

УДК 621.316.13

Л. Б. Терешкевич, к. т. н., доц.;

В. В. Захаров

ВПЛИВ КЕРУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ ІЗ СИМЕТРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ В РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ НА ДОДАТКОВІ ВТРАТИ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Подано результати дослідження змін додаткових втрат активної потужності в розподільних мережах енергопостачальних організацій та споживачів електроенергії при симетруванні електричних режимів. Виявлено їх властивості, дозволяють сформулювати можливі підходи до симетрування режиму та синтезувати алгоритми керування симетрувальними пристроями.

Постановка задачі дослідження

Як свідчать експериментальні дослідження, електричні режими в розподільних мережах енергопостачальних організацій характеризуються суттєвим рівнем несиметрії, який в ряді випадків виходить за нормовані значення. З цим пов'язанні додаткові втрати активної потужності та енергії іноді суттєвих значень.

В практиці експлуатації електричних мереж з метою забезпечення вимог ГОСТ 13109—97 або для зниження збитків від несиметрії виконується симетрування режиму за допомогою симетрувальних пристроїв (СП), які реалізують відомий принцип симетрування [1]. Під'єднання такого пристрою змінює струморозподіл системи зворотної послідовності в схемі і, як наслідок, впливає на величину додаткових втрат активної потужності від несиметрії режиму ΔP_2 . Для розподільних мереж 10 кВ енергопостачальних організацій несиметрія режиму характеризується лише наявністю симетричних складових зворотної послідовності, має динамічний характер і потребує керування в реальному масштабі часу, яке здійснюється шляхом зміни параметрів СП у відповідності до режиму, що склався в мережі. Дослідженню збитків, пов'язаних з несиметрією режиму, в тому числі і додаткових втрат активної потужності, присвячено багато наукових робіт, останні з яких [2, 3]. Але ряд особливостей, характерних для розподільних електричних мереж, які можуть визначити підходи до керування несиметрією режиму в таких мережах, залишилися непоміченими або вивченими недостатньо.

Метою цієї роботи є дослідження впливу рішень із симетрування режиму на додаткові втрати потужності як в мережах енергопостачальних організацій, так і в мережах споживачів, що необхідно для визначення можливих підходів та алгоритмізації керування несиметрією в розподільній мережі.

Аналіз впливу рішень, що приймаються при керуванні несиметрією напруги на значення додаткових втрат активної потужності ΔP_2

Розглянемо заступну схему для струмів зворотної послідовності (рис. 1), де вузол А — вузол, до якого під'єднано СП (вузол, в якому необхідно здійснити симетрування напруги); Z_1 — еквівалентний опір живильних мереж $Z_1 = r_1 + jX_1$; Z_2 — еквівалентний опір розподільних мереж, підключених до вузла А, $Z_2 = r_2 + jX_2$. Несиметрія режиму зумовлена еквівалентним джерелом струму зворотної послідовності \dot{I}_2 (симетрування напруги в вузлі А суттєво не позначається на напрузі у вузлах підключення несиметричних електроприймачів, потужність, що ними споживається, залишиться практично незмінною, а також не зміниться струм зворотної послідовності, який генерується в мережу кожним з цих навантажень).

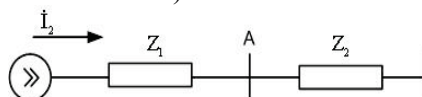


Рис. 1. Заступна схема для аналізу впливу СП на ΔP_2

Оцінимо сумарні (в опорах r_1 та r_2) втрати потужності $\Delta P_{2\Sigma}$:

а) варіант до симетрування напруги

$$\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}} = 3I_2^2(r_1 + r_2), \quad (1)$$

б) варіант після симетрування напруги

$$\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}} = 3 \left[I_2 \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \right]^2 r_1. \quad (2)$$

де $\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}}$; $\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}}$ — втрати активної потужності в опорах r_1 та r_2 відповідно після та до симетрування напруги в вузлі А.

Виконаємо дослідження змін втрат активної потужності ΔP_2 як в живильних мережах (в опорі r_1), так і сумарні $\Delta P_{2\Sigma}$ (в опорах r_1 та r_2) при симетруванні електричного режиму. Для цього розглянемо відношення відповідних втрат активної потужності.

