

ЛОКАЛЬНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕЖИМИ В ТРИПРОВІДНІЙ МЕРЕЖІ ТА КОМПЕНСАЦІЯ НЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ

Сіротін Ю. О.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Для трифазної мережі в точці підключення несиметричного лінійного навантаження запропоновано метод створення врівноваженого режиму постачання, що забезпечує поставку активної потужності початкового режиму з мінімальними втратами.

Постановка проблеми та аналіз публікацій.

Нормальна робота генераторів і електродвигунів (без флуктуацій і вібрацій) вимагає врівноваженого (непульсуючого) режиму. Метод компенсації пульсуючої потужності (ПП) при симетричній напрузі забезпечує врівноважений режим, симетруючи несиметричне навантаження, але не компенсуючи реактивну потужність (коефіцієнт потужності залишається менше одиниці) [1]. При несиметричній синусоїдальній напрузі після компенсації ПП коефіцієнт потужності залишається менше одиниці, миттєва потужність (МП) ланцюга джерела стає постійною, однак вона не дорівнює повній активної потужності навантаження. При несиметричній напрузі компенсатор ПП вимагає активних засобів генерації енергії активної потужності [2].

Створити врівноважений режим, в якому миттєва потужність буде постійною і рівною початковій активній потужності, можливо за допомогою активного струму Fryze [3, 4]. Активний струм Fryze має однозначний енергетичний сенс: "При заданій напрузі він з мінімальними втратами поставляє енергію з такою ж (активною) потужністю, що і повний струм". Після компенсації за Fryze коефіцієнт потужності дорівнює одиниці. При несиметричній напрузі компенсатор Fryze (компенсуючи струм небалансу і реактивний струм навантаження, повністю усуває додаткові втрати) істотно зменшує і пульсації МП, проте не повністю - режим ланцюга джерела залишається невірноваженим [3].

Мета статті. Проблема полягає в тому, щоб при заданій несиметричній напрузі створити врівноважений режим, який з найменшими втратами (на 1 Ом) поставляє енергію з такою ж активною потужністю, що й початковий невірноважений і незбалансований режим.

Врівноважений і збалансований режим. При синусоїдальному режимі локальний енергетичний стан 3-фазної мережі в точці приєднання несиметричного навантаження (НН) контролюється вимірами комплексних величин струму і напруги в перетині $\langle a, b, c \rangle$ її трьох фаз. Ці комплексні величини зручно представляти 3-мірними комплексними векторами (3-комплексами)

$$I = [\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c]^T = [I_a e^{j\varphi_a}, I_b e^{j\varphi_b}, I_c e^{j\varphi_c}]^T, \quad (1)$$

$$U = [\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c]^T = [U_a e^{j\psi_a}, U_b e^{j\psi_b}, U_c e^{j\psi_c}]^T. \quad (2)$$

Тут і далі \top - символ операції транспонування векторів. Уявна потужність визначена як добуток

$$S_B = U \cdot I = |U| \cdot |I| \quad (3)$$

діючих величин (д.з. - норм векторів) напруги та струму

$$|U| = \sqrt{|\dot{U}_a|^2 + |\dot{U}_b|^2 + |\dot{U}_c|^2}; \quad (4)$$

$$|I| = \sqrt{|\dot{I}_a|^2 + |\dot{I}_b|^2 + |\dot{I}_c|^2}. \quad (5)$$

Стандартна комплексна потужність (КП)

$$\dot{S} = U^T I^* = \dot{U}_a I_a^* + \dot{U}_b I_b^* + \dot{U}_c I_c^*, \quad \dot{S} = P + jQ \quad (6)$$

додатково к активній потужності

$$P = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p(t) dt = \Re \dot{S} \quad (7)$$

визначає реактивну потужність синусоїдального режиму

$$\Im \dot{S} = Q \quad (8)$$

* - знак комплексного спряження (КС), T - основний період ($T\omega = 2\pi$).

Модуль стандартної КП (3) визначає геометричну потужність

$$S_G = |\dot{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (9)$$

яка в загальному випадку не співпадає з уявною потужністю

$$S_G \neq S_B \quad (10)$$

В синусоїдальному режимі МП визначена формулою

$$p(t) = \Re[\dot{S} + \dot{N} e^{j2\omega t}]. \quad (11)$$

Якщо потужність пульсацій

$$\dot{N} = I^T U = \dot{I}_a \dot{U}_a + \dot{I}_b \dot{U}_b + \dot{I}_c \dot{U}_c \quad (12)$$

не дорівнює нулю, то режим *неврівноважений*.

Комплексні вектори струму і напруги (1-2) визначають *еквівалентні провідності фаз*

$$\dot{Y}_k = \dot{I}_k / \dot{U}_k, \quad k \in \{a, b, c\}. \quad (13)$$

Коли еквівалентні провідності фаз рівні між собою, то режим *збалансований* [4]. В іншому випадку режим *незбалансований*. Незбалансований режим характеризується *потужністю небалансу* (ПН).

Рівняння потужності в трифазній мережі. У трипровідній мережі напруги трьох фаз вимірюються відносно штучної точки заземлення [4]. Токи задовольняють 1 закону Кірхгофа. Це спричиняє до виконання умов

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0, \quad \dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0. \quad (14)$$

Струми і напруги (1,2), що задовольняють (14), не містять 0-послідовності.

У трипровідній системі потужність небалансу

$$\dot{D}_0 = [IUe_0]. \quad (15)$$

дорівнює змішаному добутку 3-комплекса струмів (1), 3-комплекса напруг (2) та орта 0-послідовності $e_0 = (1, 1, 1)^T / \sqrt{3}$ [4].

ПН обчислюється за формулою

$$\dot{D}_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} [\dot{I}_a (\dot{U}_b - \dot{U}_c) + \dot{I}_b (\dot{U}_c - \dot{U}_a) + \dot{I}_c (\dot{U}_a - \dot{U}_b)]. \quad (16)$$

При несиметричній напрузі потужності (12) та (16) не співпадають і входять в різні рівняння потужності (квадратичні розкладання уявної потужності(3)):

- рівняння розбалансованого режиму [4]

$$S_B^2 = S_G^2 + D_0^2, \quad (17)$$

- рівняння неуврівноваженого режиму [4]

$$S_B^2 = K_0^2 + N^2. \quad (18)$$

Комплексна *непульсуюча потужність* [4] в трипровідній системі дорівнює змішаному добутку 3-комплекса струмів (1), КС 3-комплекса напруги (2) та орта 0-послідовності

$$\dot{K}_0 = [IU^*e_0]. \quad (19)$$

Потужність (19) не дорівнює потужності небалансу(16) та обчислюється за формулою

$$\dot{K}_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} [\dot{I}_a (U_b^* - U_c^*) + \dot{I}_b (U_c^* - U_a^*) + \dot{I}_c (U_a^* - U_b^*)].$$

Ток Fryze й рівняння потужності втрат. У синусоїдальному режимі активний струм (струм Fryze) визначається 3-комплексом [4]

$$I_{aF} = \frac{P}{\underbrace{U^2}_{Y_s}} U = \frac{P}{U} \frac{U}{U} = I_{aF} v. \quad (20)$$

Тут і далі $v = U/U$ – орт 3-комплекса напруги ($|v|=1$). З (20) випливає, що потужність активного струму дорівнює потужності повного струму

$$P = |I_{aF}| \cdot |U| = I_{aF} \cdot U. \quad (21)$$

Активний струм (20) збалансований, його еквівалентні провідності фаз однакові і дорівнюють $\dot{Y}_s = P/U^2$.

3-комплекс повного струму можна представити сумою двох ортогональних складових: активного струму та неактивного струму Fryze

$$I = I_{aF} + \underbrace{(I - I_{aF})}_{I_F} = I_{aF} + I_F. \quad (22)$$

Серед усіх струмів, які при заданій напрузі в навантаження постачають енергію з такою ж активною потужністю, що і повний струм, активний струм Fryze має мінімальне *д.з.* Так як $S_G^2 = P^2 + Q^2$, то з (17) випливає рівняння потужності Fryze

$$S_B^2 = P^2 + Q_F^2. \quad (23)$$

Квадрат неактивної потужності Fryze

$$Q_F^2 = Q^2 + D_0^2$$

характеризує додаткові втрати від неактивного струму (реактивної потужності Q та потужності небалансу D_0).

Рівняння потужності (23) визначає коефіцієнт потужності через активний і неактивний струм Fryze

$$\lambda = \frac{P}{S_B} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_F^2}} = \frac{|I_{aF}|}{|I_{aF} + I_F|} = \frac{I_A}{\sqrt{I_{aF}^2 + I_F^2}}. \quad (24)$$

Якщо неактивний струм скомпенсований, то коефіцієнт потужності дорівнює одиниці. Однак при несиметричній напрузі активний струм, що залишився, має відмінну від нуля ПП [3, 4].

Оптимальний уврівноважений режим. Розв'язання поставленої задачі, що створює оптимально уврівноважений режим, забезпечується струмом ланцюга джерела I_s , який однозначно може бути знайдений методом множників Лагранжа.

Втрати на один Ом характеризуються квадратом *д.з.* трифазного струму (квадрат норми 3-комплексу струму) та визначають цільову функцію

$$F(I) = |I|^2 = I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 \quad (25)$$

умовно екстремальної задачі мінімізації

$$I_s = \arg \min_{I \in \mathcal{J}} |I|^2 \quad (26)$$

Необхідні умови поставки нового режиму:

- активна потужність дорівнює активній потужності вихідного режиму $\Re[U^T I_s^*] = P$;
- пульсуюча потужність дорівнює нулю $\dot{N}_0 = I_s^T U = 0$ (відсутність пульсацій)

формують допустиму область

$$\mathcal{J} = \{I \mid (\Re[U^T I^*] = P) \ \& \ (I^T U = 0)\} \quad (27)$$

екстремальної задачі (26) при заданому 3-комплексі напруг.

Рішення задачі (26)

$$I_s = \frac{P}{\eta^2 U} (\nu - \mu \nu^*) \quad (28)$$

знайдено методом множників Лагранжа. В (28) ν^* – КС орт 3-комплекса напруги, μ , $\dot{\eta}$ – коефіцієнти, що характеризують асиметрію напруги, задовольняють умові $|\mu|^2 + |\dot{\eta}|^2 = 1$ [2].

Струм ланцюга джерела (28), забезпечує урівноважений режим постачання електроенергії, який з найменшими втратами (на 1 Ом) поставляє ту ж саму активну потужність, що і неврівноважений і незбалансований вихідний режим. Струм I_s містить активний струм *Fryze* I_{aF} , який поставляє активну потужність вихідного (незбалансованого і неврівноваженого) режиму. Струм джерела нового режиму не містить неактивний струм *Fryze* I_F вихідного режиму (реактивна і незбалансована потужність вихідного режиму компенсуються). Для компенсації пульсацій струму *Fryze* в струм джерела додана додаткова компонента струму небалансу

Знайдене рішення (28) колінарно орту міжфазної напруги $\nu_\nabla = \nu \times e_0$ (\times – знак векторного множення)

$$I_s = \frac{P}{\eta^2 U} \nu_\nabla = \dot{I}_s \nu_\nabla.$$

Якщо напруга симетрична ($\mu = 0$ та $\eta = 1$), то знайдене рішення збігається з активним струмом *Fryze*. Врівноважений режим з струмом (28) реалізується підключенням компенсуючого пристрою (КП).

Після компенсації значення коефіцієнта потужності у ланцюзі джерела залежить тільки від ступеню асиметрії напруг і може бути попередньо розрахований з використанням коефіцієнта асиметрії напруги по зворотній послідовності, як

$$\lambda_a = \eta = (1 - k_{U2}^2) / (1 + k_{U2}^2).$$

Так в діапазоні зміни коефіцієнта $k_{U2} \in [0; 5\%]$ значення коефіцієнта потужності відрізняється від одиниці в третьому знаку після коми.

Висновки. Показано, що метод множників Лагранжа дозволяє синтезувати КП, який забезпечує урівноважений режим постачання для незбалансованого навантаження при несиметричній напрузі з максимальним коефіцієнтом потужності $\lambda_a = \eta \simeq 1$ (який визначено тільки ступенем несиметрії напруги).

Список використаних джерел

1. Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1985. – 266 с.
2. Сиротин Ю. А. Оптимальная компенсация пульсаций при несимметричном напряжении / Ю. А. Сиротин // Технічна електродинаміка. – 2013. – №3. – С. 73–80.
3. Sirotin Ju. A. Fryze's compensator and Fortescue transformation / Ju. A. Sirotin // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2011.–vol. 1.–101-106. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=4568.
4. Сиротин Ю. А. Ток, мощность и уравнение пульсаций в трехфазной системе / Ю. А. Сиротин // Вісник НТУ "ХПІ", – 2012. – № 23. – С. 146-159 [Електронний ресурс]. – Режим доступа: www.nbu.gov.ua/portal/natural/vcpi/Ente/2012_23/19.pdf.

Аннотация

ЛОКАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ В ТРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ И КОМПЕНСАЦИЯ НЕАКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ

Сиротин Ю. А.

Для трехфазной сети при несимметричном синусоидальном напряжении в точке подключения несимметричной нагрузки предложен метод создания уравновешенного режима, который обеспечивает поставку активной мощности исходного режима с минимальными потерями.

Abstract

LOCAL POWER MODES OF THREE-WIRE NET AND THE COMPENSATION OF NON-ACTIVE POWERS

Ju. Sirotin

At the point of connection of unbalanced linear load to the three-phases net with sinusoidal unbalanced voltage the method for creating a non-pulse mode of delivery is proposed. The new mode provides a supply of the origin active power with minimal losses.