

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ НЕСИМЕТРІЇ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ З КОРЕКЦІЄЮ ПОХИБКИ

Маков Д.К., к.т.н., доцент

НТУУ «КПІ», кафедра теоретичної електротехніки

Антонюк О.І., старший викладач

НТУУ «КПІ», кафедра електронно-обчислювальної апаратури

Чупак В.В., студент

НТУУ «КПІ» кафедра технології машинобудування

Вступ. Одним із основних показників якості електроенергії (ПЯЕ) є коефіцієнт несиметрії (КН), що характеризується напругою зворотної послідовності (НЗП) основної частоти. Для аналогового виділення НЗП зазвичай використовуються фільтри симетричних складових (ФСС), котрі широко описані в літературі [1].

При вимірюванні КН основна проблема полягає у тому, що необхідно виділити мале інформативне значення НЗП (до 4В) на фоні великої (біля 220В) напруги прямої послідовності (НПП) при відхиленні частоти напруги електричної мережі, що досліджується, від розрахованого для ФСС значення.

Якщо ФСС виготовлений з елементами, параметри яких не відповідають розрахунковим значенням (з розкидом), то при подачі на його входи НПП, на виходах вона буде сприйматись, як трифазна напруга, яка включає в собі НЗП. Ця уявна несиметрія спотворює результати вимірів КН.

Мета роботи. Метою даної роботи було проведення аналізу рівнянь перетворення напруги трифазними ФСС для розробки вимірювального перетворювача КН та рекомендацій по корекції домінуючих похибок ФСС при вимірюванні КН. Основна увага приділяється корекції похибок, зумовлених неідентичністю параметрів елементів ФСС розрахунковим значенням.

Матеріали і результати досліджень. Пристрій складається з фільтрів симетричних складових, увімкнених каскадно і розділених узгоджувачами каскадами. ФСС містять в своїх ланках резистори та конденсатори, параметри R , C яких можуть відхилятися від своїх розрахункових значень. Розкид параметрів призводить до неідентичності коефіцієнта передачі ФСС розрахунковим значенням для лінійних наруг $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$.

В [2] отримано рекурентний вираз для лінійних трифазних наруг $\dot{U}_{aibi}, \dot{U}_{bici}, \dot{U}_{ciai}$ на виходах каскадно увімкненого i -го ФСС.

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{aibi} & \dot{U}_{bici} & \dot{U}_{ciai} \end{pmatrix}^T = \dot{U}_{1(1)(i)} \begin{pmatrix} a_+ \\ \end{pmatrix} + \dot{U}_{2(1)(i)} \begin{pmatrix} a_- \\ \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де: $()^T$ — символ оператора транспонованої матриці, $\begin{pmatrix} \dot{U}_{aibi} & \dot{U}_{bici} & \dot{U}_{ciai} \end{pmatrix}^T$ — матриця трифазних лінійних наруг на виходах i -го ФСС, $a = \exp(j2\pi/3)$.

$$\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} a_+ \\ \end{pmatrix} = \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} = \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 & a^2 & a \end{pmatrix}^T \text{ — НПП основної частоти,}$$

$$\dot{U}_{2(1)}(a_-) = \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} = \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \end{pmatrix}^T \text{ — НЗП основної частоти,}$$

$$\dot{U}_{1(1)(i)}(a_+) = \dot{\alpha}_i \dot{U}_{1(1)(i-1)}(a_+) + \dot{\gamma}'_i \dot{U}_{2(1)(i-1)}(a_+) \text{ — НПП на виходах } i\text{-го ФСС,}$$

$$\dot{U}_{2(1)(i)}(a_-) = \dot{\beta}_i \dot{U}_{2(1)(i-1)}(a_-) + \dot{\gamma}_i \dot{U}_{1(1)(i-1)}(a_-) \text{ — НЗП на виходах } i\text{-го ФСС.}$$

