

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОШИРЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В статті запропоновано алгоритм розрахунку спектру наявних гармонік у вузлах і вітках живлячої електричної мережі. Алгоритм дозволяє проаналізувати проникнення гармонік струму від їх джерел в розподільні мережі і оцінити їх вплив на електроустановки живлячої мережі..

Вступ

Наявність в системах електропостачання (СЕП) елементів, які мають нелінійну характеристику, зумовлюють спотворення синусоїдної кривої напруг і струмів. Таке відхилення кривих напруг і струмів від синусоїди прийнято досліджувати шляхом аналізу спектру гармонік [1]. Процеси, пов'язані з розрахунком гармонік в СЕП, впливом їх на якість електроенергії і зменшенням цього впливу, на сьогодні достатньо вивчені [1, 2].

З СЕП вищі гармоніки трансформуються в живлячі мережі і впливають на електричне обладнання, яке віддалене від місця їх генерування [3]. Для компенсації негативного впливу несинусоїдності струмів та напруг необхідно мати повну інформацію щодо їх гармонічного спектру у кожній точці електричної мережі. В даній роботі пропонується метод і алгоритм розрахунку вищих гармонік в окремих елементах живлячих електричних мереж.

Постановка задачі

Проблема визначення рівнів гармонік в електричних мережах умовно ділиться на такі частини: виявлення джерела вищих гармонік, дослідження процесу поширення гармонік і міри відповідності їх встановленим нормам, оцінка впливу вищих гармонік на електроприймачі та розробка заходів щодо його зменшення.

В даній роботі алгоритм розрахунку розробляється за допущення, що електрична мережа симетрична і пасивна, тобто до неї може бути застосований принцип суперпозиції, що дозволяє розглядати кожну гармоніку окремо. Відповідно вибирається метод розрахунку струморозподілу в електричних мережах. Серед можливих методів розрахунку ustalених режимів для розглядуваної задачі доцільно дослідити метод вузлових напруг з розв'язуванням системи рівнянь методом Гаусса [4].

Моделювання поширення гармонік

Потоки потужності основної гармоніки і потоки потужності на гармонічних частотах в електричній системі, як це показано на еквівалентній схемі на рис. 1, взаємозв'язані. Генеруюча система електропостачання Γ є джерелом основної синусоїдальної напруги. Вона через опір системи $R_c + jX_c$ живить навантаження $R_n + jX_n$ через регульований статичний перетворювач. Потужність системи S_s передається споживачам через точки спільного приєднання (ТСП). Як правило, більша частина цієї потужності S_n живить навантаження, а менша S_n - перетворювач.

На рис. 1, б показані потоки гармонік в еквівалентній схемі. На ній генератор основної гармоніки Γ представлено своїм гармонічним опором. Джерелом гармонік струму є перетворювач, від якого частина потужності S_n , перетворена в потужність гармонік, повертається в систему S_{c2} і генератор S_{22} . Більша частина потужності гармонік споживається навантаженням S_{n2} . Потужності S_{c2} і S_{22} , пройшовши ТСП, розподіляються між паралельними елементами електричної мережі (лініями, трансформаторами) і викликають в них додаткові втрати та, спотворюючи напругу, погіршують умови роботи споживачів електроенергії в системі.

Міра впливу гармонік на режим електричної мережі та споживачів електроенергії оцінюється за допомогою коефіцієнту спотворення синусоїдальної кривої напруги, який визначається за виразом [2]:

$$K_{U_i} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_{(v)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_{(v)i}^2}}{U'_{ном}} \cdot 100 [\%], \quad (1)$$

де $U_{(v)i}$ – дійсне значення напруги v -ї гармоніки i -го вимірювання; $U_{(1)i}$ – напруга прямої послідовності основної частоти, i -те вимірювання; n – номер останньої з гармонік, які враховуються.

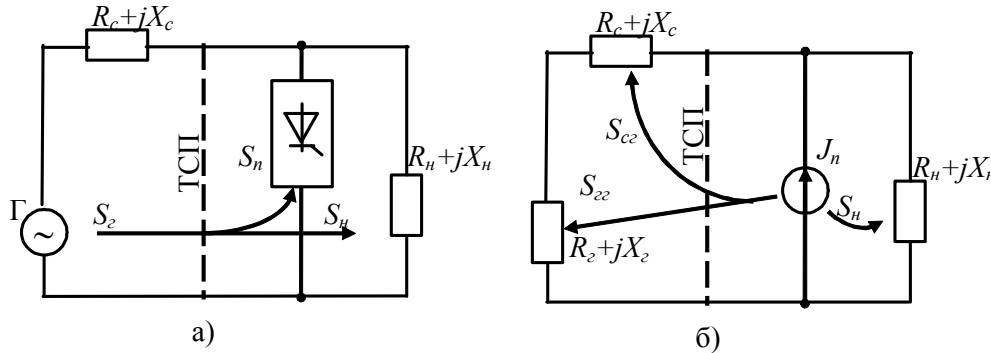


Рис.1. Потоки потужності в електричній системі з гармоніками

Значення потоків потужності на гармонічних частотах в елементах електричної мережі визначаються за формулою:

$$S_i^v = 3 \sum_{v=1}^n (\dot{U}_{vi}^{ex} - \dot{U}_{vi}^{enx}) \cdot \dot{I}_{vi}, \quad (2)$$

де \dot{U}_{vi}^{ex} , \dot{U}_{vi}^{enx} – напруги входу і виходу чотириполюсника, яким моделюється i -й елемент мережі [3]; \dot{I}_{vi} – струм v -ї гармоніки в i -му елементі мережі.

