

УДК 621.316.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЕНСУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК НА ДОДАТКОВІ ВТРАТИ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІД НЕСИМЕТРІЇ РЕЖИМУ

Л.Б.Терешкевич¹, канд.техн.наук, Т.М.Червінська², І.О.Бандура³,
^{1,2} – Вінницький національний технічний університет,
 вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна,
³ – Луцький національний технічний університет,
 вул. Львівська, 75, Луцьк, Волинська обл., 43018, Україна.

Проведено дослідження впливу компенсувальних установок як симетричного, так і несиметричного виконання на додаткові втрати активної потужності від несиметрії режиму в мережах енергопостачальних організацій і споживачів електроенергії. Бібл. 3, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: втрати активної потужності, конденсаторна установка, несиметрія напруги, струм зворотної послідовності, струм нульової послідовності.

Постановка задачі дослідження. В системах електропостачання для зниження втрат активної потужності використовуються конденсаторні установки (КУ) на базі батарей статичних конденсаторів як симетричного (з однаковими потужностями на фазу), так і несиметричного та неповнофазного виконання. КУ симетричного виконання дозволяють компенсувати реактивну потужність, а також здійснювати місцеве регулювання напруги. КУ несиметричного та неповнофазного виконання використовуються для симетрування струмів і напруг та одночасно забезпечують компенсацію реактивних навантажень і додавання напруги [1,2].

При під'єднанні КУ будь-якого схемного виконання до несиметричної напруги має місце зміна напруги зворотної послідовності як у вузлі під'єднання, так і у вузлах мережі (особливо тих, що знаходяться поблизу). В результаті змінюються струморозподіл у схемі та додаткові втрати потужності ΔP_2 , які пов'язані із несиметрією режиму. Беручи до уваги, що окремі ділянки електричної мережі можуть знаходитися на балансі різних суб'єктів господарювання, такі зміни ΔP_2 становлять практичний інтерес і все ще залишаються не вивченими.

Мета роботи – дослідження зміни ΔP_2 в окремих вітках та в цілому у схемі в результаті під'єднання КУ будь-якого схемного виконання до вузла мережі з несиметричною напругою.

Вплив на додаткові втрати активної потужності КУ несиметричного та неповнофазного виконання. Дослідження проведено для КУ, які під'єднуються до лінійних напруг. Усі випадки впливу КУ на додаткові втрати ΔP_2 , які необхідно дослідити, зводяться до наступних:

- несиметрія режиму зумовлена однофазними електроприймачами, які під'єднані до мереж споживача;
- те саме, але під'єднання виконано до мереж енергопостачальної організації;
- те саме, як до мереж енергопостачальної організації, так і до мереж споживача.

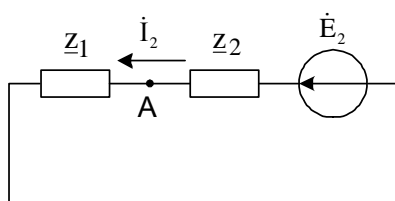


Рис. 1

Для першого випадку аналіз можна провести за заступною схемою для струмів зворотної послідовності, рис. 1, де вузол А – вузол під'єднання КУ.

На цій схемі мережі енергопостачальної організації представлено еквівалентним опором z_1 , а споживач – еквівалентним джерелом напруги \dot{E}_2 та опором z_2 . Значення опорів z_1 та z_2 мають бути такими, щоб струм \dot{I}_2 у заступній схемі був таким самим, як у лінії зв'язку споживача з мережами енергопостачальної

організації, а напруга зворотної послідовності у вузлі А має дорівнювати напрузі у вузлі під'єднання КУ в реальній мережі. Якщо схема розімкнена (саме для такої схеми проведені дослідження), то розрахунок \underline{z}_1 та \underline{z}_2 можна провести, маючи інформацію про параметри мережі за [3].

Ця схема заміщення не відображає того, що у вітках реальної мережі має місце накладання векторів струмів \dot{I}_2 , які генеруються різними джерелами. Якщо в мережах споживача є декілька вузлів з несиметричними навантаженнями, то отримані остаточні висновки стосуються лише ліній зв'язку споживача із енергопостачальною організацією.

Розглянемо варіант, коли в мережах споживача один вузол з несиметричним навантаженням, а в мережах енергопостачальної організації таких навантажень немає. Струм \dot{I}_2 (струм через опори \underline{z}_1 та \underline{z}_2) має напрямок із мереж споживача в мережі енергопостачальної організації.