Оцінку зміни втрат активної потужності ΔP_2 в живильних мережах (в опорі r_1) можна виконати, проаналізувавши відношення:

$$\frac{\Delta P_2^{\text{після}}}{\Delta P_2^{\text{до}}} = \frac{3 \left[I_2 \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \right]^2 r_1}{3I_2^2 r_1} = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2, \quad (3)$$

де $\Delta P_2^{\text{після}}$; $\Delta P_2^{\text{до}}$ — втрати активної потужності в опорі r_1 відповідно після та до симетрування напруги у вузлі А.

Оскільки характер опорів Z_1 та Z_2 активно-індуктивний, то відношення Z_2/Z_1 буде мати додатну дійсну частину. В цілому дійсна частина виразу $(1+Z_2/Z_1)$ буде більша за одиницю і незалежно від знака уявної частини відношення Z_2/Z_1 вираз $\left| (1 + Z_2/Z_1) \right|$ буде більший за одиницю. В цілому вираз (3) для реальних можливих співвідношень опорів мереж більший за одиницю.

Таким чином, при симетруванні напруги за допомогою СП втрати, активної потужності ΔP_2 в мережах живлення зростають. При повному симетруванні напруги у вузлі А втрати ΔP_2 в розподільних мережах (в опорі r_2) дорівнюють 0, (струм зворотної послідовності в опорі Z_2 дорівнює нулю).

Для оцінки зміни сумарних втрат активної потужності $\Delta P_{2\Sigma}$ (в опорах r_1 та r_2) при симетруванні електричного режиму розглянемо відношення:

$$\frac{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}}}{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}}} = \frac{\left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} \right|^2 r_1}{r_1 + r_2}, \quad (4)$$

Введемо позначення: $r_2 = ar_1$; $X_2 = caX_1$; $X_1 = dr_1$, де a ; c ; d — числові коефіцієнти (дійсні числа).

Тоді після деяких перетворень (4) запишеться таким чином:

$$\frac{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}}}{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}}} = \frac{\left| 1 + a \frac{1 + jcd}{1 + jd} \right|^2}{1 + a}. \quad (5)$$

Для отримання остаточних висновків побудуємо графічні залежності $\frac{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}}}{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}}}(a; c; d)$, рис. 2.

Із графіків рис. 2 можна зробити висновки:

1. Зміна $\frac{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}}}{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}}}$ залежить від співвідношення між складовими опорів Z_1 та Z_2 ;

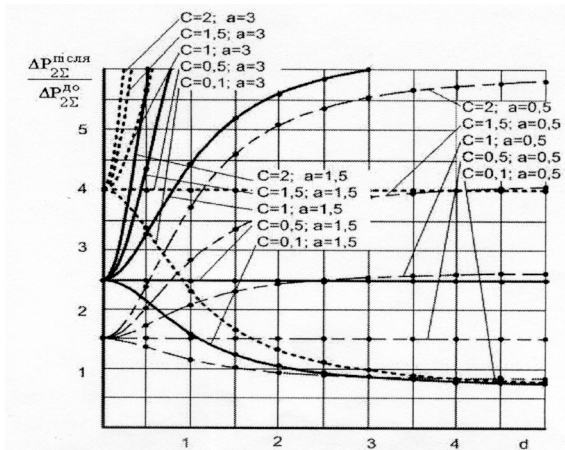


Рис. 2. Залежність зміни сумарних втрат активної потужності $\Delta P_{2\Sigma}$ (в опорах r_1 та r_2) при симетруванні режиму в вузлі А за допомогою СП

2. Лише для випадків, коли $c < 0,5$ та за умови певних значень d , можна отримати зменшення сумарних втрат $\Delta P_{2\Sigma}$ в результаті симетрування напруги, $\frac{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}}}{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}}} < 1$;

3. Якщо $c \geq 0,5$, то сумарні втрати потужності ΔP_2 в живильних та розподільних мережах збільшуються, $\frac{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}}}{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}}} > 1$.

Зазначимо два характерних підходи до керування несиметрією режимів в розподільних мережах і стосовно них сформулюємо умови, які є результатом проведених досліджень.

Випадок 1. Відомчий підхід, коли споживач, в мережах якого технологічне обладнання симетричного виконання (струм зворотної послідовності вводу має напрям до мереж споживача), з метою усунення відповідних збитків, або забезпечення технологічних процесів, які чутливі до наявності симетричних складових зворотної послідовності, або з інших причин здійснює симетрування напруги у вузлі під'єднання до мереж енергопостачальної організації.