Враховуючи (1), (2) та вимоги до моделювання процесу поширення гармонік [3], розроблено методику і алгоритм розрахунку режиму електричних мереж на кожній з гармонік. За основу прийнято алгоритм, викладений в [4]. Структурно-логічна схема адаптованого до гармонічного аналізу алгоритму приведена на рис. 2.

Оскільки навантаження задаються потужностями з врахуванням статичних характеристик, то розрахунок виконується в декілька ітерацій. На внутрішній ітерації методом Гауса розв'язується система вузлових рівнянь:

$$Y_v \cdot \dot{U}_v = \dot{J}_v, \quad (3)$$

де Y_v – матриця вузлових провідностей електричної мережі на v -ій гармоніці; \dot{U}_v – вектор напруг вузлів v -ї гармоніки відносно базисного вузла; \dot{J}_v – вектор задаючих струмів вузлів, в який входять і струми джерел гармонік.

На зовнішній ітерації уточнюються потужності в вузлах у відповідності з розрахованими напругами і номером поточної гармоніки, а також уточнюються складові вектора \dot{J}_v . Результати розрахунку режиму кожної гармоніки передаються в банк даних (БД) для подальшого аналізу.

Після завершення обчислень підсумкові результати передаються в графічну оболонку програми, де розносяться по елементах електричної мережі. Безпосередньо на мнемосхемі відображаються значення коефіцієнтів несинусоїдності напруги в вузлах, а також значення повних струмів і потужностей у вітках мережі. Параметри режиму будь-якої гармоніки, в тому числі й найбільш впливової, відображаються за викликом.

В програмі, в якій реалізовано розглянутий алгоритм, передбачено дослідження процесу обмеження рівня гармонік в системі за допомогою паралельних фільтрів. Оскільки фільтри, як правило, задаються своїми опорами на тій гармоніці, на яку вони настроєні, а розрахунок ведеться в "потужностях", то дані фільтрів перераховуються в потужності кожної гармоніки.



Рис. 2. Алгоритм дослідження розповсюдження гармонік

За умови, що в настроєному на k -ну гармоніку фільтрі $kX_L = X_C/k$, потужності фільтра на v -й гармоніці визначаються:

$$P_v = \frac{U_v^2 \cdot R}{R^2 + X_C^2 \cdot \gamma^2}, \quad Q_v = \frac{U_v^2 \cdot X_C \cdot \gamma}{R^2 + X_C^2 \cdot \gamma^2},$$

де R, X_L, X_C - відповідно активний, індуктивний та ємний опори фільтра; P_v - втрати активної потужності в фільтрі; Q_v - потужність генерації фільтра; $\gamma = \frac{v^2 - k^2}{k^2 \cdot v}$.

В результаті розрахунку визначаються потоки потужності в елементах мережі S'_{cz} і S'_{zz} , які відрізняються від потоків потужності в мережі, коли в ній відсутні фільтри. Якщо стоїть задача визначення оптимальних місць установки і потужності фільтрів, то формулюється відповідна математична модель і задача розв'язується симплекс-методом [5]. При цьому розглянутий тут алгоритм і програма при моделюванні процесу поширення гармонік в електричній мережі використовуються як окремий програмний модуль.

Практично алгоритм дозволяє аналізувати протікання гармонік струму в мережі одночасно від необмеженої кількості джерел гармонік з будь-яким заданим спектром. Не обмежується також кількість фільтрів. Таким чином, сумарна генерація гармонік струму декількома перетворювачами і фільтрами, під'єднаними до шин електричної мережі,

використовується для аналізу проникнення гармонік струму в дану мережу. Розроблена програма може використовуватись в проектній практиці, для оперативного контролю рівня гармонік в живлячих мережах, а також при дослідженні реальних умов електропостачання в точках приєднання споживачів електроенергії та встановленні відповідності їх нормованим.

Висновки

Для розрахунків і аналізу вищих гармонік, що генеруються в СЕП і поширюються в живлячі мережі, доцільно використовувати алгоритм, в основі якого використовується метод вузлових напруг з розв'язуванням системи лінійних рівнянь методом Гаусса та розкладанням струмів на їх активні і реактивні складові. Такий підхід дозволяє виділяти окремі гармоніки зі спектру і досліджувати їх вплив окремо.

Перелік посилань

1. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. и др. Под ред. И.В. Жежеленко.–М.: Энергоатомиздат, 2007.–296 с.
2. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1985. - 268 с.
3. Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П.Боджер. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
4. Определение оптимальных режимов электрических сетей / Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д., Нагул В.И., Ярных Л.В. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1983. – № 1.– С. 48–59.
5. Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В., Видмиш В.А. Моделювання процесу поширення вищих гармонік в електричних мережах // Проблеми создания новых машин и технологий. Научн. труды Кременчугского госуд. политехн. ун-та. –2000. – №2. – С.284–286.