Напруга зворотної послідовності у вузлі А буде дорівнювати $\dot{U}_{2A} = \sqrt{3}\dot{I}_2 \underline{z}_1$.

Виходячи із принципу симетрування, КУ несиметричного виконання повинна мати такі параметри, щоб при її під'єднанні до вузла А було створено додаткове джерело напруги $\dot{U}_2^{KY} = -\dot{U}_{2A} = -\sqrt{3}\dot{I}_2 \underline{z}_1$. Значенню \dot{U}_2^{KY} відповідає струм, який створюється КУ,

$$\dot{i}_2^{KY} = \frac{\dot{U}_2^{KY} \cdot (\underline{z}_1 + \underline{z}_2)}{\sqrt{3} \cdot \underline{z}_1 \cdot \underline{z}_2} = -\frac{\dot{I}_2 \cdot (\underline{z}_1 + \underline{z}_2)}{\underline{z}_2}.$$

Доля струму \dot{i}_2^{KY} в опорах \underline{z}_1 та \underline{z}_2 $\dot{i}_{2(z_1)}^{KY} = \dot{i}_2^{KY} \frac{\underline{z}_2}{\underline{z}_1 + \underline{z}_2} = -\dot{I}_2$; $\dot{i}_{2(z_2)}^{KY} = \dot{i}_2^{KY} \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_1 + \underline{z}_2} = -\dot{I}_2 \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_2}$.

Таким чином, якщо забезпечити симетрію напруг у вузлі А, то сумарні струми в опорах \underline{z}_1 та \underline{z}_2 будуть мати значення $\dot{I}_{2(z_1)} = \dot{I}_2 + \dot{i}_{2(z_1)}^{KY} = 0$, $\dot{I}_{2(z_2)} = \dot{I}_2 - \dot{i}_{2(z_2)}^{KY} = \dot{I}_2 (1 + \underline{z}_1/\underline{z}_2)$.

Оцінку зміни втрат активної потужності ΔP_2 в мережах споживача (в активній складовій опору \underline{z}_2) можна виконати, проаналізувавши співвідношення

$$\frac{\Delta P_2^{\text{після}}}{\Delta P_2^{\text{до}}} = \frac{3 \left[\dot{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_2} \right) \right]^2 r_2}{3 \dot{I}_2^2 r_2} = \left(1 + \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_2} \right)^2,$$

де $\Delta P_2^{\text{після}}$, $\Delta P_2^{\text{до}}$ – втрати активної потужності, зумовлені несиметрією режиму в опорі r_2 відповідно після і до симетрування напруги у вузлі А.

Оскільки характер опорів \underline{z}_1 та \underline{z}_2 активно-індуктивний, то відношення $\underline{z}_1/\underline{z}_2$ буде мати додатню дійсну частину. В цілому дійсна частина виразу $(1 + \underline{z}_1/\underline{z}_2)$ буде більшою за одиницю і незалежно від знака уявної частини відношення $\underline{z}_1/\underline{z}_2$ вираз $\left| (1 + \underline{z}_1/\underline{z}_2) \right|$ буде більшим за одиницю.

Таким чином, для випадку, який розглядається, при симетруванні напруги за допомогою КУ несиметричного або неповнофазного виконання втрати активної потужності в мережах споживача зростають. При повному симетруванні напруги у вузлі А втрати ΔP_2 в мережах енергопостачальної організації дорівнюють нулю ($\dot{I}_{2(z_1)} = 0$).

Практичний інтерес становить залежність сумарних додаткових втрат активної потужності в складових r_1 та r_2 опорів \underline{z}_1 та \underline{z}_2 – $\Delta P_{2\Sigma}$.

Сумарні активні втрати потужності до та після під'єднання КУ – $\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}} = 3\dot{I}_2^2 (r_1 + r_2)$, $\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}} = 3 \left[\dot{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_2} \right) \right]^2 r_2$ та відносне значення втрат – $\frac{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{після}}}{\Delta P_{2\Sigma}^{\text{до}}} = \frac{|\underline{z}_1 + \underline{z}_2|}{|\underline{z}_2|} \cdot \frac{r_2}{r_1 + r_2}$.

