієнт реактивної потужності; $\xi = X/R$.

Як впливає з формул, значення кожного параметра визначається як активним, так і реактивним навантаженням.

З наведених формул впливає, що передача реактивної потужності «забирає» істотну частину перерізу проводів і потужності трансформаторів знижуючи можливості передачі активної потужності, і призводить до збільшення втрат потужності і електроенергії (при $\operatorname{tg} \varphi = 0,5$ близько 20% сумарних втрат) [9].

Так як в сучасні електричні системи входить велика кількість трансформаторів і протяжних повітряних ліній, то реактивний опір

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

передавального пристрою виходить досить значним, а це викликає чималі втрати напруги та реактивної потужності.

Ще більший вплив реактивна потужність виконує на режими напруги. Втрати напруги, обумовлені передачею реактивної потужності, складають близько 1/3 сумарних втрат напруги в мережах 6...10 кВ і близько 2/3 в мережах більш високих напруг. При цьому зниження напруги що відбувається в мережі, призводить до ще більшого збільшення втрат електроенергії та зниження пропускної здатності ліній і трансформаторів. Для трансформаторів характерні значення $\xi=20\ldots 30$, тому втрати напруги в них практично повністю визначаються переданою реактивною потужністю [10].

Крім впливу на економічні показники мереж, передача реактивної потужності може призвести до порушення технічних обмежень по допустимим напругам у вузлах споживання енергії.

Таким чином, транспортування реактивної потужності по розподільних мережах від центрів живлення до споживачів перетворюється в складну техніко-економічну проблему, що зачіпає як питання економічності так і питання надійності систем електропостачання та якості електроенергії.

2.3 Компенсація реактивної потужності

Індуктивно-реактивному навантаженню, створюваному електричними споживачами, можна протидіяти за допомогою ємкісного навантаження, наприклад підключаючи точно розрахований конденсатор. Це дозволяє знизити реактивну потужність, споживану від мережі і називається коригуванням коефіцієнта потужності або компенсацією реактивної потужності.

Компенсація реактивної потужності, в даний час, є важливим чинником та дозволяє вирішити питання енергозбереження, зниження навантажень на електромережу та підвищення якості електроенергії.

Тому одним з основних питань, пов'язаних з підвищенням якості електроенергії в мережах, розв'язуваних як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації систем промислового електропостачання, є питання про

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

компенсацію реактивної потужності, що включає вибір доцільних джерел, розрахунків та регулювання їх потужності, розміщення джерел у системі електропостачання [11].

Слід зазначити, що практично всі показники якості електроенергії по напрузі залежать від споживаної промисловими електроприймачами реактивної потужності. Тому питання якості електроенергії необхідно розглядати в безпосередньому зв'язку з питаннями компенсації реактивної потужності.

Проблема електромагнітної сумісності електроприймачів з мережею живлення породжує нові наукові і технічні проблеми при проектуванні й експлуатації промислових електричних мереж.

Класичним вирішенням даної проблеми в розподільних мережах є компенсація реактивної потужності біля споживача шляхом установки в нього додаткових джерел реактивної потужності.

У ряді випадків вживані пристрої служать одночасно як для компенсацій або зниження споживаної реактивної потужності, так і для стабілізації і регулювання рівня напруги, одержуваної приєднаними до енергосистеми електроустановками. Реактивна потужність може бути вироблена як на електростанціях, так і наприклад, компенсуючими установками, якими можуть бути синхронні компенсатори, установки поперечної і подовжньої компенсації ємності [12].

На електрифікованих залізницях застосовуються більш економічні компенсаторні установки порівняно невеликої потужності. Вартість виробництва реактивної потужності в великих генераторах електростанцій у декілька разів менше витрат на її генерацію від конденсаторних установок. Проте витрати на передачу реактивної потужності по мережах енергосистеми до споживача у багато разів перевершують вартість її генерації на електростанції. Таким чином питання компенсації реактивної потужності і регулювання напруги у багатьох випадках тісно зв'язані між собою [13].

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Правильний вибір пристроїв компенсації реактивної потужності (КРП) і їх характеристик забезпечує сприятливий режим експлуатації електроустановок, а саме:

- струмове навантаження на струмоведучі частини і комутаційну апаратуру (вимикачі автоматичні, контактори) знижується на 20...60%;
- знижуються втрати на провідниках за рахунок зменшення їх нагріву;
- розвантажуються живлячі лінії електропередачі, трансформатори і розподільні пристрої;
- збільшується термін служби проводів і кабелів;
- вивільняється трансформаторна потужність, збільшується термін служби трансформаторного масла;
- зростає якість напруги у електроприймачів, як наслідок поліпшується освітленість на робочих місцях, збільшується продуктивність устаткування, поліпшується якість виробів;
- знижуються витрати на оплату електроенергії;
- зменшується рівень гармонік в мережі;
- розподільні мережі стають більш надійними та економічними.

Техніко-економічний ефект, очікуваний в результаті застосування пристроїв компенсації реактивної потужності, представлений в табл. 2.1 та табл.2.2.

Таблиця 2.1 – Зниження величини повної потужності при компенсації реактивної потужності

cosφ без компенсації	Зниження величини повної потужності при компенсації до cosφ= 0,95
0,95	0%
0,90	5%
0,85	11%
0,80	16%
0,75	21%
0,70	26%
0,65	32%
0,60	37%

Таблиця 2.2 – Зниження величини струму і повної потужності при застосуванні компенсації

$\cos\varphi_1$, без компенсації	$\cos\varphi_2$, з компенсацією	Зниження величини струму і повної потужності, %	Зниження величини теплових втрат, %
0,5	0,9	44	69
0,5	1	50	75
0,6	0,9	33	55
0,6	1	40	64
0,7	0,9	22	39
0,7	1	30	51
0,8	1	20	36

При виборі оптимальної потужності пристроїв КРП необхідно зіставляти їх вартість з ефектом, отриманим від поліпшення всіх перерахованих параметрів електричних мереж.

Співвідношення вартостей виробництва і передачі по електричним мережам для активної та реактивної потужності істотно розрізняються. Виробництво активної потужності (енергії) на великих електростанціях набагато дешевше її виробництва на невеликих станціях, розташованих у вузлах навантаження [14]. Зниження вартості виробництва, що відбувається при його концентрації на великих електростанціях, істотно перевершує збільшення вартості втрат електроенергії, зумовлених її передачею на далекі відстані. Вироблення ж реактивної потужності безпосередньо у вузлах навантаження здійснюється порівняно дешевими технічними засобами - компенсуючими пристроями (КП). Витрати на одиницю потужності КП в 10...20 разів нижче витрат на генераторну потужність електростанцій. І хоча вироблення реактивної потужності на електростанціях набагато дешевше, ніж з допомогою КП, проте вартість її передачі у вузли споживання в кілька разів перевищує витрати на КП. Крім того, у більшості випадків це практично «безкоштовну» реактивну

потужність технічно неможливо передати по мережі до віддалених вузлів навантаження через неприпустиме зниження напруги в мережі.

Тому на сьогоднішній день існує декілька видів компенсації реактивної потужності.

Одинична компенсація (рис. 2.1, а) - переважна там, де:

- потрібна компенсація потужних (понад 20 кВт) споживачів;
- споживана потужність постійна протягом довгого часу.

Групова компенсація (рис. 2.1, б) застосовується для випадку компенсації декількох розташованих поряд індуктивних навантажень, підключених до одного розподільного пристрою і ті що компенсуються однією конденсаторною батареєю, що включаються одночасно.

