

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА НЕСИМЕТРІЇ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ

Маков Д.К., доцент, Уманська К.В., інженер

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Антонюк О.І., ст. викл.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедри електронно-обчислювальної апаратури

Вступ. Одним із показників якості електроенергії (ПЯЕ) є коефіцієнт несиметрії (КН), який характеризується напругою зворотної послідовності (НЗП) основної частоти [1]. Для аналогового виділення НЗП використовуються фільтри симетричних складових (ФСС), які докладно описані в літературі [2]. При вимірюванні КН необхідно виділити мале інформативне значення НЗП (до 4В) на фоні великої (біля 220В) напруги прямої послідовності (НПП). Причому при відхиленні частоти трифазної напруги, яке нормується [1] в діапазоні $\pm 0,4$ Гц, НПП на виходах ФСС може навіть перевищувати НЗП. Ще більше ця проблема загострюється при подальшому збільшенні відхилення частоти напруги. Це виникає тому, що НПП і НЗП є трифазними напругами одної частоти і відрізняються тільки послідовністю чергування фаз. Розв'язання цієї проблеми за рахунок попереднього вимірювання відхилення частоти трифазної напруги з наступним переключенням РС-елементів ФСС у відповідності з цим відхиленням не завжди може бути вдалим.

Метою цієї роботи є проведення аналізу рівнянь перетворень трифазної напруги ФСС з трьома входами і трьома виходами для розробки рекомендацій по більш сильному послабленню НПП основної частоти при відхиленні частоти трифазної напруги.

Матеріали і результати досліджень. Для трифазного ФСС введемо коефіцієнти передачі для НПП і НЗП [3]. З використанням введених коефіцієнтів розглянемо рівняння перетворення трифазних напруг трифазними ФСС, виділимо домінуючі адитивні та мультиплікативні складові похибки.

Анализ рівнянь перетворення трифазного ФСС. Розглянемо рівняння перетворення трифазної напруги основної частоти трифазним ФСС, який виділяє НЗП і послабляє НПП, тобто при виміру КН.

Позначимо трифазну НПП основної частоти як $\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$, а трифазну

напругу НЗП основної частоти як $\dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$, a є поворотний множник,

$a = \exp(j2\pi/3)$. Вважаємо, що на входи трифазного ФСС, який має три вхідних ($A1, B1, C1$) і три вихідних ($a1, b1, c1$) затискача, підключається трифазна НПП

$\dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$ з частотою ω_c напруги електромережі. ФСС має симетричну відносно

вхідних, а також відносно вихідних затискачів схему з ланками, розміри номінальних значень активних і реактивних елементів яких рівні розрахунковим значенням для частоти ω_p трифазної напруги, тобто ідеальний ФСС.

На вихідних $(a1, b1, c1)$ затискачах ФСС при $\omega_c = \omega_p$ напруга дорівнює нулю.

При $\omega_c \neq \omega_p$ на вихідних $(a1, b1, c1)$ затискачах ФСС напруга дорівнює $\begin{pmatrix} \dot{U}_{a1b1+} \\ \dot{U}_{b1c1+} \\ \dot{U}_{c1a1+} \end{pmatrix}$ і є НПП внаслідок симетричності джерела трифазної напруги і

навантаження – трифазного ФСС.

За умовою, що $\omega_c \neq \omega_p$, значення активних і реактивних елементів ФСС не дорівнюють розрахунковим для даної частоти значенням, симетричність ланок ФСС, і, відповідно, режим роботи всієї схеми не порушується. При

підключенні на вхідні затискачі $A1, B1, C1$ такого ФСС трифазної НЗП $\dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$

трифазна напруга на вихідних затискачах $a1, b1, c1$ ФСС дорівнює $\begin{pmatrix} \dot{U}_{a1b1-} \\ \dot{U}_{b1c1-} \\ \dot{U}_{c1a1-} \end{pmatrix}$ і є

НЗП внаслідок симетричності джерела трифазної напруги і навантаження – трифазного ФСС.

Введемо $\dot{\alpha}_1$ – коефіцієнт передачі ФСС для НПП: $\dot{\alpha}_1 = \dot{U}_{a1b1+} / \dot{U}_{1(1)}$.

Введемо $\dot{\beta}_1$ – коефіцієнт передачі ФСС для НЗП: $\dot{\beta}_1 = \dot{U}_{a1b1-} / \dot{U}_{2(1)}$.

Використовуючи принцип накладання зв'язку з лінійністю схеми, вираз для напруги на виходах трифазного ФСС можна записати:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{a1b1} \\ \dot{U}_{b1c1} \\ \dot{U}_{c1a1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{U}_{a1b1+} \\ \dot{U}_{b1c1+} \\ \dot{U}_{c1a1+} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{U}_{a1b1-} \\ \dot{U}_{b1c1-} \\ \dot{U}_{c1a1-} \end{pmatrix} = \dot{\alpha}_1 \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + \dot{\beta}_1 \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}$$

Таким чином, напруга $\begin{pmatrix} \dot{U}_{a1b1} \\ \dot{U}_{b1c1} \\ \dot{U}_{c1a1} \end{pmatrix}$ на виходах трифазного ФСС залишається

несиметричною трифазною. Але, якщо $\omega_C \approx \omega_P$, в цій вихідній трифазній напрузі значно змінилось співвідношення між НПП и НЗП:

$$(U_{1(1)}/U_{2(1)}) \gg (U_{a1b1+}/U_{a1b1-}), \quad |\dot{\alpha}_1| \ll |\dot{\beta}_1|, \quad |\dot{\alpha}_1| \rightarrow 0, \quad |\dot{\beta}_1| \approx 1.$$

Для підвищення точності виміру КН для виділення НЗП авторами пропонується використовувати двокаскадну фільтрацію за допомогою трифазних ФСС з елементами, які дорівнюють розрахунковим значенням. Між трифазними ФСС включені узгоджуючі схеми.

Використовуючи принцип накладання, можна записати вираз для напруги на виходах другого ФСС при каскадному з'єднанні двох ФСС і підключенні на входи першого ФСС несиметричної трифазної напруги:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{a2b2} \\ \dot{U}_{b2c2} \\ \dot{U}_{c2a2} \end{pmatrix} = \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \dot{U}_{1(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} + \dot{\beta}_1 \dot{\beta}_2 \dot{U}_{2(1)} \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix}.$$

Отриманий вираз показує, що каскадне з'єднання декількох трифазних ФСС з розрахунковими значеннями елементів і узгоджуючими схемами між ФСС дозволяє послабити неінформативну НПП в $1/\left|\prod_{i=1}^n \dot{\alpha}_i\right|$ раз, тобто значно сильніше, ніж один ФСС, так як $1 \gg |\dot{\alpha}_i| \rightarrow 0, \left|\prod_{i=1}^n \dot{\alpha}_i\right|_{n>1} \ll |\dot{\alpha}_i|$.

Висновки:

1. Проведений авторами аналіз рівнянь перетворення трифазних ФСС дозволяє розділити похибки цих ФСС на адитивні та мультиплікативні складові при виміру ПЯЕ, а також виділити домінуючу похибку.

2. Рекомендувати багатокаскадну фільтрацію трифазними ФСС як структурний метод корекції домінуючої адитивної похибки виміру КН для усунення впливу неінформативної НПП при відхиленнях частоти трифазної напруги в системах електроживлення.

При повірці приладу з двокаскадним ФСС на еталонній установці У4330 були отримані наступні результати: при відхиленні частоти 50Гц трифазної напруги на $\pm 0,5$ Гц вимір 2% КН здійснювався з абсолютною похибкою до $\pm 0,2\%$.

Перелік посилань

1. ГОСТ 13109–97. Межгосударственный стандарт. Качество электрической энергии. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

2. Фабрикант В.Л. Фильтры симметричных составляющих. М.-Л., Госэнергоиздат, 1962, 424 с.

3. 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.