Введемо позначення: $|\underline{z}_1 + \underline{z}_2| = a(r_1 + r_2)$; $|\underline{z}_2| = br_2$; $r_1 + r_2 = cr_2$. Для опорів активно-індуктивного характеру завжди виконуються співвідношення: $a > 1$; $b > 1$; $c > 1$. Враховуючи це, побудуємо залежності $\Delta P_2^{\text{після}} / \Delta P_2^{\text{до}}$ (c) при симетруванні напруги у вузлі А за допомогою КУ при $a = \text{var}$; $b = \text{var}$, рис. 2.

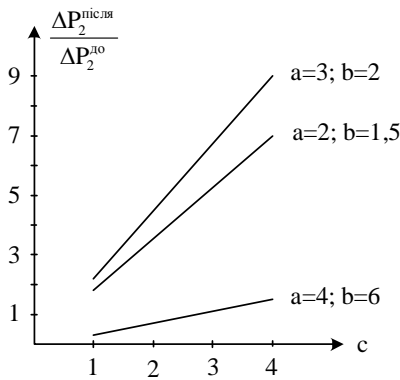


Рис. 2

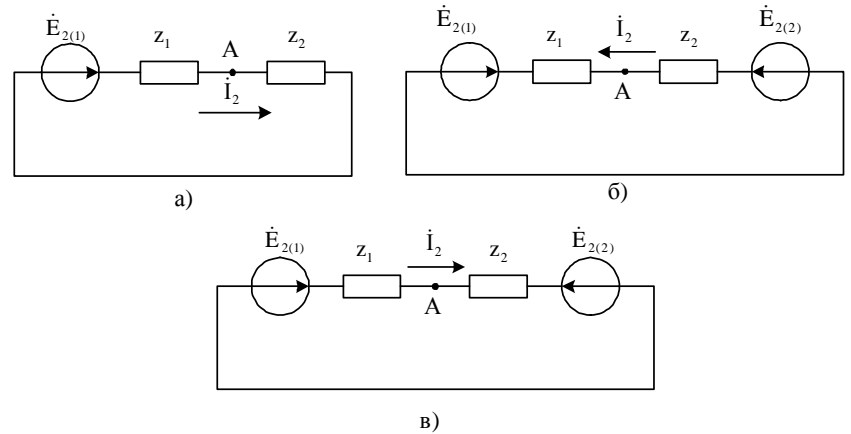


Рис. 3

Аналогічний аналіз проведено також для зазначених вище випадків 2 та 3. Результати подано в табл. 1, а відповідні схеми – на рис. 3.

Таблиця 1

| Випадок | Заступна схема | $\Delta P_2^{\text{після}} / \Delta P_2^{\text{до}}$ в активній складовій опору: | |
|---------|----------------|---|-------------------|
| | | \underline{z}_1 | \underline{z}_2 |
| 1 | Рис. 3, а | >1 | 0 |
| 2 | Рис. 1 | 0 | >1 |
| | Рис. 3, б | <1 | >1 |
| 3 | Рис. 3, в | >1 | <1 |

Результати табл. 1 можна узагальнити: якщо струм \dot{I}_2 має напрям з мережі споживача у мережі енергопостачальної організації, то за результатами симетрування напруги втрати ΔP_2 в елементах зв'язку енергопостачальної організації із споживачем (лінії електропередачі, трансформатори) (далі ділянка мережі 1) зменшуються, а у елементах зв'язку споживача з енергопостачальною організацією (далі ділянка мережі 2) – навпаки, зростають; при зворотному напрямку \dot{I}_2 втрати ΔP_2 на ділянці мережі 1 зростають, а на ділянці мережі 2 зменшуються. Якщо розглядати процес в його динаміці, то напрямок \dot{I}_2 може змінюватись. При цьому $\Delta P_2^{\text{після}} / \Delta P_2^{\text{до}}$ в опорах r_1 та r_2 також будуть змінюватись.

Вплив КУ симетричного виконання на рівні втрат активної потужності. Можна визначити дві складові впливу КУ на втрати активної потужності. Перша вказує на те, що несиметрія напруг збільшує загальну потужність КУ (сумарну по всіх фазах). Ступінь компенсації реактивної потужності збільшується, втрати активної потужності на передачу реактивних навантажень – зменшуються. Друга є наслідком збільшення ступені несиметрії режиму і пов'язаним з цим збільшенням додаткових втрат активної потужності, що зумовлені струмами зворотної та нульової послідовностей. В роботі наводяться результати дослідження саме другої складової і отримані вони для схем з'єднання трикутником і зіркою з нулем.

Один із поширених випадків – коли електроприймачі споживача в переважній більшості симетричного виконання, а несиметрія напруги зумовлена еквівалентними ЕРС зворотної \dot{E}_2 та нульової \dot{E}_0 послідовностей, що знаходяться зі сторони енергопостачальної організації. Схеми заміщення для струмів зворотної та нульової послідовностей, що відповідають такому випадку, наведено на рис. 4, а та 4, б відповідно, де $\underline{z}_2^{(1)} = r_2^{(1)} + jx_2^{(1)}$ та $\underline{z}_0^{(1)} = r_0^{(1)} + jx_0^{(1)}$ – еквівалентний опір струмам зворотної та нульової послідовностей зовнішніх мереж; $\underline{z}_2^{(2)} = r_2^{(2)} + jx_2^{(2)}$ та $\underline{z}_0^{(2)} = r_0^{(2)} + jx_0^{(2)}$ – те саме, розподільних мереж споживача та асинхронного електроприводу. Вузол А – вузол під'єднання БСК, що досліджується.

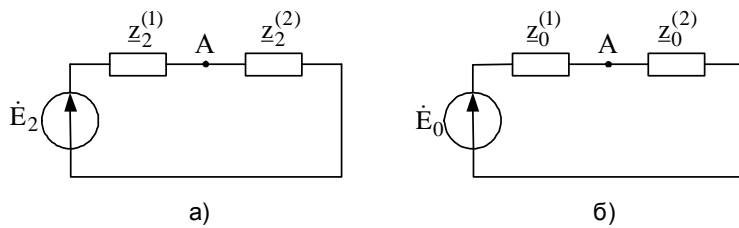


Рис. 4

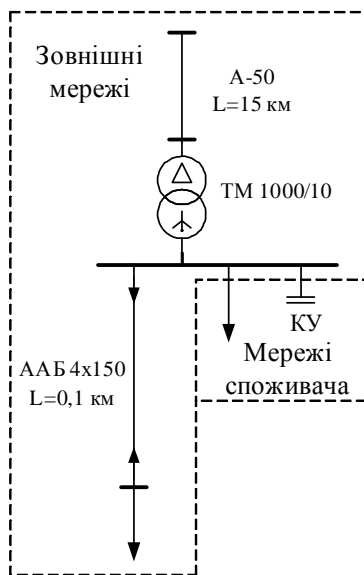


Рис. 5

Виділимо втрати активної потужності в зовнішніх мережах (у опорах $\underline{z}_2^{(1)}$; $\underline{z}_0^{(1)}$) – $\Delta P'_2$; $\Delta P'_0$; у розподільних мережах споживача і в асинхронному електроприводі (у опорах $\underline{z}_2^{(2)}$; $\underline{z}_0^{(2)}$) – $\Delta P''_2$; $\Delta P''_0$.

Втрати активної потужності, зумовлені струмами зворотної послідовності, – $\Delta P'_2 = 3 \left[(E_2 - U_2) / z_2^{(1)} \right]^2 r_2^{(1)}$; $\Delta P''_2 = 3 \left(U_2 / z_2^{(2)} \right)^2 r_2^{(2)}$. Втрати активної потужності, зумовлені струмами нульової послідовності, – $\Delta P'_0 = 12 \left[(E_0 - U_0) / z_0^{(1)} \right]^2 r_0^{(1)}$, а втрати $\Delta P''_0$ для випадку радіальної розподільчої мережі, від якої живиться асинхронний двигун, – $\Delta P''_0 = \sum_{i=1}^n \left(U_0^2 / z_{0i}^2 \right) (12r_{ли} + 3r_{ди})$, де z_{0i} – повний опір струмам нульової послідовності i -го приєднання; $r_{ли}$ – активний опір на фазу лінії i -го приєднання; $r_{ди}$ – активний опір струмам нульової послідовності асинхронного двигуна, що під'єднаний до i -го приєднання.

Кількісну оцінку впливу, який здійснюється при ввімкненні КУ, на значення всіх складових втрат активної потужності проілюструємо результатами чисельного прикладу.

Приклад. В схемі рис. 5 до вузла під'єднано виробничий цех, де встановлені компресорні установки з асинхронним електроприводом 75–200 кВт. Результати розрахунків втрат активної потужності до та після ввімкнення КУ, якщо $k_{2U \text{ до}} = 2\%$ і $k_{0U \text{ після}} = 1,5\%$,

наведено у табл. 2.