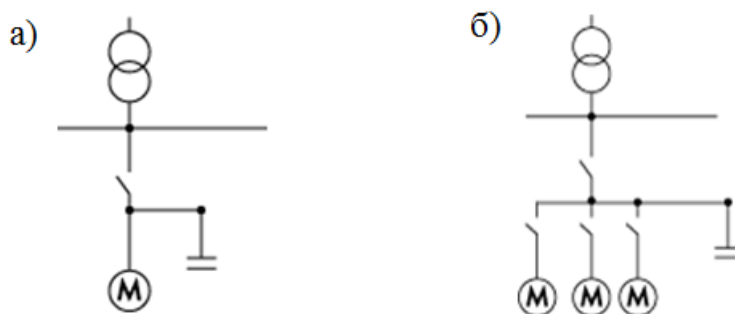


Рисунок – 2.1 Види компенсації: одинична компенсація (а) та групова компенсація (б)

Централізована компенсація (рис. 2.2).

Для підприємств з змінною потребою в реактивній потужності постійно включені батареї конденсаторів не прийнятні, оскільки при цьому може виникнути режим недокомпенсації або перекомпенсації. В цьому випадку конденсаторна установка оснащується спеціалізованим контроллером і комутаційно-захисною апаратурою. При відхиленні значення $\cos\varphi$ від заданого значення контроллер підключає або відключає ступені конденсаторів. Перевага централізованої компенсації полягає в наступному: включена потужність конденсаторів відповідає споживаній в конкретний момент часу реактивної потужності без перекомпенсації або недокомпенсації.

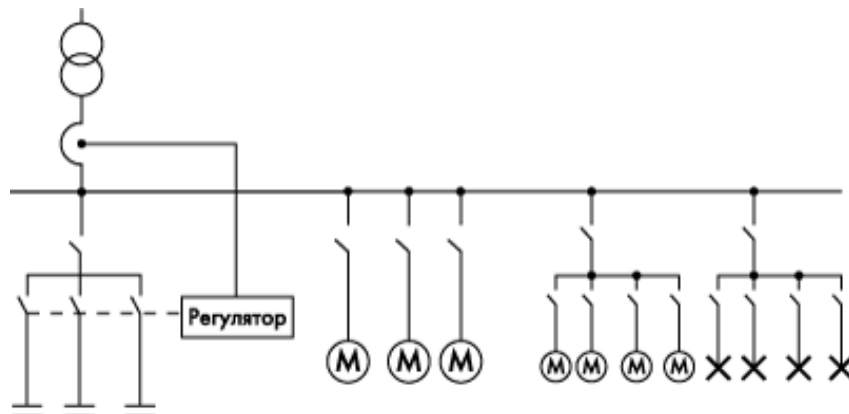


Рисунок 2.2 – Централізована компенсація

Розташування та вид компенсуючих пристроїв повинен розглядатися в процесі техніко-економічних розрахунків. А забезпечення підвищення якості електроенергії можна представити у вигляді послідовності рішення часткових задач: забезпечення допустимих відхилень напруги у споживачів; нормативних рівнів напруги у генераторів електростанцій; допустимих діапазонів зміни напруг у споживачів; забезпечення нормативних рівнів спеціальних показників якості електроенергії: коливань напруги; відхилень напруги.

2.4 Стандартні компенсуючі установки

В електричних системах застосовується велика кількість пристроїв, за допомогою яких може здійснюватися регулювання напруги і реактивної потужності. До них відносяться синхронні генератори електростанцій, синхронні компенсатори, батареї статичних конденсаторів, вентильні джерела реактивної потужності, реактори, трансформатори. Ці пристрої мають різні регулювальні діапазони, оснащуються власними (локальними) системами.

Як компенсуючі пристрої найбільш часто використовуються синхронні компенсатори і батареї статичних конденсаторів.

Батареї статичних конденсаторів БСК 6–10–35–110–220 кВ – ефективний засіб управління потоками реактивної потужності і нормалізації рівнів напруги.

Величина напруги в різних точках енергосистеми змінюється залежно від навантаження і схеми мережі. Цей параметр згідно ГОСТ 13109-87 повинен знаходитися в межах від 5 до 20%. Крім того, обмеження по найбільшій робочій

напрузі електрообладнання диктується надійністю роботи ізоляції електрообладнання, оскільки постійно підвищена напруга викликає прискорене старіння ізоляції і вихід її з ладу. У більшості споживачів електроенергії допускаються тривалі відхилення напруги від номінального не більше ніж на $\pm 5\%$. Перевищення номінальної напруги приводить до скорочення терміну служби обладнання, зменшення знижує продуктивність і економічність електроприймачів, пропускну спроможність ліній електропередачі, може порушити стійкість роботи синхронних і асинхронних електродвигунів [15].

З підвищенням номінальної напруги допустимі перевищення напруги зменшуються з 20 до 5%. Це пов'язано із зростанням вартості ізоляції в установках більш високих напруг, мінімізацією витрат на ізоляцію і виконанням обладнання практично на номінальну напругу. Допустимі зниження напруги в енергосистемі також лімітовані і складають від 10 до 15%.

В електромережах можливі коливання напруги від -15 до $+20\%$. Тому при зміні параметрів схеми, величини навантаження і режиму роботи електричної мережі необхідно регулювати рівень напруги за допомогою технічних заходів. Як відомо, напруга у споживача визначається формулою:

$$U = U_{\text{цп}} - (P_n \cdot R_e + Q_n \cdot X_e) / U_{\text{цп}},$$

де $U_{\text{цп}}$ – напруга центру живлення;

P_n і Q_n – активна і реактивна потужність навантаження споживача;

R_e і X_e – еквівалентний активний та індуктивний опір між центром живлення і споживачем. З приведеної формули видно, що можна впливати на напругу у споживача, змінюючи реактивну потужність Q_n , наприклад, регулюючи її за допомогою батареї статичних конденсаторів, реактивна потужність яких представлена в таблиці 2.3.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Таблиця 2.3 – Потужність сучасних батарей статичних конденсаторів

Батареї статичних конденсаторів	Реактивна потужність
КРМ 0,4–0,66 кВ	50–2000 кВАр
БСК 6–10 кВ	5–50 МВАр
БСК 35 кВ	10–50 МВАр
БСК 110 кВ	20–60 МВАр
БСК 220 кВ	52–200 МВАр

Батареї статичних конденсаторів на напругу 6, 10, 35, 110 і 220 кВ потужністю від 5 до 200 МВАр виконуються на базі косинусних однофазних конденсаторів шляхом паралельно-послідовного з'єднання їх в зірку або трикутник залежно від режиму роботи нейтралі (рис.2.3).

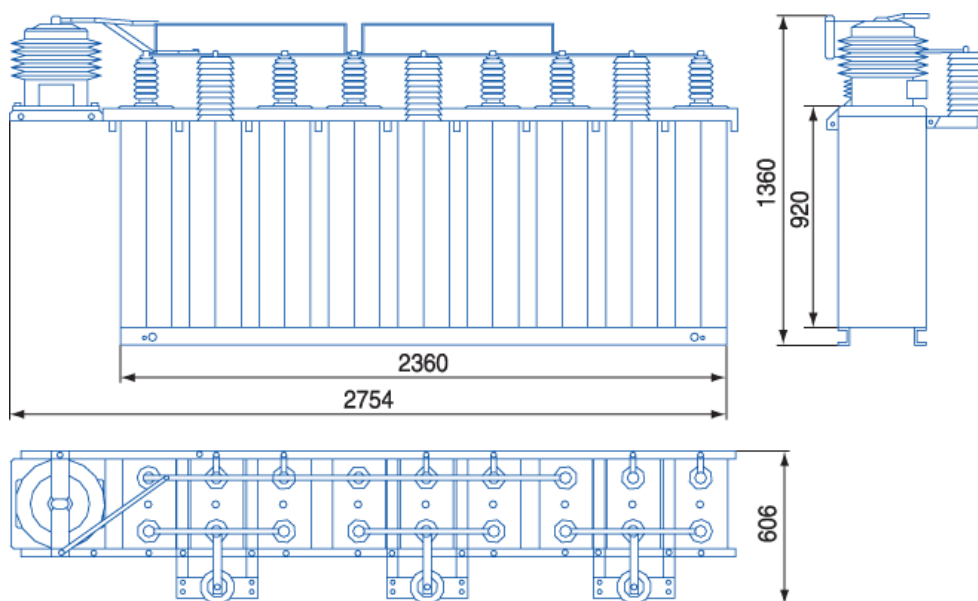


Рисунок 2.3 – Батареї статичних конденсаторів

Застосування батарей статичних конденсаторів дозволяє збільшити напругу на шинах підстанцій на 3...4%, понизити втрати в мережах 6...110 кВ, скоректувати перетікання енергії і врегулювати напругу в енергосистемі [16].

