

УДК 621.3.078.4

О.К.Каганюк, О.В.Дудік

Луцький національний технічний університет

## АНАЛІЗ ЗБУРЕНЬ ПРИ ВИРІШЕННІ ПИТАННЯ ПО КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

*О.К.Каганюк, О.В.Дудік. Аналіз збурень при вирішенні питання по компенсації реактивної потужності. В статті розглядається ефективний спосіб компенсації реактивної потужності із застосуванням регульованих конденсаторних установок.*

*Ключові слова:* реактивна потужність, трансформатор, резонанс, компенсатор, конденсатор.

*Лит.* – 3.

*А.К.Каганюк, А.В.Дудік. Анализ возмущений при решении вопроса по компенсации реактивной мощности. В статье рассматривается эффективный способ компенсации реактивной мощности с применением регулируемых конденсаторных установок.*

*Ключевые слова:* реактивная мощность, трансформатор, резонанс, компенсатор, конденсатор.

*Лит.* – 3.

*О.К.Кaghanjuk, O.V.Dudick. Analysis of perturbations in deciding on reactive power compensation. In the article the effective method for reactive power compensation using adjustable capacitor installations.*

*Keywords:* reactive power, transformer, resonance, compensator, capacitor.

*References* – 3.

**Актуальність даної проблеми** полягає в тому, що енергозабезпечення різних галузей промисловості потребує скорочення витрат споживання електроенергії. Система компенсації реактивної потужності розглядається як комплексна задача, для вирішення якої необхідно враховувати різні параметри, які пов'язані з експлуатаційними режимами, роботи різних джерел. Пошук найбільш ефективних засобів економії електроенергії є важливим чинником по вдосконаленню технологічного процесу.

**Проблема** полягає в тому, що при збільшенні споживаної енергії, збільшується і реактивна складова, яка йде на нагрів електрообладнання і не є корисною, а разом з цим зростає і ціна на витрату енергію.

Збільшення витрат на реактивну енергію несе за собою і негативні наслідки, такі як:

- збільшення вживаної потужності;
- збільшення падіння напруги в кабельних мережах;
- збільшення втрат на нагрів струмопровідних мереж;
- скорочення терміну роботи електрообладнання та інше.

Одним із ефективних способів, який ми будемо розглядати в даній статті, є компенсація реактивної потужності із застосуванням конденсаторних батарей з регульованою або нерегульованою місткістю.

В нерегульованих конденсаторних установках немає можливості точно оцінювати витрати на споживану електроенергію. Це є негативний фактор по застосуванню нерегульованих конденсаторних установок.

**Для вирішення** даної проблеми, одним із ефективних способів, який ми будемо розглядати в даній статті, є компенсація реактивної потужності з регульованими конденсаторними установками.

Принцип роботи регульованих конденсаторних батарей полягає в зміні коефіцієнта потужності споживачів відповідно до заданого шляху ступінчастого регулювання місткості батарей конденсаторів.

Регулятор компенсації реактивної потужності є параметричним мікропроцесорним контролером, який оснащений необхідними пристроями введення/виведення інформації і команд, що здійснюють регулювання коефіцієнта потужності відповідно до заданої уставки.

Однак, відповідні методи мають недоліки:

- небезпека виникнення резонансних коливань в контурі "конденсатор - трансформатор" внаслідок наявності гармонійних складових;
- зниження точності налаштування компенсації, пов'язане з похибками вимірвальних трансформаторів;
- складність комутаційної апаратури при підключенні конденсаторних батарей на високій стороні;
- недоліки, пов'язані з урахуванням характеру навантаження, експлуатаційних режимів роботи, конфігурації схеми і інших параметрів при розрахунку місткості конденсаторних батарей.

Як показує досвід експлуатації конденсаторних батарей, який проводився представниками "Волиньобленерго", повна компенсація реактивного навантаження недоцільна, оскільки підвищення потужності компенсуючого пристрою призводить до зниження його ефективності.