Випадок 2. Системний підхід, коли енергопостачальна організація системно вирішує розглядану проблему, в тому числі, стимулюючи окремих споживачів до реалізації тих або інших заходів.

Для першого випадку.

1. Симетруючи напругу у вузлі під'єднання до мереж енергопостачальної організації, можна повністю усунути втрати ΔP_2 в мережах споживача, але втрати в живильних мережах при цьому зростають. З позицій споживача вигідно максимально зменшувати несиметрію напруги в вузлі приєднання.

Для другого випадку.

1. СП, під'єднаний в вузлі схеми, що знаходиться на балансі енергопостачальної організації, доцільно використовувати для забезпечення допустимих за ГОСТ 13109-97 показників, які регламентують несиметрію напруги, навіть за можливості подальшого зниження несиметрії (симетрування збільшує ΔP_2 в живильних мережах).

2. Втрати потужності в мережі гарантовано зменшуються, якщо виконувати симетрування режиму безпосередньо біля несиметричних навантажень ($r_1 = 0$), заохочуючи до цього споживачів.

Аналіз чутливості втрат активної потужності ΔP_2 до керувальних рішень із симетрування режиму

Дослідження обмежимо лише випадком зміни ΔP_2 в розподільчих мережах (опорі r_2), і вкажемо на можливе практичне використання результатів такого дослідження.

Під чутливістю додаткових втрат активної потужності при симетруванні напруги будемо розуміти степінь зниження ΔP_2 у разі ввімкнення секції СП одиничної потужності, яка має найбільший симетрувальний ефект ($\Delta P_2^{\text{до}} - \Delta P_2^{\text{після}}$, де $\Delta P_2^{\text{до}}$, $\Delta P_2^{\text{після}}$ — додаткові втрати активної потужності відповідно до та після ввімкнення секції СП).

Поставлену задачу можна вирішити, розглянувши числовий приклад.

Приклад. Для схеми, рис. 1, $Z_1 = r_1 + jX_1 = 5 + j7$ Ом; $Z_2 = r_2 + jX_2 = 4 + j7$ Ом; струм зворотної послідовності, що створюється еквівалентним джерелом струму, $\dot{I}_2 = 0,5e^{j0}$. У вузлі А встановлено СП, що має три секції, одна з яких може бути ввімкненою на напругу U_{AB} , друга — на U_{BC} , а третя на — U_{CA} , створюючи при цьому струм 0,1 А.

Оцінити чутливість ΔP_2 та дослідити залежність ($\Delta P_2^{\text{до}} - \Delta P_2^{\text{після}}$) від r_2 , $\arg \dot{I}_2$ та $|\dot{I}_2|$.

Розв'язання. Результати, що отримані для заданих параметрів стану, подані в табл.

Величина ΔP_2 в розподільчих мережах для різних варіантів ввімкнення секцій СП

Параметри	Вихідні значення та ті, що забезпечуються при ввімкненні секцій СП		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
Напруга зворотної послідовності в вузлі А (вихідне значення), В	$4,03e^{j60,25}$		
Втрати активної потужності в опорі Z_2 , $\Delta P_2^{до}$, Вт	3		
Напруга зворотної послідовності в вузлі А в результаті ввімкнення відповідної секції СП, В	$3,83e^{j62,1}$	$4,025e^{j56,81}$	$4,24e^{j61,7}$
Втрати активної потужності в опорі Z_2 , $\Delta P_2^{після}$, Вт	2,71	2,99	3,32
$\Delta P_2^{до} - \Delta P_2^{після}$, Вт	0,29	0,01	-0,322

Оцінку чутливості ΔP_2 до симетрування напруги для даних умов виконаємо за найбільш суттєвим симетрувальним ефектом, коли секція СП вмикається на напругу U_{AB} . Для визначеного стану ($\arg \dot{I}_2 = 0$; $I_2 = 0,5$, А; $r_2 = 4$, Ом) вона становить 0,29 Вт.

Результати подальших масових розрахунків, що проведені аналогічним чином, подані графічно на рис. 3.

Отримані результати свідчать, що чутливість ΔP_2 до симетрування напруги в розподільній мережі визначається параметрами схеми (r_2) та параметрами режиму ($\arg \dot{I}_2 | \dot{I}_2 |$), комбінація яких в різних вузлах електричної схеми може бути різною і буде змінюватися в часі. Тому ефективність того ж самого симетрувального впливу в різних вузлах буде різною і змінюватиметься в залежності від динаміки зазначених параметрів режиму і схеми.