БСК складається з груп силових конденсаторів, зібраних в сталеві несучі блоки, закріплені на полімерних ізоляторах. БСК виконується на трьох стійках з

розміщеними на них конденсаторами, струмообмежувальними реакторами і трансформаторами струму. Між стійками БСК передбачені 6 - метрові проїзди для автокрана, призначені для монтажу блоків конденсаторів.

БСК поставляється у виконанні У1 для температур від -55 до $+45$ °С. Для більш низьких температур БСК вмонтовується в утеплений швидко встановлюваній будівлі. Сталеві конструкції виконуються із зварних профілів, захищених від корозії гальванічним цинкуванням (цинкове покриття – не менше 650 г/м^2). Конструкції зібрані в блоки по 6...8 конденсаторів, вмонтовуються на місці і мають в комплекті кріплення, наконечники і мідні шини для з'єднання конденсаторів, а також гнучкі мідні переходи. В БСК застосовуються силові конденсатори 700 кВАр/6–10 кВ, 560 кВАр/11,7 кВ для напруги 35 кВ (рис.2.4), 542кВАр/7,94 кВ для напруги 110...220 кВ з двома фарфоровими ізоляторами і вбудованими запобіжниками.

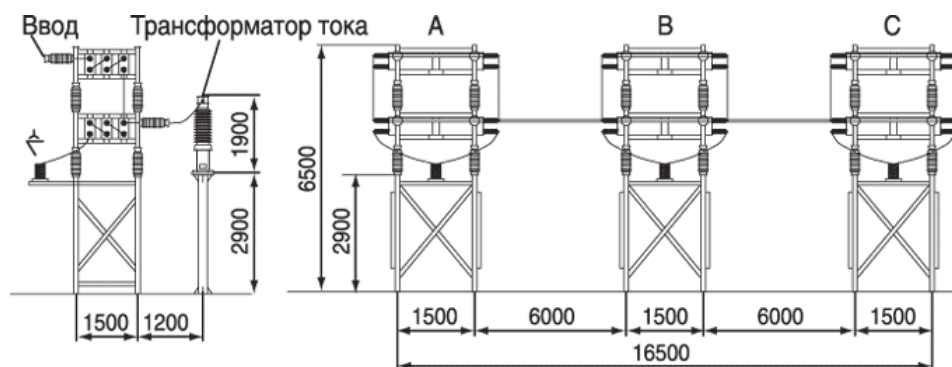


Рисунок 2.4 – Батарея статичних конденсаторів 13 МВАр 35 кВ

Трансформатори струму ТФЗМ (по 1 на фазу) підключені первинною обмоткою в розрив двох паралельних груп і у разі розбалансу видають сигнал на пристрої РЗА для відключення головного вимикача. Струмообмежувальні реактори (по 1 на фазу) обмежують струм при включенні БСК. З'єднання виконані гнучкою мідною шиною для запобігання пошкодження ізоляторів при температурному розширенні/стисненні або при дії електродинамічних сил.

В мережах трифазного струму конденсатори включаються в з'єднання "зірка" і "трикутник". При з'єднанні конденсаторів в "зірку" потужність батареї:

$$Q_c = U^2 \cdot \phi \cdot w \cdot C.$$

При з'єднанні конденсаторів в "трикутник" потужність батареї :

$$Q_c = 3 \cdot U^2 \cdot \phi \cdot w \cdot C.$$

Таким чином, при з'єднанні конденсаторів в "трикутник" потужність батареї виявляється в 3 рази більше. При напрузі до 1000 В звичайно конденсатори включають в "трикутник".

Батареї конденсаторів бувають регульовані і нерегульовані. В нерегульованих число конденсаторів незмінно, а реактивна потужність залежить від квадрата напруги. Сумарна потужність нерегульованих батарей конденсаторів не повинна перевищувати найменшого реактивного навантаження мережі.

В регульованих батареях конденсаторів залежно від режиму автоматично або вручну змінюється число включених конденсаторів [17].

Практично зміна потужності, яка видається батареєю в нормальних експлуатаційних умовах, досягається включенням або відключенням частини конденсаторів, що складають батарею, тобто шляхом східчастого регулювання. Одноступінчате регулювання полягає у відключенні або включенні всіх конденсаторів батареї, багатоступінчате - у відключенні або включенні окремих секцій батареї, забезпечених контактами або вимикачами.

При відключенні конденсаторів необхідно, щоб запасена в них енергія розряджалася автоматично, без участі чергового персоналу, на активний опір, приєднаний до батареї наглухо. Значення його повинне бути таким, щоб при відключенні не виникало перенапружень на затисках конденсаторів. Розрядним опором для конденсаторних установок напругою 6...10...35 кВ служать трансформатори напруги нижче 1000 В [18].

Розряд батареї конденсаторів повинен здійснюватися після кожного відключення батареї від мережі. Захист конденсаторів здійснюється плавкими

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

запобіжниками, включеними поодиноці в ланцюг кожного конденсатора. Крім того, батарея в цілому захищається за допомогою запобіжників або вимикачів в ланцюзі батареї.

Батареї конденсаторів також можливо включати послідовно в лінію (подовжня компенсація) для зменшення реактивного опору лінії.

В нормальному режимі через батарею конденсаторів проходить струм. При цьому напруга на батареї конденсаторів дорівнює:

$$U_{к,норм} = \sqrt{3}I_{норм}X \approx (5 \div 20)U_{норм}.$$

При короткому замиканні через батарею конденсаторів тече великий струм короткого замикання ($I_K \gg I_{норм}$) і U_K сильно зростає. При великих кратностях перенапруження батарею конденсаторів треба захищати спеціальними пристроями. Батарея конденсаторів в пристрої подовжньої компенсації (ППК) повинна бути ізольована від землі на повну номінальну напругу лінії.

Основні техніко-економічні переваги конденсаторів порівняно з іншими компенсуючими пристроями полягають в наступному:

- а) можливість застосування як на низькій, так і на високій напрузі;
- б) малі втрати активної потужності (0,0025...0,05 кВт/квар).

Недоліки конденсаторів з погляду регулювання режиму полягають в наступному:

- а) залежність реактивної потужності що генерується ними від напруги;
- б) можливість тільки генерувати реактивну потужність Q , а також східчає регулювання при видачі реактивної потужності та неможливість її плавної зміни, чутливість із спотворенням живлячої напруги.

Конденсатори в порівнянні з іншими джерелами реактивної потужності володіють рядом експлуатаційних переваг: простотою експлуатації; простотою виробництва монтажу; можливістю використання для установки конденсаторів будь-якого сухого приміщення. Серед експлуатаційних недоліків

конденсаторів слід зазначити малий термін служби (8...10 років) і недостатню міцність (особливо при КЗ і напругах вище номінального значення) [19].

Синхронний компенсатор - це синхронний двигун, що працює в режимі холостого ходу, тобто без навантаження на валу. В порівнянні із звичайним синхронним двигуном компенсатори виготовляють з полегшеним валом.

В даний час випускаються синхронні компенсатори потужністю від 5 до 160 Мвар. Синхронні компенсатори від 5 до 32 Мвар виконують повітряноохолоджуваними, 60, 100, 160 Мвар - з водневим охолодженням. Вони встановлюються на районних підстанціях і в ряді випадків біля могутніх електроприймачів з різкозмінним навантаженням.

Струм синхронного компенсатора:

$$I_{CK} = \frac{E_q - U_{CK}}{\sqrt{3} \cdot X_d}$$

а потужність на його затискачах:

$$S_{CK} = Q_{CK} = \sqrt{3} \cdot U_{CK} \cdot I_{CK} = \frac{E_q - U_{CK}}{X_d} \cdot U_{CK}.$$

Видно, що значення і знак потужності синхронного компенсатора залежать від співвідношення між ЕДС компенсатора E_q і напругою U_{CK} в точці його підключення до мережі. Електрорушійна сила визначається струмом збудження, причому зростанню струму збудження відповідає збільшення ЕДС. При значенні струму збудження, при якому $E_q = U_{CK}$, потужність синхронного компенсатора $Q_{CK} = 0$. При перезбудженні струму збудження $E_q > U_{CK}$ і синхронний компенсатор генерує, тобто видає в мережу реактивну потужність, причому $Q_{CK} > 0$. Синхронний компенсатор, що працює в режимі перезбудження, може збільшувати видану в мережу реактивну потужність при пониженні напруги

мережі. Зменшуючи струм збудження, можна отримати режим недозбудження, і тоді $E_q < U_{СК}$ і $Q_{СК} < 0$. Номінальна потужність синхронного компенсатора ($Q_{СК.ном}$) вказується для режиму перезбудження. По конструктивних особливостях в режимі недозбудження $Q_{СК} = 0.5 \cdot Q_{СК.ном}$.

Позитивними властивостями синхронних компенсаторів як джерел реактивної потужності є:

- а) незалежність $Q_{СК}$ від напруги в мережі внаслідок регулювання струму збудження;
- б) можливість плавного і автоматичного регулювання реактивної потужності, що генерується.

До основних недоліків компенсаторів відносяться:

- а) значні втрати активної потужності;
- б) відносно висока вартість і високі питомі витрати на компенсацію.

Експлуатаційні переваги СБК є: достатня термічна і електродинамічна стійкість обмоток компенсатора під час КЗ; можливість відновлення пошкодженого синхронного компенсатора шляхом ремонтних робіт. Труднощі експлуатації СБК полягають у великій займаній площі і шумі при роботі.

2.5 Сучасні статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності для ліній електропередач та підстанцій

Статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності (СТК) широко використовуються для вирішення різних проблем передачі і розподілу електричної енергії, пов'язаного з великими і швидкими коливаннями реактивної потужності. Розроблені СТК є високонадійним продуктом, заснованим на тривалих дослідженнях, сучасній технології і досвіді експлуатації на різних промислових об'єктах.

Основна схемна конфігурація СТК включає конденсаторні батареї, настроєні як фільтри вищих гармонік – фільтрокомпенсуючі ланцюги (ФКЦ), постійно підключені до мережі або комутовані вимикачами відповідно до вимог, і

включені паралельно їм в трикутник три фази керованих тиристорами реакторно-тиристорно-реакторна група (ТРГ).

Кут запалення тиристорів може швидко змінюватися так, щоб струм в реакторі відстежував струм навантаження або реактивну потужність в енергосистемі.

Система автоматичного управління СТК забезпечує швидку компенсацію реактивної потужності навантаження і підтримку регульованого параметра відповідно до заданої уставки, виконує захист обладнання СТК, контроль і сигналізацію відмов і може бути модифікована під конкретні вимоги [20]. Шафа управління тиристорних вентилів перетворює електричні імпульси управління тиристорів в світлові і передає їх на високий потенціал за допомогою волоконно-оптичних світловодів, приймає контрольні світлові імпульси з кожної тиристорної комірки та реєструє кількість і розташування тиристорів, що відмовили.

СТК розробляються в двох основних модифікаціях - для ліній електропередач і для промислових установок.

Основні переваги застосування СТК полягають в наступному:

Лінії електропередач:

- Підвищення статичної і динамічної стійкості передачі;
- Зниження відхилень напруги при великих збуреннях в системі;
- Стабілізація напруги;
- Обмеження внутрішніх перенапружень;
- Збільшення передавальної здатності електропередачі через поліпшення стійкості при великій передаваній потужності;
- Фільтрація струмів вищих гармонік.

Промислові установки

- Зниження коливань напруги;
- Підвищення коефіцієнта потужності;
- Зниження струмів вищих гармонік;

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

- Зниження спотворень напруги.

Номінальні параметри і відмінні особливості:

- Номінальна напруга: від 6 до 35 кВ;
- Номінальна потужність: від 10 до 360 Мвар;
- Водяне або повітряне примусове охолодження тиристорів,

повітряна ізоляція;

- Передача імпульсів управління тиристорів у вигляді світлових імпульсів по волоконно-оптичних каналах;

- Надмірні тиристири в кожній фазі;
- Резервування ключових компонентів;
- Модульна конструкція для легкого обслуговування.

Комплект компенсатора включає в себе:

- Високовольтні зустрічно-паралельні тиристорні вентиля (ВТСВП);
- Шафа управління тиристорними вентилями (ШУ);
- Система охолодження ВТВ;
- Компенсуючі реактори;
- Конденсаторні батареї і реактори фільтрів;
- Шафа автоматичного управління і захисту СТК;

Тиристорний вентиль на будь-який рівень напруги може бути виконаний шляхом послідовного з'єднання необхідної кількості тиристорних модулів. Тиристорний модуль є незалежним електричним і конструктивним вузлом. Кожний модуль складається з 8...18 послідовно сполучених тиристорів. Кожний тиристор має власну комірку управління і демпфуючий RC-ланцюжок. Комірки управління одержують світлові сигнали управління і перетворюють їх в електричні імпульси запалення, що забезпечують включення тиристорів. При появі на тиристорі позитивної напруги комірка управління формує контрольні світлові імпульси і передає їх в шафу управління по індивідуальному світловоду.

Типова схема статичних тиристорних компенсаторів СТК представлена на рис.2.5.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

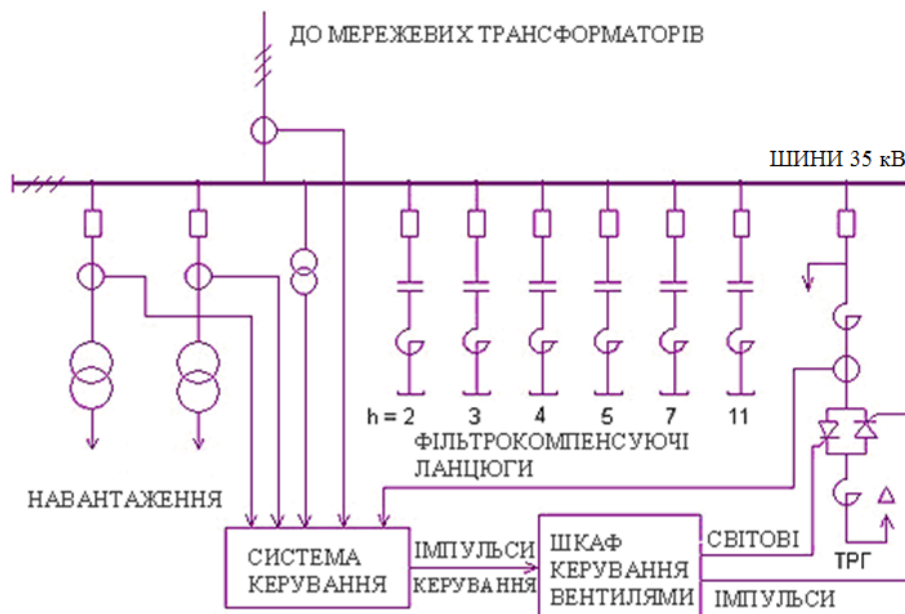


Рисунок 2.5 – Типова схема статичних тиристорних компенсаторів СТК

Трифазний тиристорний вентиль на напругу 35 кВ складається з трьох тиристорних модулів (поодинці на кожну фазу), призначений для внутрішньої установки з повітряною ізоляцією і водяним охолодженням (рис. 2.6). Конструктивно модулі встановлені в 3 поверхи один над одним через опорні ізолятори, нижній модуль кріпиться на опорних ізоляторах, зафіксованих на несучій рамі.

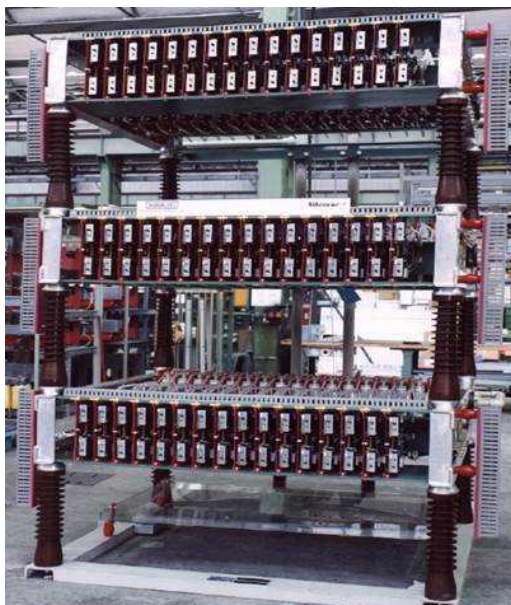


Рисунок 2.6 –Тиристорний вентиль 35 кВ

Кожний тиристорний модуль охолоджується за допомогою деіонізованої води і містить два стеки, кожний з яких включає 18 послідовно сполучених тиристорних комірок. Стеки тиристорів встановлені горизонтально на зварній алюмінієвій рамі; демпфуючі ланцюжки і плата управління/контролю тиристорів встановлюються на тій же рамі.

Тиристори що використовуються у вентилях:

- Діаметр кремнієвої шайби: від 56 до 100 мм
- Робоча напруга (V_{drm} , V_{rrm}): від 4.0 до 7.0 кВ
- Номінальний струм (I_{tav}): від 600 до 3000 А

Широкий вибір тиристорів дозволяє оптимізувати конструкцію вентиля для кожного конкретного застосування.

Світлова система управління і контролю тиристорів:

- Забезпечує високовольтну ізоляцію;
- Має високу надійність і перешкодостійкість;
- Виконує передачу світлових імпульсів управління з потенціалу землі

на високий потенціал і передачу світлових контрольних сигналів у зворотному напрямі по індивідуальним волоконно-оптичним світловодам;

- Забезпечує контроль справності тиристорів і каналів управління.

Система водяного охолодження тиристорних вентилів:

- Забезпечує високоінтенсивний відбір тепла від елементів

тиристорного вентиля: тиристорів, резисторів, реакторів, що насичаються;

- Використовує високочисту і деіонізовану воду з питомим опором не

нижче 2 МОм·см ;

- Проводить безперервний контроль тиску, витрати, температури і провідності води.

Система автоматичного управління містить три контури регулювання для ДСП, спеціальний контур підтримки робочої точки ТРГ, ряд електронних захистів, включаючи надструмовий захист ТРГ і захист від несиметрії струму ТРГ, перешкодостійку швидкодіяну схему синхронізації з напругою мережі,

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

оптоелектрону розв'язку вхідних і вихідних сигналів. Реалізована на базі спеціалізованого контролера, що містить центральний процесор ADSP-2181 (командний цикл 25 нс), програмовану логічну матрицю XCS30-PQ240, FLASH-пам'ять AM29F040 (512 кбайт), два послідовні канали передачі даних RS-232, швидкодійний канал 1 Мбод, рідкокристалічний графічний дисплей і клавіатуру.

Силове обладнання СТК:

Реактори - сухі, зовнішньої установки, без магнітопроводу. Силові конденсатори –до 800 квар, зовнішньої установки, з вбудованими запобіжниками і розрядними резисторами, компенсуючі реактори ТРГ.

Кожне застосування СТК вимагає проведення спеціальних технічних і економічних розрахунків: вибір номінальної потужності ТРГ, кількості і потужності ФКЦ, розрахунок втрат, визначення електричних дій на обладнання СТК в стаціонарних і перехідних режимах, визначення контрольованих параметрів і алгоритмів системи управління і т.д.

Для СТК в своєму розпорядженні необхідно мати відповідну технічну базу і наступні програмні засоби:

- комплект спеціальних програм для вибору потужності обладнання СТК для ДСП, розрахунку частотних характеристик, розрахунку параметрів конденсаторних батарей і реакторів, розрахунку втрат в устаткуванні СТК;
- повну цифрову модель тиристорного вентиля;
- спеціальні програми і моделі для проведення всього циклу розрахунків статичних і динамічних режимів роботи і характеристик СТК з системою управління і захисту для даної конфігурації.

Компоновка обладнання: тиристорні вентиля, шафа управління вентилями, система охолодження і шафа системи автоматичного управління СТК розміщуються в закритому опалювальному приміщенні. Компенсуючі реактори і фільтри вищих гармонік розміщуються зовні будівлі на відкритому майданчику.

В результаті проведеного аналізу можна зробити висновки, що пристрої для підвищення ЯЕ можуть впливати як на один з його показників, так і на кілька.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

В останньому випадку вони наазиваються багатофункціональними. Пристрої можуть змінювати свої параметри в процесі роботи під впливом керуючого сигналу (регульовані пристрої), а можуть не мати такої можливості (нерегульовані пристрої). Регулювання може бути плавним або ступінчастим. Здійснення плавного регулювання практично завжди пов'язано з необхідністю зміни кута запалювання тиристорів, що призводить до спотворення синусоїдальності кривих струму та напруги. У зв'язку з цим у випадках, коли не потрібно частих перемикань, що викликають кидки напруги (коливання), краще ступінчасте регулювання. Чим менший ступінь регулювання, тим менш чутливі кидки напруги, проте вартість пристрою зростає через збільшення числа ступенів.

За допомогою компенсуючих пристроїв можливе забезпечення необхідних рівнів та відхилень напруги у споживачів. Тривалість провалу напруги, імпульсна напруга, коефіцієнт тимчасової перенапруги обумовлюються режимами роботи енергосистеми. Коливання напруги, несиметрія і несинусоїдність напруги викликаються, в основному, роботою окремих потужних ЕП на промислових підприємствах, а величина цих ПЯЕ залежить від потужності живлячої енергосистеми в даній точці підмикання споживача. Відхилення напруги залежить як від рівня напруги, яка подається енергосистемою на промислові підприємства, так і від роботи окремих промислових ЕП, особливо з великим споживанням реактивної потужності. Тому питання ЯЕ слід розглядати в безпосередньому зв'язку з питаннями компенсації реактивної потужності.

При виборі оптимальної потужності засобів компенсації реактивної потужності необхідно зіставляти їх вартість з ефектом, що отримується від поліпшення всіх наведених вище параметрів якості електроенергії в електричних мережах.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ДЛЯ ПІДСТАНЦІЇ 35 КВ

3.1 Теоретичні відомості технічної та економічної доцільності

Більшість електроспоживачів, які використовуються в промисловості, споживає в процесі роботи реактивну енергію, яка витрачається на створення електромагнітних полів в електродвигунах, трансформаторах, лініях. Передача значної кількості реактивної потужності по лініях і через трансформатори мережі електропостачання не вигідна:

- 1) виникають додаткові втрати активної потужності у всіх елементах системи електропостачання;
- 2) виникають додаткові втрати напруги;
- 3) завантаження ліній електропередачі і трансформаторів реактивною потужністю зменшує пропускну спроможність мережі, не дозволяючи використовувати повну встановлену потужність генераторів електростанцій.

Таким чином при установці системи компенсуючого пристрою (КП) необхідно добитися наступних результатів: отримання середньодобового значення $\cos \varphi = 1$ і уникнення перекомпенсації. Точна і моментальна компенсація. Компенсація провалів напруги, тобто не більше 2% від номінального. Значне зменшення сплесків струму і реактивної енергії в піках навантаження. Зменшення коефіцієнта гармонійних спотворень, не більше 5%.

В результаті цього технічно і економічно доцільно використовувати джерела компенсації реактивної потужності, наближені до місць її споживання. При цьому розвантажується значна частина ліній і трансформаторів від передачі по них реактивної потужності, що рівносильно збільшенню коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$). Збільшення коефіцієнта потужності електроустановок досягається при правильному поєднанні способів природної і штучної компенсації, кожний з яких повинен бути технічно і економічно обґрунтований. Природна компенсація зводиться до заходів щодо зменшення споживання реактивної потужності ЕП без застосування компенсуючих пристроїв. При

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

неможливій або недостатній ефективності заходів природної компенсації застосовують штучну компенсацію, яка зводиться до застосування спеціальних пристроїв, що є джерелами реактивної енергії ємнісного характеру. До них відносяться синхронні компенсатори, статичні конденсатори, синхронні двигуни. З погляду економії електроенергії і регулювання напруги найбільш доцільно здійснювати компенсацію реактивної потужності у її споживачів. Для цієї мети в мережах загального призначення застосовуються батареї конденсаторів низької (НКБ) і високої (ВКБ) напруги.

Відповідно до розрахунку електричних навантажень, визначають найбільші сумарні розрахункові активне P_p і реактивне Q_p навантаження підприємства або установки.

Найбільше сумарне реактивне навантаження, яке приймається для розрахунку при визначенні потужності конденсаторної установки:

$$Q_m = k_{nc} \cdot Q_p,$$

де k_{nc} - коефіцієнт, що враховує неспівпадання за часом найбільших активного навантаження енергосистеми і реактивного навантаження підприємства, залежить від галузі промисловості.

Відповідно до найбільших сумарних реактивного і активного навантажень енергосистема задає режим споживання реактивної потужності підприємством в період максимального і мінімального навантажень енергосистеми.

Сумарну потужність компенсуючого пристрою (КП) Q_p визначають по величині реактивної потужності Q_e , яка повинна видаватися підприємству енергосистемою в період максимальних активних навантажень:

$$Q_p = Q_\phi - Q_e \quad (3.1)$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

3.2 Розрахунок параметрів установки поперечної ємнісної компенсації

Початкові дані:

1. Номінальна напруга на шинах 35 кВ;

2. Тип конденсаторів - КС2-1,05-60-241.

- номінальна напруга $U_H = 1.05$ кВ;

- номінальна ємність $C = 185$ мкФ;

- опір ємності $x_C = 18.4$ Ом;

- номінальна потужність $q = 57$ квар.

3. Характеристики електроспоживання:

- розрахункова активна витрата в рік: $W_p = 15.73$ млн.кВт.год;

- розрахункова реактивна витрата в рік: $W_q = 7.978$ млн.кВт.год.

Розрахунок потужності КП.

Середнє значення фактичної споживаної активної та реактивної потужності:

$$P_\phi = \frac{W_p}{4500}; \quad (3.2)$$

$$Q_\phi = \frac{W_q}{4500}. \quad (3.3)$$

Підставивши значення в формули (3.2) та (3.3) отримаємо:

$$P_\phi = \frac{15,73 \cdot 10^6}{4500} = 3495,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$Q_\phi = \frac{7,978 \cdot 10^6}{4500} = 1772,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Економічне значення реактивної потужності:

$$Q_e = \alpha \cdot P_\phi,$$

де α - оптимальний $\tan\varphi$, $\alpha = 0.25$.

$$Q_e = 0,25 \cdot 3495,6 = 873,9 \text{ квар.}$$

Розрахункове значення потужності КП у відповідності з (3.1):

$$Q_p = 1772,9 - 873,9 = 899 \text{ квар.}$$

Розрахунок параметрів КП.

Число конденсаторів, сполучених послідовно:

$$M = 1,03 \cdot a \cdot b \cdot \frac{U_{ш}}{U_n} \quad (3.4)$$

де a - коефіцієнт, збільшення напруги через наявність реактора, прийmemo $a = 1,14$, з умови настройки на частоту 140 Гц;

b - коефіцієнт, що враховує додатковий нагрів конденсаторів вищими гармоніками і сонячною радіацією, який визначається як:

$$b = 1,04 \cdot \sqrt{1 + 14 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{24 \cdot P_\phi}{Q_p} \right)^2} \quad (3.5)$$

Тоді, підставивши значення в (3.5) отримаємо:

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

$$b = 1,04 \cdot \sqrt{1 + 14 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{24 \cdot 3495,6}{899} \right)^2} = 1,102 .$$

Таким чином у відповідності з (3.4) отримаємо:

$$M = 1,03 \cdot 1,14 \cdot 1,102 \cdot \frac{35}{1,05} = 43,132 .$$

Приймаємо $M = 43$.

Число конденсаторів, сполучених паралельно:

$$N = \frac{Q_p \cdot x_c \cdot M}{a \cdot U_{ш}^2 \cdot 10^3} .$$

$$N = \frac{899 \cdot 18,4 \cdot 43}{1,14 \cdot 35^2 \cdot 10^3} = 0,509 .$$

Приймаємо $N = 1$.

Ємнісний опір батареї конденсаторів складе:

$$X_c = x_c \frac{M}{N} .$$

$$X_c = 18,4 \frac{43}{1} = 791,2 \text{ Ом} .$$

Необхідний індуктивний опір реактора:

$$X_p = x_c \frac{a-1}{a} .$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

$$X_p = 791,2 \frac{1,14 - 1}{1,14} = 97,165 \text{ Ом.}$$

Резонансна частота настройки КП складе:

$$f = f_1 \sqrt{\frac{X_c}{X_p}}.$$

$$f = 50 \cdot \sqrt{\frac{791,2}{97,165}} = 142,68.$$

Струм протікаючий через КП:

$$I_{ky} = \frac{U_{ш} \cdot 10^3}{X_c - X_p}.$$

$$I_{ky} = \frac{35 \cdot 10^3}{791,2 - 97,165} = 50,4 \text{ А.}$$

Струм через конденсатор:

$$I_c = \frac{I_{ky}}{N}.$$

$$I_c = \frac{50,4}{1} = 50,4 \text{ А.}$$

Корисна потужність установки:

$$Q_n = U_{ш} \cdot I_{ky}.$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$Q_n = 35 \cdot 50,4 = 1764 \text{ квар.}$$

Напруга на батареї КП:

$$U_c = U_{uu} + X_p \cdot I_{ky}.$$

$$U_c = 35 + 97,165 \cdot 50,4 \cdot 10^{-3} = 39,9 \text{ кВ.}$$

Середня напруга на конденсаторі:

$$u_c = \frac{U_c}{M}.$$

$$u_c = \frac{39,9}{43} = 0,93 \text{ кВ.}$$

Встановлена потужність КП:

$$Q_{вст} = q \cdot M \cdot N.$$

$$Q_{вст} = 57 \cdot 43 \cdot 1 = 2451 \text{ квар.}$$

3.3 Економічне обґрунтування застосування пристроїв поперечної компенсації

3.3.1 Теоретичні основи техніко-економічного обґрунтування застосування пристроїв поперечної компенсації

Економічний ефект від впровадження автоматичної конденсаторної установки складається з наступних складових:

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

1. Економія на оплаті реактивної енергії. Оплата за реактивну енергію становить від 12% до 50% від оплати активної енергії в різних регіонах України. Як показує практика, вартість конденсаторної установки компенсації реактивної потужності окупається через півроку-рік після впровадження.

2. Для діючих об'єктів зменшення втрат електроенергії в кабельних лініях за рахунок зменшення значень фазних струмів.

3. Для проектованих об'єктів впровадження конденсаторної установки на етапі проектування дозволяє зекономити на вартості кабельних ліній за рахунок зменшення їх поперечного перерізу.

У середньому на діючих об'єктах у підвідних кабелях втрачається 10...15% споживаної активної енергії. Втрати пропорційні квадрату значення струму, що протікає по кабелю. Для розрахунків приймемо коефіцієнт втрат $K_n = 12\%$.

Розглянемо економічну складову роботи компенсуючої установки на прикладі діючого об'єкта. До впровадження автоматичної конденсаторної установки $\cos\varphi = 0,60$. Після впровадження автоматичної конденсаторної установки $\cos\varphi = 0,97$. Відносну активну складову струму (збігається за фазою з напругою) приймемо дорівнює одиниці.

Відносний повний струм складає до впровадження $I_1 = 1/0,6 = 1,667$.

Відносний повний струм складає після впровадження $I_2 = 1/0,97 = 1,03$.

Зниження споживання активної потужності складе:

$$\Delta W_c = [(I_1^2 - I_2^2) / I_1^2] \cdot K_n \cdot 100\% = 7,42\%.$$

Тобто в цьому прикладі витрати на активну енергію зменшилися на 7,42%.

У загальному випадку для діючого об'єкта зниження споживання активної енергії за рахунок збільшення $\cos \varphi$:

$$\Delta W_c = ([1/\cos^2\varphi_1 - 1/\cos^2\varphi_2] / [1/\cos^2\varphi_1]) \cdot K_n \cdot 100\%,$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

де $\cos \varphi_1$ – коефіцієнт потужності до компенсації (наприклад 0,6);
 $\cos \varphi_2$ - коефіцієнт потужності після компенсації (наприклад 0,97);
 K_n - коефіцієнт втрат $K_n = 0,12$;

Тоді, для нашого прикладу, $\Delta W_c = 7,40\%$

Річна економія C в оплаті електроенергії визначається:

$$C = (\Delta W_c / 100\%) \cdot T = 0,074 \cdot T,$$

де T - вартість електроенергії спожитої за рік.

Умови економічності компенсуючих пристроїв визначаються по мінімуму приведених витрат, при визначенні яких повинні враховуватися:

- витрати на компенсаційні пристрої (КП), комутаційні апарати для них, пристрої регулювання потужності КП та ін;
- зменшення вартості трансформаторних підстанцій та електричних мереж у зв'язку зі зниженням струмових навантажень;
- зменшення втрат активної та реактивної потужності в живильних і розподільних мережах і трансформаторах.

3.3.2 Капітальні витрати на установку поперечно-ємнісної компенсації

Питомі капітальні витрати на 1 квар встановленої реактивної потужності, що виробляється УПК складають 68 грн/квар.

Капітальні витрати по кожному з варіантів визначаємо по формулі:

$$K = Q_{вст} \cdot b, \quad (3.6)$$

де $Q_{вст}$ - встановлена потужність УПК, квар;

b - питомі капітальні витрати, грн/квар.

Підставивши чисельні значення у формулу (3.6) отримаємо для потужності 2451 квар:

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

$$K = 2451 \cdot 68 = 156864 \text{ грн.}$$

3.3.3 Експлуатаційні витрати на установку поперечно-ємнісної компенсації

При розрахунку експлуатаційних витрат приймаємо наступні допущення.

Підключення УПК не вимагає збільшення чисельності обслуговуючого персоналу підстанції.

В даному випадку експлуатаційні витрати визначаємо по формулі:

$$E = \Pi + \Delta\Pi \quad (3.7)$$

де Π - річна оплата за перетікання реактивної електроенергії між електрозабезпечуючою організацією і підстанцією, грн;

$\Delta\Pi$ - оплата за втрати електроенергії в пристрої поперечної ємнісної компенсації, грн.

Згідно Методики розрахунку оплати за перетікання реактивної електроенергії стосовно підстанції, цей вид оплати розраховується по наступному алгоритму. Перш за все визначаємо перетікання реактивної електроенергії між електрозабезпечуючою організацією і тяговою підстанцією по формулі:

$$\Delta WQ = WQ \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{i_{xx}}{100} \cdot S_{ном} \cdot T + \left(\frac{WP}{T \cdot \cos \varphi \cdot S_{ном}} \right)^2 \cdot \frac{u_k \cdot S_{ном} \cdot T}{100} - Q_{ном} \cdot T, \quad (3.8)$$

де WP - активна витрата електроенергії за розрахунковий період часу, млн.кВт·г;

WQ - реактивна витрата електроенергії за розрахунковий період часу, млн.кВт·г;

$\operatorname{tg} \varphi$ - середнє за розрахунковий період значення коефіцієнта реактивної потужності;

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

i_{xx} - струм холостого ходу трансформатора;

$S_{ном}$ - номінальна активна потужність трансформатора, кВА;

T - розрахунковий період часу, год;

u_k - напруга короткого замикання трансформатора;

$Q_{ном}$ - номінальна реактивна потужність трансформатора, квар.

$$\begin{aligned}\Delta WQ &= \\ 7,978 \cdot 10^6 \cdot 0,25 + \frac{1,1}{100} \cdot 2500 \cdot 4500 + \left(\frac{15,73 \cdot 10^6}{4500 \cdot 0,9 \cdot 2500} \right)^2 \cdot \frac{6,5 \cdot 2500 \cdot 4500}{100} - 824 \cdot 4500 &= \\ &= 175203,5 \text{ кВт} \cdot \text{год.}\end{aligned}$$

Далі піддаємо отримане значення ΔWQ аналізу.

Якщо $\Delta WQ > 0$ то оплату визначаємо по формулі:

$$\Pi = \Delta WQ \cdot c_e \cdot \kappa_{ep} \cdot (1 + 1,3 \cdot (\kappa_\phi - 1)) \quad (3.9)$$

де c_e - питома вартість електроенергії, грн/кВт·год;

κ_{ep} - економічний еквівалент реактивної потужності;

κ_ϕ - коефіцієнт, залежний від середнього значення коефіцієнта реактивної потужності на вводах підстанції;

$$\begin{aligned}\kappa_\phi &= 1 && \text{при } \operatorname{tg} \varphi_1 \leq 0,25 \\ \kappa_\phi &= 1 + (\operatorname{tg} \varphi_1 - 0,25)^2 && \text{при } \operatorname{tg} \varphi_1 > 0,25\end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\Delta WQ}{WP} \quad (3.11)$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{175203,5}{15,73 \cdot 10^6} = 0,011.$$

В даному випадку приймаємо $\kappa_\varphi = 1$, тоді

$$\Pi = 175203,5 \cdot 3,09 \cdot 0,05 = 27068,9 \text{ грн.}$$

Якщо $\Delta WQ \leq 0$ то оплата обчислюється по формулі:

$$\Pi = \Delta WQ \cdot c_e \cdot \kappa_{ep} \cdot \kappa \quad (3.12)$$

де κ - нормативний коефіцієнт обліку збитків енергозабезпечуючої організації при генерації реактивної електроенергії з мережі споживача (в даному випадку підстанції).

Оплату за втрати електроенергії в УПК визначаємо по формулі:

$$\Delta \Pi = Q_{\text{вст}} \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot T \cdot c_e, \quad (3.13)$$

$$\Delta \Pi = 2451 \cdot 0,003 \cdot 4500 \cdot 3,09 = 102243,5 \text{ грн.}$$

де $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат в конденсаторах УПК.

Підставивши чисельні значення у формулу (3.7) і знайдемо експлуатаційні витрати для потужності 2451 квар:

$$E = 27068,9 + 102243,5 = 129312,4 \text{ грн.}$$

3.3.4 Економічний ефект на УПК

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Приведені до одного року експлуатації УПК витрати визначаємо по формулі:

$$З = E + K \cdot E_n, \quad (3.14)$$

$$З = 129312,4 + 156864 \cdot 0,15 = 152842 \text{ грн.}$$

де E_n - коефіцієнт нормативної ефективності капіталовкладень.

Річний економічний ефект від підключення УПК визначаємо по формулі:

$$\Delta = \Pi_{\text{баз}} - З, \quad (3.15)$$

де $\Pi_{\text{баз}}$ - оплата за перетікання реактивної електроенергії при відсутності засобів компенсації реактивної потужності, яка визначається по формулі:

$$\Pi_{\text{баз}} = \Delta W Q_{\text{баз}} \cdot c_e \cdot \kappa_{ep} \cdot (1 + 1,3 \cdot (\kappa_{\phi} - 1)), \quad (3.16)$$

$$\text{де } \Delta W Q_{\text{баз}} = WP \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{i_{xx}}{100} \cdot S_{\text{ном}} \cdot T + \left(\frac{WP}{T \cdot \cos \varphi \cdot S_{\text{ном}}} \right)^2 \cdot \frac{u_{\kappa} \cdot S_{\text{ном}} \cdot T}{100} - Q_{\text{ном}} \cdot T. \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \Delta W Q_{\text{баз}} &= \\ 15,73 \cdot 10^6 \cdot 0,25 + \frac{1,1}{100} \cdot 2500 \cdot 4500 + \left(\frac{15,73 \cdot 10^6}{4500 \cdot 0,9 \cdot 2500} \right)^2 \cdot \frac{6,5 \cdot 2500 \cdot 4500}{100} - 824 \cdot 4500 &= \\ &= 2113203,5 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \end{aligned}$$

$$\Pi_{\text{баз}} = 2113203,5 \cdot 3,09 \cdot 0,05 = 326489,9 \text{ грн.}$$

$$\Delta = 326489,9 - 152842 = 173647,9 \text{ грн.}$$

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Результати розрахунків по формулах (3.6)...(3.17) зводимо в табл.3.1. Аналогічні розрахунки проводимо для іншої компенсуючої установки з потужністю 2518 квар. Результати розрахунків зводимо в табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків

№	Номінальна потужність УПК, квар	Капітальні витрати, грн.	Експлуатаційні витрати, грн.	Приведені витрати, грн.	Економічний ефект, грн.
1	2451	156864	129312,4	152842	173647,9
2	2518	171224	132107,3	157790,9	168699

Таким чином, порівнюючи результати розрахунків можна зробити висновок, що застосування компенсуючої установки з потужністю 2451 квар з економічної точки зору є більш вигідним.

Тому застосування установки поперечної ємнісної компенсації потужністю 2451 квар в РП-35 кВ дасть можливість не тільки підвищити показники якості електроенергії, але також дасть економічний ефект який складе 173647,9 грн.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У даному проекті розглядалася проблема підвищення якості електричної енергії в розподільних пристроях 35 кВ.

Інтенсивний розвиток силової напівпровідникової перетворювальної техніки та її використання у тиристорних електроприводах змінного та постійного струму, вентильних перетворювачах для установок різного призначення призвело до погіршення показників якості електроенергії. В умовах зростаючого використання вентильних перетворювачів ця проблема супроводжується відчутною техніко-економічною шкодою. Для її усунення існує два шляхи: зовнішня та внутрішня компенсація.

Використання систем компенсації дозволяє зменшити споживання електроенергії, підвищити рівень напруги для споживачів, зменшити провали напруги, повністю уникнути штрафів за реактивну енергію, скоротити експлуатаційні витрати господарства й принести додаткові прибутки за рахунок збільшення пропускної здатності ліній електропостачання.

Проаналізувавши основні техніко-економічні характеристики пристроїв компенсації реактивної потужності, та їх можливості щодо підвищення якості електроенергії визначено, що застосування компенсуючих установок на базі статичних конденсаторів мають значні переваги у порівнянні з іншими.

Застосування пристроїв компенсації реактивної потужності має передувати ретельний техніко-економічний аналіз у зв'язку з високою вартістю та достатньою складністю цих пристроїв. Тому, виконавши вибір параметрів компенсуючих пристроїв для реальних значень реактивної потужності, яку необхідно компенсувати в розподільних пристроях 35 кВ, проведена оцінка економічного ефекту від їх впровадження. Аналізуючи проведені розрахунки економічного ефекту від впровадження компенсуючих пристроїв в РП-35 кВ, можна зробити висновок, що застосування установки поперечної ємнісної компенсації потужністю 2451 квар, дасть можливість не тільки підвищити показники якості електроенергії, а також дасть економічний ефект який складе 173647,9 грн.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
2. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В.М. Божко.– К.: Техніка, 1981. – 160 с.
3. Шаров Ю. В. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
4. Щербаков Е. Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов. – Ульяновск: Изд-во «Вектор-С», 2007. – 260 с.
5. Федоров А. А., Основы электроснабжения промышленных предприятий: Учебник для вузов / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
6. Волков Н. Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учебное пособие / Н. Г. Волков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 152 с.
7. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 186 с.
8. Коновалова Л. А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Л. А. Коновалова, Л. Д. Рожкова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
9. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
10. Овчаренко А. С. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет / А. С. Овчаренко, М. Л. Рабинович, В. И. Мозырский, Д. И. Розинский. – К.: Техніка, 1985 – 120 с.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

11. Александров Д. С. Надёжность и качество электроснабжения предприятий /Д. С. Александров, Е. Ф. Щербаков. – Ульяновск : Изд-во «Вектор-С», 2010. – 250 с.

12. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю. С. Железко. – М.: Энергоиздат, 1981 – 126 с.

13. Бородулин Б.М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б.М.Бородулин, Л.А.Герман, Л.М. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.

14. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А.В. Котельников. – М.: Транспорт, 2002. – 104 с.

15. Мамошин Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / Р. Р. Мамошин, А. Н. Зимакова. – М.: Транспорт, 1985. – 185 с.

16. Богаенко И. Н. Регулируемые компенсирующие устройства реактивной мощности. Справочник / В. Я. Борисенко, Д. И. Розинский, Н. А. Рюмшин. – К.: Техніка, 1992. – 80 с.

17. Красник В. В. Автоматические устройства по компенсации реактивных нагрузок в электросетях предприятий / В.В. Красник. – М.: Энергия, 1975. – 180 с.

18. Мамошин Р. Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока / Р. Р. Мамошин. – М.: Транспорт, 1973. – 224 с.

19. Герман Л.А. Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации: дис. доктор. технич. наук / Л.А.Герман – М., 1991. – 540 с.

20. Красник В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий / В.В. Красник. – М.: Транспорт, 1987. – 212 с.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61