$$\dot{\alpha}_i = \left(\dot{U}_{aibi+} + a \dot{U}_{bici+} + a^2 \dot{U}_{ciai+} \right) / 3 \dot{U}_{1(1)(i-1)} \text{ — коефіцієнт передачі } i\text{-го ФСС для НПП,}$$

$$\dot{\beta}_i = \left(\dot{U}_{aibi-} + a^2 \dot{U}_{bici-} + a \dot{U}_{ciai-} \right) / 3 \dot{U}_{2(1)(i-1)} \text{ — те саме для НЗП,}$$

$$\dot{\gamma}_i = \left(\dot{U}_{aibi+} + a^2 \dot{U}_{bici+} + a \dot{U}_{ciai+} \right) / 3 \dot{U}_{1(1)(i-1)} \text{ — коефіцієнт передачі НПП,}$$

зумовлений несиметрією ФСС внаслідок розкиду параметрів його елементів,

$$\dot{\gamma}'_i = \left(\dot{U}_{aibi-} + a \dot{U}_{bici-} + a^2 \dot{U}_{ciai-} \right) / 3 \dot{U}_{2(1)(i-1)} \text{ — те саме для НЗП.}$$

Запропонований алгоритм.

При реалізації цього алгоритму для зменшення НПП використовується двохкаскадний ФСС. Вхідна трифазна напруга першого ФСС перемикається «по колу». Напруга з виходів другого ФСС a_2, b_2 постійно подається через віднімальну схему та фільтр низьких частот на фазочутливий вольтметр.

1 крок. Напруга з фаз А, В, С підключається, відповідно, до входів A_1, B_1, C_1 першого ФСС.

Використовуючи вираз (1), напругу $\left(\dot{U}_{a_2 b_2} \quad \dot{U}_{b_2 c_2} \quad \dot{U}_{c_2 a_2} \right)^T$ на виходах a_2, b_2, c_2 другого ФСС при виділенні НЗП можна записати наступним чином ($\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \gamma_1 \approx \gamma'_1 \approx \gamma_2 \approx \gamma'_2 \rightarrow 0; \beta_1 \approx \beta_2 \approx 1$):

$$\begin{aligned} & \left(\dot{U}_{a_2 b_2} \quad \dot{U}_{b_2 c_2} \quad \dot{U}_{c_2 a_2} \right)^T = \\ & = \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \dot{U}_{1(1)}(a_+) + \dot{\beta}_2 \dot{\beta}_1 \dot{U}_{2(1)}(a_-) + \left[\dot{k}_1 \dot{U}_{1(1)}(a_+) + \dot{k}_2 \dot{U}_{2(1)}(a_-) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

де \dot{k}_1, \dot{k}_2 - коефіцієнти передач напруг, відповідно, прямої та зворотної послідовності, що викликані розкидом параметрів елементів ФСС,

$\dot{k}_1 \dot{U}_{1(1)}(a_+) + \dot{k}_2 \dot{U}_{2(1)}(a_-)$ - сумарна векторна похибка, зумовлена цим розкидом.

Перший доданок в (2) вказує, у скільки разів (в $1/(\alpha_1 \alpha_2)$ раз) ослаблюється НПП. Якщо отримане ослаблення – недостатнє, можна додати третій ФСС і т.д. Лише другий доданок у (2) пропорційний НЗП, що вимірюється. Складові у квадратних дужках становлять векторну похибку від не ідентичності параметрів вхідних блоків і розкиду параметрів елементів ФСС. Найбільший вплив при однакових ФСС вносить доданок $\dot{\beta}_2 \dot{\gamma}_1 \dot{U}_{1(1)}(a_-)$ у квадратних дужках,

який за модулем може бути співрозмірним або навіть більшим за другий доданок $\dot{\beta}_2 \dot{\beta}_1 \dot{U}_{2(1)}(a_-)$ у (2).

2 крок. Виконується перемиканням вхідних зажимів першого ФСС «по колу». Напруга фаз А, В, С підключається, відповідно, до входів В1, С1, А1 першого ФСС. Напругу $(\dot{U}'_{a2b2} \quad \dot{U}'_{b2c2} \quad \dot{U}'_{c2a2})^T$ на виходах а2, в2, с2 можна представити у наступному вигляді:

$$(\dot{U}'_{a2b2} \quad \dot{U}'_{b2c2} \quad \dot{U}'_{c2a2})^T = a(\dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \dot{U}_{1(1)}(a_+) + \dot{\beta}_2 \dot{\beta}_1 \dot{U}_{2(1)}(a_-)) + [k_1 \dot{U}_{1(1)нозр}(a_+) + k_2 \dot{U}_{2(1)нозр}(a_-)] \quad (3)$$

З (2) та (3) видно, що перші два доданки (2) повернулися на 120° .

3 крок. Виконується перемикання вхідних зажимів першого ФСС «по колу». Напруга фаз А, В, С підключається, відповідно, до входів С1, А1, В1 першого ФСС. Напругу $(\dot{U}''_{a2b2} \quad \dot{U}''_{b2c2} \quad \dot{U}''_{c2a2})^T$ на виходах а2, в2, с2 можна представити у наступному вигляді:

$$(\dot{U}''_{a2b2} \quad \dot{U}''_{b2c2} \quad \dot{U}''_{c2a2})^T = a^2(\dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \dot{U}_{1(1)}(a_+) + \dot{\beta}_2 \dot{\beta}_1 \dot{U}_{2(1)}(a_-)) + [k_1 \dot{U}_{1(1)нозр}(a_+) + k_2 \dot{U}_{2(1)нозр}(a_-)]$$

4 крок. Відбувається підсумування результатів вимірів перших трьох тактів.

$$(\dot{U}_{a2b2} \quad \dot{U}_{b2c2} \quad \dot{U}_{c2a2})^T_{4pez} = (\dot{U}_{a2b2} \quad \dot{U}_{b2c2} \quad \dot{U}_{c2a2})^T + (\dot{U}'_{a2b2} \quad \dot{U}'_{b2c2} \quad \dot{U}'_{c2a2})^T + (\dot{U}''_{a2b2} \quad \dot{U}''_{b2c2} \quad \dot{U}''_{c2a2})^T = 3[k_1 \dot{U}_{1(1)нозр}(a_+) + k_2 \dot{U}_{2(1)нозр}(a_-)] \quad (4)$$

Тобто (4) представляє собою потроєне значення похибки від неідентичності.

5 крок. Від результатів вимірів першого кроку (2) віднімається третина результату четвертого кроку (4).

$$(\dot{U}_{a2b2} \quad \dot{U}_{b2c2} \quad \dot{U}_{c2a2})^T_{5pez} = (\dot{U}_{a2b2} \quad \dot{U}_{b2c2} \quad \dot{U}_{c2a2})^T - [k_1 \dot{U}_{1(1)нозр}(a_+) + k_2 \dot{U}_{2(1)нозр}(a_-)] = \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \dot{U}_{1(1)}(a_+) + \dot{\beta}_2 \dot{\beta}_1 \dot{U}_{2(1)}(a_-) \quad (5)$$

Результат вимірів НЗП (5) не залежить від похибки, зумовленої неідентичністю (розкидом) параметрів елементів ФСС.

Висновки. Проведений авторами аналіз рівнянь перетворення ФСС та запропонований алгоритм показують доцільність корекції похибки, зумовленої неідентичністю (розкидом) параметрів ланок ФСС, для підвищення точності виміру КН.

Перелік посилань

1. Фабрикант В.Л. Фильтры симметричных составляющих. М.-Л., Госэнергоиздат, 1962, 424с.
2. Щерба А.А., Маков Д.К., Захарченко С.Н., Супруновская Н.И. Анализ уравнений преобразования трехфазных напряжений при каскадном соединении фильтров симметричных составляющих/Праці Інституту електродинаміки НАН України, №3(12), Київ, 2005, с.8-15.