Таблиця 2

| Параметри | До ввімкнення КУ | Після ввімкнення КУ |
|--|------------------|---------------------|
| Вхідна реактивна потужність, квар | 560 | 0 |
| Втрати активної потужності, кВт: | | |
| - від передачі реактивних навантажень | 39,1 | 0 |
| - від зворотної послідовності в зовнішній мережі | 1,54 | 1,32 |
| - від зворотної послідовності в розподільних мережах та в асинхронному електроприводі | 0,75 | 0,86 |
| - від нульової послідовності в зовнішній мережі | 7,4 | 5,34 |
| - від нульової послідовності в розподільних мережах та в асинхронному електроприводі | 4,14 | 7,57 |
| - сумарні втрати, зумовлені несиметрією режиму, в зовнішній мережі, кВт | 8,94 | 6,66 |
| - сумарні втрати, зумовлені несиметрією режиму, в розподільних мережах та в асинхронному електроприводі, кВт | 4,89 | 8,43 |
| Разом активні втрати, зумовлені несиметрією режиму, кВт | 13,83 | 15,09 |

Таким чином, при ввімкненні КУ симетричного виконання втрати активної потужності, зумовлені несиметрією режиму, в зовнішній мережі зменшуються (рис. 5), а в розподільних мережах, навпаки – збільшуються.

Причому величина зміни втрат активної потужності від несиметрії напруги порівняно із величиною зменшення втрат активної потужності від передачі реактивної є незначною (3,2%).

Висновки. 1. КУ несиметричного і неповнофазного виконання при їхньому ввімкненні змінюють додаткові втрати потужності. В залежності від напрямку струму зворотної послідовності

вони можуть зростати або знижуватись. Якщо струм I_2 має напрямок із мереж енергопостачальної організації, то в лініях електропередач, трансформаторах, через які мережі споживача під'єднуються до мереж енергопостачальної організації, вони зменшуються, а в тих самих елементах, через які мережі енергопостачальної організації з'єднуються з мережами споживача, вони зростають, і навпаки. Сумарні додаткові втрати в зазначених елементах завжди зростають.

2. Ввімкнення КУ симетричного виконання в цілому збільшує втрати активної потужності, зумовлені несиметрією режиму (в зовнішніх мережах вони зменшуються, а в мережах споживача – навпаки, збільшуються). Зростання додаткових втрат від несиметрії режиму для конкретного прикладу становить невеликий відсоток порівняно із зменшенням активних втрат від передачі реактивних навантажень.

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 172 с.

Zhelezko Yu.S. Measures selection on electric loss enhancement in electric grids. – Moskva: Energoatomizdat, 1989. – 172 p. (Rus.)

2. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.

Kuznetsov V.G., Grigorev A.S., Daniliuk V.B. Decrease of unsymmetry and unsinusoidality voltages in electric grids. – Kyiv: Naukova dumka, 1992. – 240 p. (Rus.)

3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

Ulianov S.A. Electromagnetic transient process. – Moskva: Energiia, 1970. – 520 p. (Rus.)

УДК 621.316.13

Л.Б.Терешкевич¹, канд.техн.наук, Т.Н.Червинская², И.А.Бандура³,

^{1,2} – Винницкий национальный технический университет,

ул. Хмельницкое шоссе, 95, Винница, 21021, Украина,

³ – Луцкий национальный технический университет,

ул. Львовская, 75, Луцк, Волынская обл., 43018, Украина.

Исследование влияния компенсирующих установок на дополнительные потери активной мощности от несимметрии режима

Проведены исследования влияния конденсаторных установок как симметричного, так и несимметричного исполнения на дополнительные потери активной мощности от несимметрии режима в сетях энергоснабжающих организаций и потребителей электроэнергии. Библи. 3, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: потери активной мощности, конденсаторная установка, ток обратной последовательности, ток нулевой последовательности.

L.B.Tereshkevych¹, T.M.Chervinska², I.O.Bandura³,

^{1,2} – Vinnytsia National Technical University,

Khmelnyske shose, 95, Vinnytsia, 21021, Ukraine,

³ – Lutsk National Technical University,

Lvivska st., 75, Lutsk, Volynska region, 43018, Ukraine.

Investigation of capacitors battery influence on additional watt losses of mode asymmetry

Investigation of symmetric as well as asymmetric capacitors battery influence on additional watt losses of mode asymmetry in grids of power supply organizations and power consumers are realized. References 3, tables 2, figures 5.

Key words: watt losses, capacitors battery, asymmetry of the voltage, negative (phase-)sequence current, zero (phase-)sequence current.

Надійшла 11.10.2010

Received 11.10.2010