

М. Й. Бурбело, д-р техн. наук, проф.;
Л. Б. Терешкевич, канд. техн. наук, доц.;
М. В. Кузьменко, асп.;
М. І. Цибульський

ПРИНЦИП СИМЕТРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ ДЛЯ ВУЗЛІВ МЕРЕЖІ, РОЗДІЛЕНИХ НЕВЕЛИКИМ ОПОРОМ

Запропоновано принцип керування несиметрією напруги в двох (або більше) вузлах електричної мережі, розділених невеликим опором, та показано ефективність симетрування за цим принципом.

Вступ

В електричних мережах як енергопостачальних організацій, так і споживачів електроенергії мають місце несиметричні режими іноді такі, що не відповідають вимогам ГОСТ 13109-97 [1, 2]. В таких випадках, а також у випадках, коли несиметрія режиму не забезпечує жорсткіші вимоги технології, здійснюється його симетрування і використовуються для цього конденсаторні установки несиметричного або неповнофазного виконання — симетрувальні пристрої (СП) [3].

В основу відомих наукових напрацювань з питань проектування СП і керування несиметрією режиму в трипровідних електричних мережах покладений принцип симетрування, який полягає в тому, що приймається технічне рішення, виходячи із забезпечення рівності $\dot{I}_2^{\text{СП}} = -\dot{I}_2^{\text{Н}}$, де $\dot{I}_2^{\text{Н}}$ — вектор струму зворотної послідовності, який створюється несиметричним навантаженням; $\dot{I}_2^{\text{СП}}$ — вектор струму зворотної послідовності, який створюється СП [4].

Для реалізації такого принципу використовуються критерії: $|\dot{I}_2^{\text{К}}|(X) = |\dot{I}_2^{\text{СП}} + \dot{I}_2^{\text{Н}}|(X) \rightarrow \min$; $|\dot{U}_2|(X) \rightarrow \min$; $\Delta P_2(X) \rightarrow \min$; $|\dot{N}|(X) \rightarrow \min$, де $\dot{I}_2^{\text{К}}$ — вектор компенсованого струму зворотної послідовності; \dot{U}_2 — вектор напруги зворотної послідовності; ΔP_2 — додаткові втрати активної потужності, зумовлені несиметрією режиму; \dot{N} — комплекс пульсуючої потужності; X — вектор керування.

Такий принцип симетрування враховує ефекти від несиметрії режиму лише в одному вузлі електричної мережі. Але будь-які впливи, що здійснюються на електричні режими в одному вузлі мережі, одночасно позначаються на режими у вузлах інших і особливо у вузлах, розділених невеликим опором. Вплив СП, параметри якого визначені за згаданим принципом симетрування, є оптимальним лише для одного вузла і не є таким вже для системи, наприклад, двох вузлів електричної мережі. Це підтверджується розрахунками, проведеними для двотрансформаторної ТП, яка має характерну для розподільних мереж 10 кВ енергопостачальної організації схему під'єднання до лінії 10 кВ, (рис. 1).

Результати аналізу зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Симетрувальні ефекти, що будуть мати місце у разі ввімкнення СП у вузлі А

Параметр режиму	Вихідний режим	Варіант повного симетрування напруги у вузлі А	Варіант симетрування напруги у вузлі А, за якого відсутня реактивна потужність зворотного напрямку
Q_{AB} , квар	0	0	0
Q_{BC} , квар	0	119	19,4
Q_{CA} , квар	0	117,2	19,1
$Q^{\text{СП}}$, квар	0	236,2	38,5
Q , квар	38,5	-197,7	0
$\dot{U}_{2(\text{A})}$, В	$3,6 e^{j98}$	0	$3,01 e^{j98,14}$
$\dot{U}_{2(\text{B})}$, В	$3,72 e^{j97,35}$	$0,38 e^{j95,2}$	$3,69 e^{j97,73}$

В табл. 1. використані позначення:

Q_{AB} ; Q_{BC} ; Q_{CA} — реактивна потужність СП, що під'єднана до лінійних напруг U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} ;
 $Q^{СП}$ — потужність СП; Q — реактивна потужність через трансформатор Т1; $\dot{U}_{2(A)}$; $\dot{U}_{2(B)}$ — на-
 пруга зворотної послідовності у вузлах А та Б.

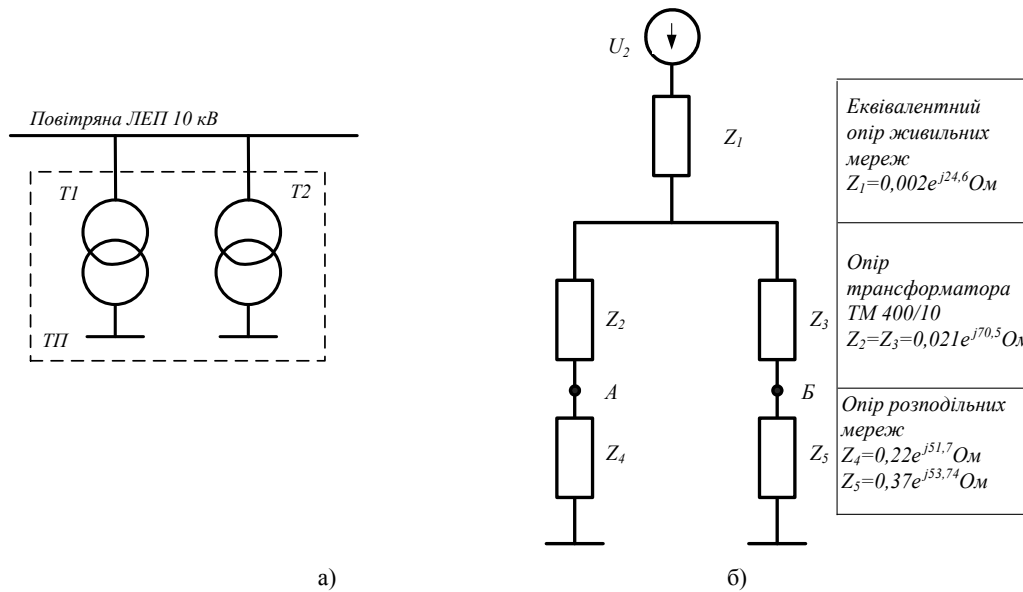


Рис. 1. : а— спрощена схема під'єднання двотрансформаторної ТП до лінії 10 кВ;
 б — заступна схема для струмів зворотної послідовності

Як видно:

— варіант повного симетрування напруги є технічно не допустимим, тому що для нього характерний зворотний потік реактивної потужності в напрямку від споживача в мережі енергопостачальної організації;

— реалізація рішення про симетрування напруги у вузлі А змінює напругу зворотної послідовності у вузлі Б і, як наслідок, змінюються вихідні умови для прийняття симетрувального рішення по вузлу Б;

— для отримання максимального симетрувального ефекту необхідно встановити СП як у вузлі А, так і у вузлі Б;

— керувальні рішення, які визначаються для таких СП, мають погоджуватись (необхідно виконувати симетрування за принципом, який передбачає погодження керувальних рішень для СП у вузлах А та Б).

Метою роботи є розробка принципу симетрування напруги для вузлів електричної мережі, розділених невеликим опором, за яким можна здійснювати ефективне керування електричним режимом, погоджуючи керувальні рішення СП.

Дослідження чутливості додаткових втрат активної потужності під час симетрування напруги в електричній мережі

Згадані вище критерії, які реалізують відомий принцип симетрування, дають локальну характеристику стану певної вітки або вузла мережі. Інтегральні властивості, які оцінюють стан, наприклад, живильних або розподільних мереж в цілому, мають сумарні додаткові втрати активної потужності, зумовлені несиметрією режиму — ΔP_2 в активних складових опорів Z_1 в першому випадку або в опорах Z_4 та Z_5 (див. рис. 1) — в другому.

Ступінь впливу того або іншого технічного рішення на несиметрію режиму можна оцінювати за чутливістю додаткових втрат активної потужності. Під чутливістю втрат активної потужності у симетруванні напруг будемо розуміти відносне зниження ΔP_2 у разі ввімкнення симетрувального елемента

одиночної потужності $\left(\frac{\Delta P_2^{до}}{\Delta P_2^{після}} \right)$, де $\Delta P_2^{до}$, $\Delta P_2^{після}$ — додаткові втрати активної потужності відпові-

дно «до» та «після» ввімкнення симетрувального елемента СП). Ввімкненню симетрувального елемента тієї ж потужності може відповідати різна ступінь чутливості ΔP_2 .

Симетрувальний ефект залежить від того, до якої напруги під'єднується той або інший симетрувальний елемент. Тому у дослідженні чутливості оцінювалася відносна зміна ΔP_2 за умови ввімкнення симетрувального елемента, який за цих умов забезпечує максимальний симетрувальний ефект.

Проведені дослідження чутливості ΔP_2 , які обмежувались лише розподільними мережами, під'єднаними до одного із вузлів, показали, що чутливість ΔP_2 під час симетрування напруг залежить:

- від еквівалентних опорів живильної та розподільчої мереж;
- від параметрів симетрувального елемента;
- від аргументу U_2 у вузлі до під'єднання СП (залежність зображена на рис. 2).

Комбінація цих параметрів в різних вузлах мережі може бути різною і змінюватись у часі. Тому ефективність того самого СП в різних вузлах схеми буде різною і змінюватиметься в залежності від динаміки зазначених параметрів режиму і схеми.

Нехай в мережі є два вузли, розділені невеликим опором та в яких необхідно виконати симетрування напруги і де встановлені СП з дискретними секціями керування. За таких обставин для отримання найефективніших результатів рішення, що приймаються із симетрування напруг в одному та другому вузлах, мають бути погодженими, а саме симетрування виконуватись за принципом, суть якого можна сформулювати, проаналізувавши векторні діаграми для випадку під'єднання СП у вузлі А (рис. 3), де $I_{2A}^{до}$; $I_{2B}^{до}$; $I_{2A}^{після}$; $I_{2B}^{після}$ — струми «до» та «після» ввімкнення СП в вітці схеми, яка має безпосередній зв'язок із вузлом, де встановлено СП (вітка А), та у віддаленій вітці (вітка Б); $I_{2A}^{СП}$; $I_{2B}^{СП}$ — долі струму зворотної послідовності, що створюється СП у вітках, які під'єднані до вузлів А та Б.

Задача керування зводиться до того, щоб підібрати такі параметри СП (комбінацію секцій, яка має бути ввімкнутою), які забезпечать мінімум для суми $(I_{2A}^{після})^2 r_4 + (I_{2B}^{після})^2 r_5$, де r_4 та r_5 — активні складові опорів струмам зворотної послідовності розподільних мереж, під'єднаних відповідно до вузлів А та В. Мінімум зазначеної суми буде відповідати мінімуму сумарних додаткових втрат ΔP_2 в розподільних мережах.

Керування несиметрією напруги в двох взаємозалежних вузлах електричної мережі можна викону-

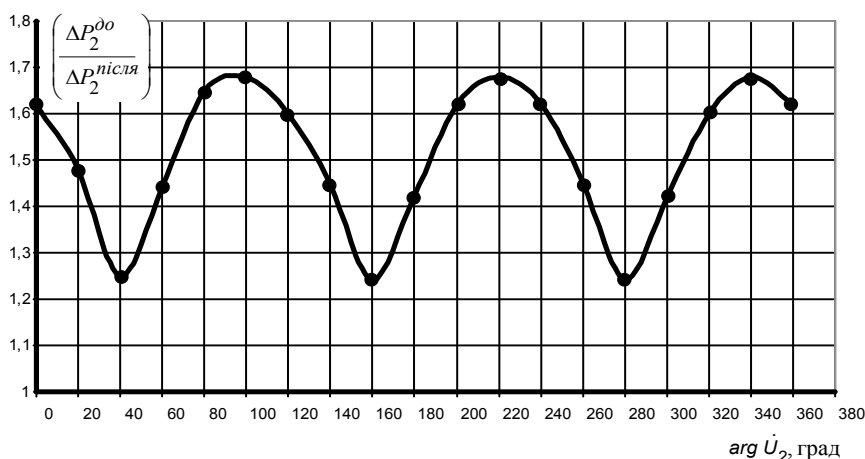


Рис. 2. Залежність відносної зміни $\left(\frac{\Delta P_2^{до}}{\Delta P_2^{після}}\right)$ від $\arg U_2$

вання найефективніших результатів рішення, що приймаються із симетрування напруг в одному та другому вузлах, мають бути погодженими, а саме симетрування виконуватись за принципом, суть якого можна сформулювати, проаналізувавши векторні діаграми для випадку під'єднання СП у вузлі А (рис. 3), де $I_{2A}^{до}$; $I_{2B}^{до}$; $I_{2A}^{після}$; $I_{2B}^{після}$ — струми «до» та «після» ввімкнення СП в вітці схеми,

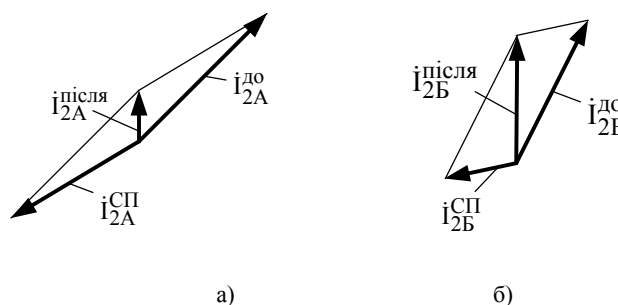


Рис. 3. Векторні діаграми струмів зворотної послідовності «до» та «після» під'єднання СП у вузлі А:

- а) векторна діаграма струмів у еквівалентному опорі вітки схеми розподільної мережі, яка має безпосередній зв'язок із вузлом, де під'єднаний СП;
- б) векторна діаграма струмів, у еквівалентному опорі віддаленої вітки схеми

вати за принципом, який полягає в такому. Для ввімкнення вибирається така комбінація секцій СП, встановлених у вузлах А та Б, щоб ΔP_2 в розподільчих мережах (в активних складових опорів Z_4 та Z_5 , див. рис. 1) були мінімальними. Мінімум для ΔP_2 в розподільчих мережах не буде збігатися з мінімумами струмів зворотної послідовності у відповідних опорах заступної схеми.

Порівняльні результати керування, отримані за відомим та за запропонованими принципами симетрування

Ефективність та доцільність керування несиметрією режиму за розробленим принципом симетрування для випадку двох вузлів електричної мережі, розділених невеликим опором, можна обґрунтувати, розглянувши результати, отримані для двох випадків.

Випадок 1. Для реальної схеми одного із РЕМів ВАТ «АК Вінницяобленерго» та параметрів режиму в такій схемі за відомим принципом симетрування розраховано вектор керування та режим, що буде мати місце в результаті його реалізації [5]. Розрахунки проведені в припущенні, що у вузлах А та Б встановлені СП, які мають такі параметри секцій керування (табл. 2).

Таблиця 2

Технічні характеристики СП, під'єднаних до вузлів А та Б

№ секції	Напруга, до якої під'єднується	Потужність, квар	№ секції	Напруга, до якої під'єднується	Потужність, квар
1	U_{AB}	50	7	U_{BC}	20
2	U_{AB}	30	8	U_{BC}	10
3	U_{AB}	20	9	U_{CA}	50
4	U_{AB}	10	10	U_{CA}	30
5	U_{BC}	50	11	U_{CA}	20
6	U_{BC}	30	12	U_{CA}	10

Випадок 2. Те саме, але розрахунок керування виконувався за розробленим принципом.

Отримані результати, які наведені в табл. 3, свідчать, що для випадку керування несиметрією напруги за розробленим принципом можна ефективніше виконувати симетрування електричного режиму.

В табл. 3 «-» позначено вимкнений стан відповідної секції СП, а «+» — ввімкнений.

Розроблений принцип симетрування можна поширити і на випадок, коли вузлів електричної мережі, розділених невеликим опором, більше двох.

Таблиця 3

Порівняльні результати керування несиметрією режиму за відомим принципом симетрування та за розробленим

Вузли	Стан секцій СП, встановленого у вузлі												Напруга U_2 , В		Струм I_2 , А		Сумарні ΔP_2 , Вт	
													Вузол А	Вузол Б	У вітті Z_4	У вітті Z_5		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
Вихідний режим:																		
вузол А	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,6	3,41	19,95	26,46	161,4
вузол Б	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Результати, отримані для випадку 1:																		
вузол А	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,32	2,95	12,94	22,9	92,8
вузол Б	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-					
Результати, отримані для випадку 2:																		
вузол А	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,29	2,43	12,77	18,23	71,5
вузол Б	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					

Висновок

Керування несиметрією напруги в двох (або більше) вузлах електричної мережі, розділених великим опором, доцільно здійснювати за розробленим принципом, який полягає в тому, щоб знайти комбінацію секцій СП для ввімкнення, забезпечивши мінімум сумарних додаткових втрат активної потужності від несиметрії режиму в розподільчих мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97. Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.00. — К. : Госстандарт Украины, 1999. — 31 с.
2. Качество электрической энергии в муниципальных сетях Московской области / [И. И. Карташев, И. С. Пономаренко, В. Н. Тульский и др.] // Промышленная энергетика. — 2002. — № 8. — С. 42—47.
3. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Боженко. — К. : Техніка, 1981. — 160 с.
4. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. — К. : Наукова думка, 1992. — 240 с. — ISBN №5-12-002018-6.
5. Терешкевич Л. Б. Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання / Л. Б. Терешкевич, М. І. Цибульський // Технічна електродинаміка. — 2006. — № 2. — С. 64—67.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергоменеджменту

Стаття надійшла до редакції 1.03.11

Рекомендована до друку 15.03.11

Бурбело Михайло Йосипович — завідувач кафедри, **Терешкевич Леонід Борисович** — доцент, **Кузьменко Марина Василівна** — аспірант, **Цибульський Максим Іванович** — асистент.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергоменеджменту, Вінницький національний технічний університет, Вінниця