Розрахунок потужності регульованої конденсаторної установки вимагає обліку ряду чинників, а також їх взаємного впливу.

Важливим чинником є схема підключення розподільних пристроїв.

Як правило, конденсаторні батареї підключаються по одній до кожної секції робочої підстанції (РП), використовуючи для вхідного сигналу по струму трансформатори струму на введенні в секцію.

Підключення конденсаторних батарей на низькій стороні трансформатора напруги має наступні переваги:

- виключається залишковий заряд на конденсаторах, що у свою чергу підвищує рівень безпеки технічного персоналу при проведенні регламентних робіт;
- немає необхідності використовувати розрядні опори;
- відсутня комутаційна апаратура, що підвищує надійність експлуатації електротехнічного устаткування.

Наступним чинником, що впливає на ефективність роботи компенсуючих пристроїв, є конфігурація схеми підключення конденсаторних батарей. Найбільш ефективними є установки з несиметричною конфігурацією, оскільки можуть забезпечити як точне регулювання, так і мінімальну частоту комутації ступенів при меншій вартості, в порівнянні з симетричними.

Компенсація реактивної потужності призводить до збільшення коефіцієнта потужності (КП)  $\cos\phi$ , і при величинах КП системи, що перевищують 0,97, і наявності джерел гармонійних складових, може виникнути явище резонансу, що призводить до збільшення струму компенсації, перегрівання і виходу з ладу устаткування.

Якщо резонансна частота контура "конденсатори - трансформатор" близька до гармоніки, викликаній одним з навантажень, струм цієї гармоніки може циркулювати в контурі, викликаючи високу напругу в лінії. Струм компенсації в цьому випадку може перевищити номінальне значення більш ніж в 2 або 3 рази від його номінальної величини. Резонанс може виникнути на будь-якій частоті, хоча у більшості випадків джерела синусоїдального струму існують на 5-ій, 7-ій, 11-ій і 13 гармоніках [2].

Як правило, запобігти цьому дозволяє регулятор, що вимірює гармоніки і відключає частину потужності конденсаторної батареї. Проте, в цьому випадку досягнення необхідного КП вже неможливе, а отже, ефективність установки істотно знижується.

Реальним захистом можуть бути тільки спеціальні реактори, що встановлюються в кожному ступені і забезпечують зміщення резонансної частоти контура "конденсатор-трансформатор" нижче домінуючої гармоніки або фільтрацію гармонік.

Фільтрація гармонік певної частоти (чи декількох частот відразу) виключає проникнення цих гармонік в мережу живлення. Як правило, застосовуються пасивні фільтри 5, 7, 11, 13 гармонік і гармонік вище 15-й [2].

Недоліками пасивних фільтрів гармонік є висока вартість; пригнічення невеликої кількості гармонік вимагає трудомісткість робіт, пов'язаних з аналізом розподільної електричної мережі.

Для усунення вказаних недоліків пропонується використовувати активні фільтри.

Крім того, до переваг активних фільтрів відносяться зниження витрат на технічне обслуговування і управління системою фільтрів гармонік, простий монтаж і налаштування, динамічну компенсацію широкого спектру гармонік.

Таким чином, вдосконалення системи компенсації зводиться до забезпечення комплексного інженерного підходу, що враховує усі особливості системи електропостачання.

Враховуючи велику кількість параметрів, що описують систему компенсації реактивної потужності, побудова схеми регулювання компенсуючих пристроїв передбачає обробку значної кількості сигналів і даних. Введення цих сигналів повинне забезпечуватися в режимі реального часу і шляхом введення даних як результатів розрахункових та інших операцій (наприклад, з використанням реляційних або ієрархічних баз даних).

Складність і трудомісткість поставленого завдання не дозволяє використовувати традиційні схеми збору і обробки інформації. Одним з рішень цієї проблеми може бути розробка багаторівневої системи обробки інформації з розподілом функцій, що виконується кожним рівнем. Крім того, ця система не повинна використовувати обмежену кількість сигналів (даних), а необхідно передбачити можливість гнучкого управління і обліку змінної кількості параметрів, що

описують зовнішні дії, взаємний їх вплив один на одного. При цьому основним критерієм ефективності роботи цієї системи є економічна доцільність, тому ця система має бути досить універсальна і призначена для вирішення широкого кола завдань управління.

Згідно [1, (п.1.2.16)] мережі 6-10 кВ відносяться до мереж з малими струмами замикання на землю і повинні працювати з ізольованою, чи з заземленою нейтраллю через дугогасний реактор.

Якщо ємнісні струми перевищують припустимі згідно з [1, (п.1.2.16)] значення, у нейтраль трансформатора (чи генератора) включається дугогасний реактор, який компенсує ємнісний струм.

Показником ефективності компенсації ємнісного струму є відношення кількості замикань на землю, які не перейшли у міжфазні короткі замикання  $n_{\text{общ}} - n_{\text{кз}}$ , до загальної кількості замикань, тобто

$$\mathcal{E}_k = [(n_{\text{общ}} - n_{\text{кз}}) / n_{\text{общ}}] * 100(\%) \quad (1.1)$$

Застосування дугогасних реакторів за статистичними даними ОАО «Фірма ОРГРЭС» дозволяє на 70% зменшити кількість замикань на землю, які перейшли у міжфазні короткі замикання [2].

Сучасні дугогасні реактори розрізняються по способах регулювання струму компенсації:

- ДР із переключенням відгалужень обмотки;
- ДР зі зміною зазорів у магнітній системі (плунжерні ДР);
- ДР зі зміною індуктивності підмагнічуванням постійним струмом).

У результаті аналізу дугогасних реакторів була складена таблиця з характеристиками дугогасних реакторів різних типів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Аналіз характеристик ДР різних типів

Характеристика реактору	Тип реактору			
	Некерований з переключенням відгалужень обмоток	Плунжерний	ДР із вільним повздовжнім підмагнічуванням	ДР зі змушеним поперечним підмагнічуванням
безінерційність	+	-	-	-
надійність	+	-	+	+
добротність	+	+	+	+
широта діапазону регулювання	+	+	+	+
технологічність	-	-	+	+
ресурс	+	-	+	+
швидкодія	-	-	-	+
вміст гармонік	+	-	+	-
лінійність	-	+	-	-

На рис 1.1 приведений загальний вигляд і залежність струму компенсації від фактору регулювання ДР із переключенням відгалужень обмотки.

Східчає регулювання струмів компенсації в дугогасних реакторах цього типу здійснюється зміною відгалужень їхніх обмоток реактори цього типу мають велику ступень регулювання току реактора, тому їх не можна використовувати [3].

Можна забезпечити необхідну ступень регулювання і потрібну швидкодію ДР із переключенням відгалужень обмотки шляхом реконструкції реакторів даного типу. Швидкодіюче регулювання таких реакторів може бути досягнуто заміною механічного перемикача тиристорними ключами. Необхідна точність регулювання забезпечується відповідним підключенням регулювальних секцій і вибором числа витків у кожній секції.