На практиці можуть мати місце ситуації, коли споживач під'єднаний до двох вузлів мережі енергопостачальної організації, які мають деяку електричну віддаленість (такі схеми характерні для систем електропостачання підприємств, які розширювали виробництво і здійснювали реконструкцію своїх електричних мереж). Керування несиметрією в одному з таких вузлів змінює параметри зворотної послідовності в іншому вузлі. У випадку, коли необхідно виконувати керування несиметрією по одному і другому вводу за допомогою СП, реалізуючи відомчий підхід, робота систем прийняття керувального рішення повинна узгоджуватись. В таких випадках керування має здійснюватись за алгоритмом, основна ідея якого така:

1. Визначається в якому із вузлів, де встановлені СП, ΔP_2 є найчутливішими до керувальних рішень із симетрування;
2. Приймається рішення по СП, що під'єднаний до такого вузла, і розраховується режим, який встановиться після реалізації керування;
3. Якщо є технічна можливість для подальшого симетрування режиму, то здійснюється перехід до кроку 1, інакше розрахунки припиняються.

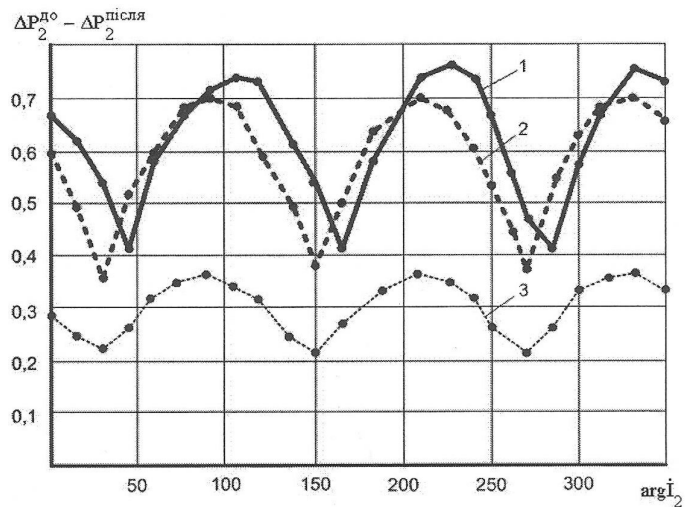


Рис. 3. Залежність чутливості ΔP_2 від $| \dot{I}_2 |$, $\arg \dot{I}_2$ та r_2 :

$$1 — | \dot{I}_2 | = 0,5 \text{ А; } Z_2 = 10 + j7 ;$$

$$2 — | \dot{I}_2 | = 1 \text{ А; } Z_2 = 4 + j7 ; 3 — | \dot{I}_2 | = 0,5 \text{ А; } Z_2 = 4 + j7$$

Висновки

1. В умовах ринкових відносин симетрування електричних режимів в розподільних мережах може виконуватись за системним або відомчим підходами, забезпечуючи вимоги ГОСТ 13109-97 в

першому випадку та мінімальні втрати активної потужності в мережах споживача в другому.

2. У разі оперативного керування несиметрією режиму в розподільній мережі за допомогою СП, які встановлені у вузлах, що мають невелику електричну віддаленість, закони керування можуть синтезуватися, враховуючи чутливість додаткових втрат активної потужності до симетричного впливу СП.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аввакумов В. Г. Симметрирование и компенсация реактивной мощности несимметричных промышленных нагрузок / В. Г. Аввакумов // Промышленная энергетика. — 1967— № 7 — С. 1—5.
2. Владимиров Ю. В. Учет фактора влияния несимметрии нагрузки на потери в электрических сетях от перетоков реактивных мощностей / Ю. В. Владимиров, Т. В. Крамская // Энергетика та електрифікація — 2007 — № 1 — С. 63—67.
3. Терешкевич Л. Б. Втрати активної потужності в системах електропостачання споживачів АПК та мережах живлення, зумовлені несиметрією режимів / Л. Б. Терешкевич, М. Й. Бурбело, В. В. Захаров, М. І. Цибульський // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, Вип. 37 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», — 2005. Том 1, С. 36—43.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Надійшла до редакції 17. 12.07
Рекомендована до друку 12.05.08

Терешкевич Леонід Борисович — доцент, **Захаров Василь Володимирович** — старший викладач.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет