

ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

DOI 10.31891/2307-5732-2021-301-5-87-91

УДК 621.316

ГОНЧАРЕНКО Ю.П., КОНОВАЛОВ О.В., ПОЛЕЩУК І.І., ПРЯДКО В.А.

Поліський національний університет

ГУНЬКО І.О.

Вінницький національний технічний університет

ORCID ID: 0000-0002-2660-182X

e-mail: iryna_hunko@ukr.net

ОДИН ІЗ АСПЕКТІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СІЛЬСЬКИХ МЕРЕЖАХ 0,4 кВ

Анотація. У статті розглядаються умови забезпечення необхідних значень коефіцієнта потужності в режимі компенсації реактивної потужності системи електропостачання малопотужних переробних підприємств сільськогосподарської продукції. Визначена аналітична залежність потужності компенсаційного пристрою, необхідного для забезпечення бажаного значення коефіцієнта потужності. Розроблений алгоритм розрахунку гармонічних складових струму конденсаторної батареї в мережі з джерелами вищих гармонік. При розрахунках враховані залежності гармонік струму від величини навантаження споживачів мережі 0,4 кВ. Проведений аналіз виникнення можливих резонансних явищ в мережі 10(6) кВ. Визначена величина струму батареї конденсаторів у випадку коли джерелом вищих гармонік являється сама система живлення або споживачі електричної енергії в мережі 0,4 кВ.

Ключові слова: коефіцієнт потужності, гармонійні складові струму, батареї конденсаторів.

HONCHARENKO YURIY PAVLOVYCH, KONOVALOV OLEKSANDR VASYLOVYCH,
POLESHCHUK IVAN IVANOVYCH, PRIADKO VOLODYMYR ANATOLIIOVYCH

Poliskyi National University

HUNKO IRYNA OLEKSANDRIVNA

Vinnitsya National Technical University

ONE ASPECT OF REACTIVE POWER COMPENSATION IN 0.4 KV RURAL NETWORKS

Abstract. A sign of today is the development of powerful agro-industrial enterprises and sources of dispersed generation in rural areas. The issues of uninterrupted power supply and improvement of electricity quality indicators in such distribution networks are relevant. In rural electrical networks of alternating current, the total transmitted power S contains active P and reactive Q power of inductive nature, which is due to active - inductive load and therefore, respectively, the current in the power supply system has active and inductive components. The load consumption of active and reactive power characterizes the coefficient of active power $\cos\varphi$, which is defined as the ratio of active power to total. Quite often in energy the reactive power factor $\tan\varphi$ is used as the ratio of reactive power to active power. In our opinion, this more clearly reflects the ratio of the amount of energy consumed.

The article considers the conditions for providing the necessary values of the power factor in the mode of compensation of reactive power of the power supply system of low-power processing enterprises of agricultural products. The analytical dependence of the power of the compensation device required to ensure the desired value of the power factor is determined. An algorithm for calculating the harmonic components of the capacitor bank current in the network with sources of higher harmonics has been developed. The calculations take into account the dependences of current harmonics on the load of 0.4 kV network consumers. Conducted analysis of the occurrence of possible resonant phenomena in the 10 (6) kV network. The value of the capacitor bank current is determined in the case when the source of the higher harmonics is the power supply system itself or the consumers of electricity in the 0.4 kV network.

Key words: power factor, harmonic current components, capacitor banks.

Постановка проблеми

В сільських електричних мережах змінного струму повна передана потужність S містить активну P і реактивну Q потужність індуктивного характеру, що обумовлено активно – індуктивним навантаженням і тому відповідно струм в системі електропостачання має активну та індуктивну складові. Споживання навантаженням активної і реактивної потужності характеризує коефіцієнт активної потужності $\cos\varphi$, який визначається як відношення активної потужності до повної. Досить часто в енергетиці використовується коефіцієнт реактивної потужності $\tan\varphi$, як відношення реактивної потужності до активного. На нашу думку, це більш чітко відображає співвідношення кількості енергії, яка споживається.

У системах електропостачання (СЕП) використовуються компенсуючі пристрої. Використання установок компенсації реактивної потужності дозволяє [1]:

- знизити втрати активної потужності і електричної енергії;
- збільшити напругу на виходах електричних приймачів;
- зменшити завантаження елементів СЕП (силових трансформаторів, ліній передачі електричної енергії, розподільних пристроїв і т.п.);
- підвищити якості електроенергії;
- підключати додаткове навантаження без збільшення потужності силових трансформаторів і перетину проводів ліній електропередачі;

- значно збільшити термін служби електрообладнання тощо [2].

Сьогодні споживання реактивної потужності в країні регламентується певними нормативними документами [3,4]. Відповідно до них максимальне значення коефіцієнта реактивної потужності нормується в залежності від годин великих добових навантажень мережі. Так для мереж 0,4 кВ відповідно $\cos\varphi = 0,95$, а $\tan\varphi = 0,35$. Крім того встановлені нормативні значення коефіцієнта потужності для підприємств виробників та юридичних осіб відповідно до [4] величиною $\tan\varphi = 0,8$.

Природний коефіцієнт потужності (коефіцієнт потужності без використання компенсуючих пристроїв) виробничих підприємств як правило відрізняється від нормативного в ту чи іншу сторону. Відповідно до цього виникає необхідність в регулюванні $\cos\varphi$ шляхом компенсації реактивної потужності з використанням синхронних двигунів і компенсаторів, а також конденсаторних батарей.

Фактичний коефіцієнт потужності активного і реактивного навантаження визначається [4]:

$$\tan\varphi_H = \frac{WQ_c}{WP_c},$$

де WQ_c і WP_c – фактичний об'єм споживання активної (кВт·год) і реактивної (кВар·год) потужності за розрахунковий період.

З іншого боку коефіцієнт потужності навантажувального вузла розраховується по формулі:

$$\cos\varphi_H = \frac{P_{\text{нав}}}{\sqrt{P_{\text{нав}}^2 + Q_{\text{нав}}^2}},$$

де $Q_{\text{нав}}$ і $P_{\text{нав}}$ – реактивна і активна потужність споживана електроприймачами.

Бажання одержати максимальне значення коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{\text{баж}}$ потребує використання пристроїв компенсації реактивної потужності (ПКРП). Відповідно до цього :

$$\cos\varphi_{\text{баж}} = \frac{P_{\text{нав}}}{\sqrt{P_{\text{нав}}^2 + (Q_{\text{нав}} - Q_{\text{ПКРП}})^2}}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{ПКРП}}$ – потужність яка генерується ПКРП.

Запишемо вираз (2) в наступному вигляді:

$$\sqrt{P_{\text{нав}}^2 + (Q_{\text{нав}} - Q_{\text{ПКРП}})^2} = \frac{P_{\text{нав}}}{\cos\varphi_{\text{баж}}}. \quad (2)$$

Піднесемо (2) в квадрат, розкриємо дужки та перенесемо всі члени в ліву частину і одержимо вираз:

$$P_{\text{нав}}^2 + Q_{\text{нав}}^2 - 2Q_{\text{нав}}Q_{\text{ПКРП}} + Q_{\text{ПКРП}}^2 - \frac{P_{\text{нав}}^2}{\cos^2\varphi_{\text{баж}}} = 0. \quad (3)$$

З врахуванням, що $Q_{\text{нав}} = P_{\text{нав}} \cdot \cos\varphi_{\text{нав}}$ одержимо

$$P_{\text{нав}}^2 + P_{\text{нав}}^2 \cdot \cos^2\varphi_{\text{нав}} - 2P_{\text{нав}} \cdot \cos\varphi_{\text{нав}} \cdot Q_{\text{ПКРП}} + Q_{\text{ПКРП}}^2 - \frac{P_{\text{нав}}^2}{\cos^2\varphi_{\text{баж}}} = 0. \quad (4)$$

Вираз (4) представимо в наступному виді:

$$Q_{\text{ПКРП}}^2 - 2P_{\text{нав}} \cdot \cos\varphi_{\text{нав}} \cdot Q_{\text{ПКРП}} + P_{\text{нав}}^2 + P_{\text{нав}}^2 \cdot \cos^2\varphi_{\text{нав}} - \frac{P_{\text{нав}}^2}{\cos^2\varphi_{\text{баж}}} = 0. \quad (5)$$

Розглянемо окремо останні три члени рівняння (5) $P_{\text{нав}}^2 + P_{\text{нав}}^2 \cdot \cos^2\varphi_{\text{нав}} - \frac{P_{\text{нав}}^2}{\cos^2\varphi_{\text{баж}}}$, зробивши

алгебраїчні перетворення та підставимо їх назад у вираз (5) одержимо:

$$Q_{\text{ПКРП}}^2 - 2P_{\text{нав}} \cdot \cos\varphi_{\text{нав}} \cdot Q_{\text{ПКРП}} + P_{\text{нав}}^2 (\tan^2\varphi_{\text{нав}} - \tan^2\varphi_{\text{баж}}) = 0. \quad (6)$$

З точки зору максимально ефективного використання потужності СЕП повинна виконуватись умова:

$$\lim_{Q_{\text{ПКРП}} \rightarrow 0} (\tan^2\varphi_{\text{нав}} - \tan^2\varphi_{\text{баж}}) = 0. \quad (7)$$

Враховуючи (7) із виразу (6) маємо, що:

$$Q_{\text{ПКРП}} = 2P_{\text{нав}} \cdot \cos\varphi_{\text{нав}} = 2Q_{\text{нав}}. \quad (8)$$

Співвідношення (8) свідчить про те, що для оптимального режиму компенсації з врахуванням всіх можливих впливів при перетіканні реактивної потужності ПКРП, для досягнення бажаного значення $\cos\varphi_{\text{баж}}$, повинен забезпечувати компенсацію реактивної потужності як в індуктивному так і в активно-емнісному режимі.

Дане ствердження являється актуальним на сьогодні, так як в склад електричних навантажень більшості як виробничих підприємств так і побутових споживачів входять частотно-регульовані електроприводи (ЧРП). Їх сумарна встановлена потужність в залежності від частки рухового навантаження може досягати 20-25% від сумарної потужності підприємства [2]. Відомо, що установка ЧРП є характерним джерелом вищих гармонік (ДВГ). Крім того, випрямлячі напруги електроприводів потужністю до 100 кВт, як правило, виконуються за шестифазною напівперіодною схемою. Тому дані електроустановки генерують гармоніки з номерами 5, 7, 11, 13 і т.п. [2]. Ці ж гармоніки генеруються зварювальними випрямлячами.

Зауважимо, що в мережі живлення (в системі) найбільш поширеними типами ДВГ також є шестифазні перетворювачі та зварювальні випрямлячі.

На рис. 1,а показана спрощена схема розрахунку мережі виробничого підприємства в звичайному режимі роботи. Схема складається з чотирьох характерних гілок:

- мережі (понижувальний трансформатор та джерело живлення) з кабельною лінією (КЛ) до РП-6 (10) кВ;
- асинхронних електродвигунів 6 (10) кВ;
- понижувального трансформатора 6 (10)/0,4 кВ з підключеним до нього навантаження;
- косинусної батареї конденсаторів (КБ) для компенсації реактивної потужності.

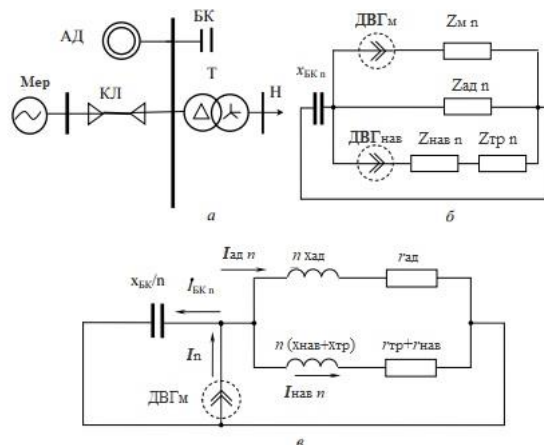


Рис. 1. Спрощена розрахункова схема мережі в нормальному робочому режимі (а); схема заміщення мережі для можливих варіантів розташування ДВГ (б); схема заміщення для розрахунку вищих гармонік (ДВГ знаходиться в мережі) (в).

Як правило, всі опори схеми мають активно – індуктивний характер. Виняток є опір КБ, який має ємнісний характер. У такій схемі в певних режимах роботи мережі можливі резонансні. Відомо, що резонанс струмів виникає при вищій частоті, ніж частота промислової мережі (50 Гц) [2].

Резонансні явища на вищих гармоніках є причиною більших спотворень струму і напруги у розподільній мережі. Вони викликають підвищені струми КБ, внаслідок чого відбувається їх перевантаження, і вони виходять з ладу. Значення струму на виходах ДВГ не залежить від опору мережі та визначаються розрахунковою потужністю ДВГ [2]. Відповідно до цього схема заміщення ДВГ представлена як джерело струму (рис.1, б). При цьому ДВГ може знаходитися як в складі живильної мережі так і в складі навантаження споживачів 0,4 кВ.

На рис.1,в приведена схема заміщення мережі для n -ої гармоніки в режимі коли ДВГ знаходиться в мережі живлення. В даній схемі гілка асинхронного двигуна (АД) і навантаження (Н) з'єднані паралельно і утворюють еквівалентний R-L ланцюг. В свою чергу дані два паралельні ланцюги відносно виводів ДВГ з'єднані паралельно з гілкою БК, яка має ємнісний характер навантаження. В даному випадку схема при певних величинах опорів навантаження може мати резонанс струмів.

1. Результати досліджень

Для дослідження резонансних процесів був розроблений алгоритм розрахунку резонансних струмів БК для різних номерів гармонік. В ньому передбачений вплив величини навантаження споживачів мережі 0,4 кВ, еквівалентного АД 6(10) кВ та розрахунок величини ДВГ. На базі алгоритму розроблена комп'ютерна програма, яка дозволяє визначити резонансну частоту мережі та опір схеми відносно ДВГ, а також розрахувати струми ДВГ та БК з урахуванням вищих гармонік та величини навантаження.

Розрахунки гармонійного складу струму для КБ були проведені на приватному сільськогосподарському підприємстві по переробці зерна для загальної потужності активного навантаження $P_{нав} = 50-380$ кВт, живлення відбувається від ТП з трансформатором ТМ 320/6 : , $U_K\% = 5,5\%$, $\Delta P_{кз} = 6,1$ кВт, $R_{тр} = 2,36$ Ом, $X_{тр} = 6,1$ Ом; по кабельній лінії довжиною $L_n = 52$ м з $F = 35$ мм² ($R_{пит} = 0,89$ Ом/км, $X_{пит} = 0,087$ Ом/км).

На рис. 2 приведені графі зміни опору мережі відносно виводів ДВГ в залежності від частоти номера гармоніки струму.

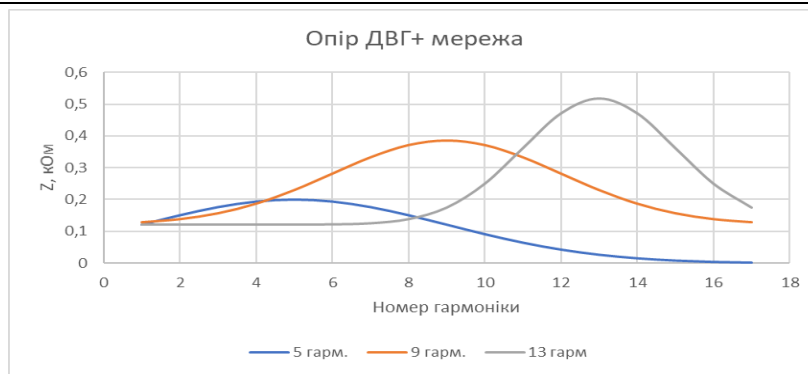


Рис. 2. Залежність опору мережі відносно виводів ДВГ від частоти

Розрахунки показують, що нерезонансні частоти 5, 7 та 13 гармонік відповідають максимальному опору мережі. У відповідності до графіка рис.2, наприклад резонансна частота 5-ої гармоніки складає 260 Гц.

2. Пропозиції по схемним рішенням

З метою забезпечення оптимальної компенсації реактивної потужності в залежності від величини та типу навантаження споживачів пропонується компенсаційна установка з слідкуючим антирезонансним фільтром.

На рисунку 3 показана існуюча схема і еквівалентна схеми з'єднання фільтруючого антирезонансного дроселя з конденсаторною батареєю недоліком якою є знищення струмів однієї вищої гармоніки частот [6]. Ця схема не ефективно діє при інших вищих паразитичних частотах (гармоніки з 3-ї по 7-му). Для усунення даного недоліка пропонується схема, яка відслідковує і визначає тип гармоніки та підключає необхідний антирезонансний фільтр.

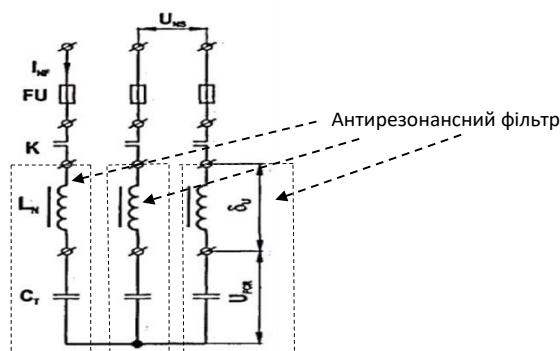


Рис. 3. Схема і еквівалент схеми з'єднання фільтруючого антирезонансного дроселя з конденсаторною батареєю

На рисунку 4 показана схема слідкуючого антирезонансного фільтра на тиристорах. Управління тиристорів проходить завдяки схеми управління, яка складається з пристрою аналізатора спектру, пристрою визначення максимальної амплітуди паразитної гармоніки.

Аналізатор спектру проводить спектральний аналіз напруги, які мають різні частотні характеристики, визначає амплітуду кожної з них, результати вимірів подається на пристрій визначення максимальної амплітуди паразитної гармоніки. Даний пристрій формує управляючий сигнал, який завдяки вибраного тиристора підключає той, чи інший елемент антирезонансного фільтра, який компенсує паразитний тип гармоніки.

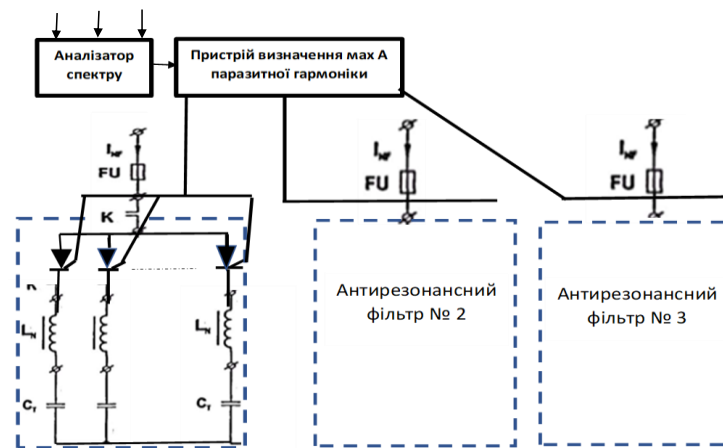


Рис. 4. Схема слідуючого антирезонансного фільтра.

Використовуючи різні розв'язуючі елементи (частотні фільтри) схема може компенсувати декілька паразитних гармонік. Аналізатор спектру та пристрій визначення максимальної амплітуди паразитної гармоніки реалізуються на програмованих пристроях.

Висновки

Запропоновано алгоритм і на його основі реалізована комп'ютерна програма для розрахунку гармонійних складових струму батарей конденсаторів в електричній мережі виробничого сільськогосподарського підприємства з приладами компенсації реактивної потужності, що містить джерело вищих гармонік. Струм батарей конденсаторів розрахований в залежності від параметрів навантаження 0,4 кВ та еквівалентного електродвигуна 6 (10) кВ. Показано, що зі зменшенням потужності конденсаторної батареї збільшує ймовірність виникнення резонансу струмів. Знайдено залежність зміни струму конденсаторної батареї від величини потужності джерела вищих гармонік.

Література

1. Железко Ю.С. Вибір заходів щодо зниження втрат електроенергії в електричних мережах. М.: Вища школа, 1989. 176с.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
3. Про Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. наказ ВІД 21.06.2013 № 399
4. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Наказ 06.02.2018 № 87
5. Папаика Ю.А., Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В. Резонансные процессы в системах электроснабжения угольных шахт с мощными нелинейными нагрузками. Матеріали VII Всеросійської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Енергетика: управління, якість та ефективність використання енергоресурсів» (Росія, м. Благовещенськ, 4-6 червня, 2013 р.). С. 132-138.
6. Красник В.В. Автоматичні пристрої по компенсації реактивної потужності в електромережах підприємств. М.: Вища школа, 1983. 136с.

References

1. Zhelezko Yu.S. Vybir zakhodiv shchodo znyzhennia vtrat elektroenerhii v elektrychnykh merezhakh. M.: Vyshcha shkola, 1989.176s.
2. Zhezhelenko Y.V. Vysshye harmonyky v systemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy. yzd., pererab. y dop. M.: Enerhoatomyzdat, 2000. 331 s.
3. Pro Metodychni rekomendatsii vyznachennia tekhnolohichnykh vytrat elektrychnoi enerhii v transformatorakh i liniyakh elektroperedavannia. Ministerstvo enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti ukrainy. Nakaz vid 21.06.2013 № 399
4. Pro zatverdzhennia Metodyky obchyslennia platy za peretikannia reaktivnoi elektroenerhii. Ministerstvo enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti ukrainy. Nakaz 06.02.2018 № 87
5. 5.Papayka Yu.A., Pivniak H.H., Zhezhelenko Y.V. Rezonansnye protsessy v systemakh elektrosnabzheniya uholnikh shakht s moshchnimy nelyneinimy nahruzkamy. Materialy VII Vserosiiskoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu «Enerhetyka: upravlinnia, yakist ta efektyvnist vykorystannia enerhoresursiv» (Rosii, m. Blahoveshchensk, 4-6 chervnia, 2013 r.). S. 132-138.
6. Krasnyk V.B. Avtomatychni prystroiy no kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti v elektromerezhakh pidpriemstv. M.: Vyshcha shkola, 1983. 136s.