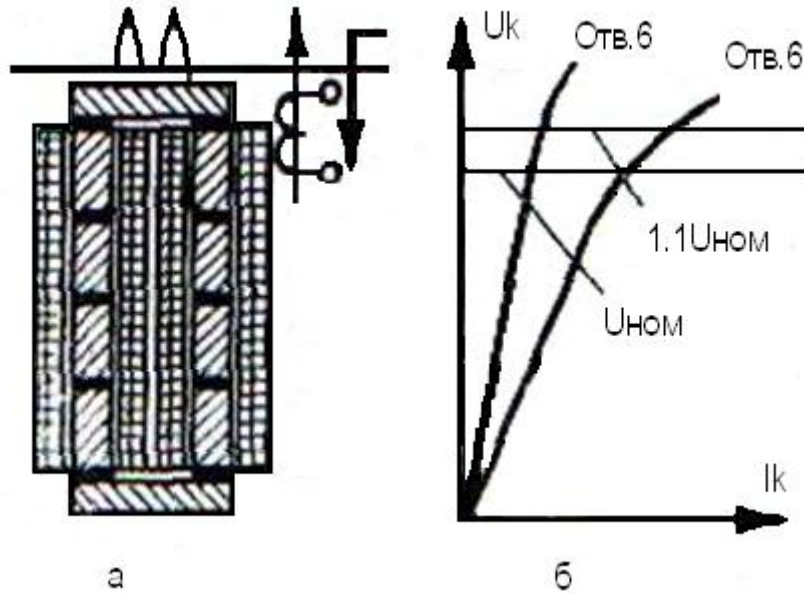


Рисунок 1.1 – ДР із переключенням відгалужень обмотки: а – загальний вигляд, б – залежність струму компенсації від фактору регулювання

Задача швидкодіючого регулювання струму компенсації на базі реактора з переключенням відгалужень обмотки може бути вирішена також шляхом застосування дискретно регульованої батареї конденсаторів (БК), підключеної через трансформатор, що погодить, до нейтралі мережі. На відміну від традиційних пристроїв, у яких струм компенсації регулюється зміною індуктивності реактора, тут ця індуктивність залишається постійною, а зміна ємності мережі щодо землі компенсується регулюванням ємності БК таким чином, що сумарна ємність мережі і БК завжди залишається постійною.

На рис 1.2 приведені загальний вигляд і залежність струму компенсації від фактора регулювання ДР зі зміною зазорів у магнітній системі (плунжерного ДР).

Плавна зміна струму в плунжерних реакторах здійснюється зміною зазору між сердечниками магнітопроводу за допомогою електродвигуна.

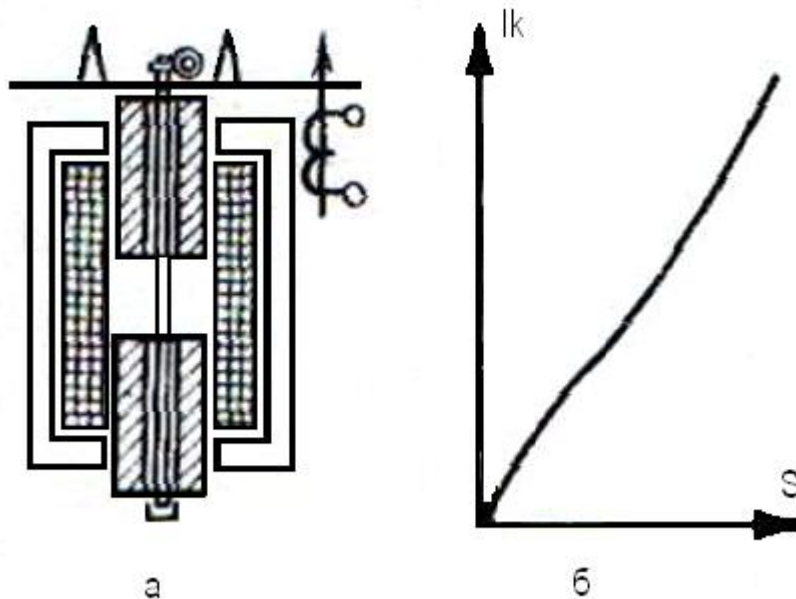


Рисунок 1.2 - Плунжерний ДР: а – загальний вигляд; б – залежність струму компенсації від фактора регулювання

Вартість даних ДР багато вище вартості ДР із переключенням відгалужень обмотки. Плунжерні реактори мають меншу надійність, ніж ДР із переключенням відгалужень обмотки, тому що сердечники, що переміщуються, утворюючи зазори в магнітопроводі, і зв'язані з ними конструктивні елементи піддаються вібраційним навантаженням при тривалих і багаторазових протіканнях струмів [3].

На рис 1.3 приведені загальний вигляд і залежність струму компенсації від фактора регулювання ДР із вільним подовжнім підмагнічуванням.

В ДР із вільним подовжнім підмагнічуванням "постійний" (керуючий) магнітний потік збігається по напрямку у просторі із змінним (робочим) потоком, тобто в стрижнях та ярмах магнітопроводу обидва потоку колінеарні, як і в "класичних" магнітних підсилювачах.

Внутрішні зворотні зв'язки роблять цей ДР непридатним у режимі дугового однофазного замикання на землю ОЗНЗ без компенсації активної складової і дуже ускладнюють задачу попереднього настроювання в нормальному режимі.

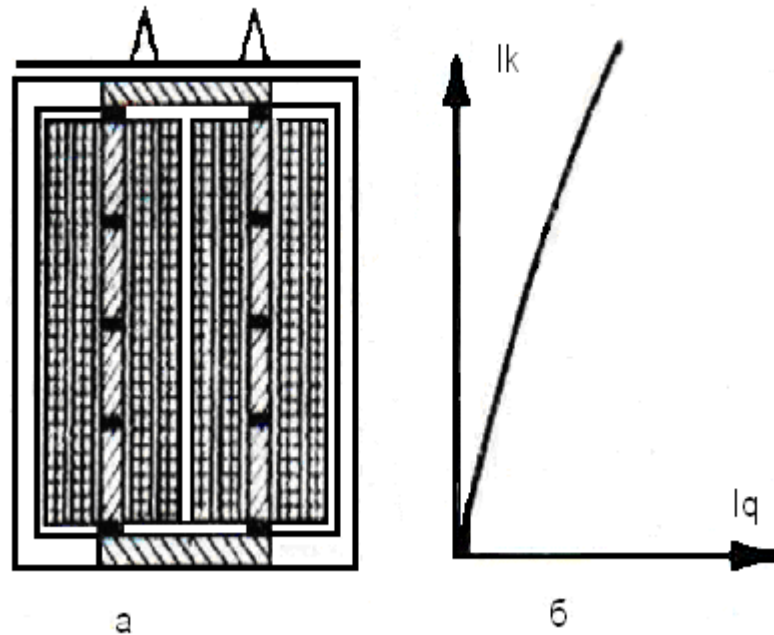


Рисунок 1.3 - ДР із вільним подовжнім підмагнічуванням: а – загальний вигляд; б – залежність струму компенсації від фактору регулювання

На рис 1.4 приведені загальний вигляд і залежність струму компенсації від фактору регулювання ДР зі змушеним поперечним підмагнічуванням.

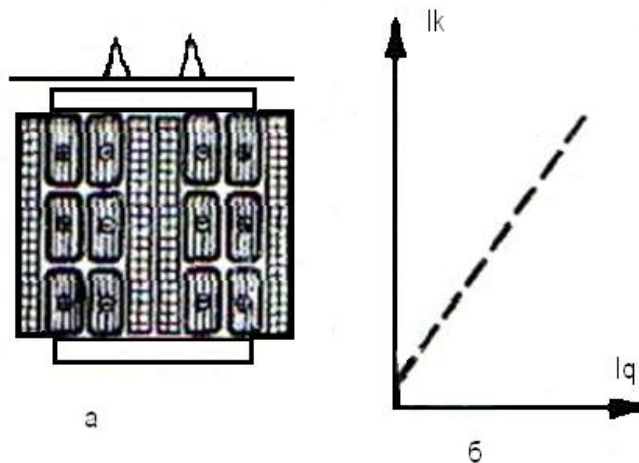


Рисунок 1.4 - ДР зі змушеним поперечним підмагнічуванням: а – загальний вигляд; б – залежність струму компенсації від фактору регулювання

В реакторах зі змушеним поперечним підмагнічуванням керуюче ("постійне") магнітне поле у рамках магнітопроводу спрямовано ортогонально змінному робочому полю.

Завдяки ортогональності полів характеристики намагнічування в подовжній осі симетричні відносно початку координат незалежно від поперечного поля. При цьому парні гармоніки в робочому струмі взагалі не виникають, а непарні монотонно зменшуються з ростом підмагнічування. Відсутність прямого електромагнітного зв'язку поміж обмотками керування та основної полегшує здобуття високої швидкодії.

Найбільш просто автоматизувати ДР плунжерного типу. Однак він має відносно малі швидкодію, надійність та малий ресурс використання в порівнянні з ДР з підмагнічуванням. Однак, ДР з підмагнічуванням в свою чергу має нелінійну характеристику, що ускладнює настройку системи регулювання, і більше в порівнянні з плунжерним реактором активну складову струму реактора. Незважаючи на вказані вище особливості у теперішній час ДР з підмагнічуванням є найбільш перспективним засобом боротьби проти дугових коротких замикань тому, що такого типу реактори не мають у своєму складі електропривода і механічного редуктора, як у плунжерних ДР із регульованим зазором, вони вимагають меншого догляду і рідше виходять з ладу, але головне, що відрізняє їх від ДР плунжерного типу і складається в можливості автоматичного керування ним в режимі замикання на землю для підтримки резонансної настройки реактора при змінах сумарної ємності мережі.

З двох розглянутих типів ДР з підмагнічуванням ДР зі змушеним поперечним підмагнічуванням мають ліпші електромагнітні характеристики, ніж ДР із вільним подовжнім підмагнічуванням, однак ДР зі змушеним поперечним підмагнічуванням конструктивно та технологічно складніше за ДР із вільним подовжнім підмагнічуванням, тому їх серійно не випускають, у той час коли серійне виробництво ДР із вільним подовжнім підмагнічуванням налагоджене на заводах України та Росії (наприклад, реактори типу РУОМ). При моделюванні АСР ДР на ЕОМ необхідна математична модель дугогасного реактора як об'єкта керування. Однак, більшість існуючих моделей дозволяє розрахувати тільки його технічні характеристики.

#### **Висновки**

1. Ефективність компенсації реактивної потужності залежить від величини місткості конденсаторної батареї, яка у свою чергу визначається точністю налаштування регулятора.

2. Налаштування регульованої конденсаторної установки визначається наступними чинниками: реальна споживана потужність і характер навантаження, визначувані техніко-економічними і статистичними показниками роботи мережі; схема підключення розподільних пристроїв; конфігурація схеми підключення конденсаторних батарей; розрахунок і використання фільтрів гармонік електромережі; похибки вимірювальних трансформаторів струму і напруги.

3. Вдосконалення системи компенсації зводиться до забезпечення комплексного інженерного підходу, що враховує усі особливості системи електропостачання.

4. Одним з рішень цієї задачі може бути розробка багаторівневої системи обробки інформації з розподілом функцій, що виконуються кожним рівнем. Крім того, ця система не повинна використовувати обмежену кількість сигналів (даних), а необхідно передбачити можливість гнучкого управління і обліку змінної безлічі параметрів, що описують зовнішні дії і взаємний їх вплив один на одного.

Для вирішення даної задачі пропонується багаторівнева системи обробки інформації з поділом функцій, виконуваних кожним рівнем, яка враховує змінну кількості параметрів.

#### **Література**

1. А. М. Василянський, Р. Р. Мамошин, Г. Би. Якимов. Вдосконалення системи тягового електропостачання залізниць, електрифікованих на змінному струмі 27,5 кВ, 50Гц. // Залізничі світу, 08-2002. С. 73-75.

2. Ю. С. Железко. Про нормативні документи в області якості електроенергії і умов споживання реактивної потужності. / Електрика. 2003. № 1. 9-16 с.

3. Галыгина О. С., Заугольников В. Ф. Про деякі аспекти обліку і втрат електроенергії в підприємствах електромереж Энергетик, 2004, №5. С. 18-22.