

УДК 621.31

О.Г. Самелюк, магістр

Інститут енергозбереження та енергоменеджмента НТУУ «КПІ»

Кафедра електропостачання, ІЕЕ, НТУУ «КПІ», м. Київ, 03056, Україна.

Аналіз впливу несиметрії на споживання електроенергії в системах з розосередженою генерацією

Анотація

Проведено аналіз впливу несиметрії генератора і навантаження на споживання електричної енергії. Оцінено нерівномірність споживання електроенергії в трифазній системі з виділенням 7 випадків зміни характеристик навантаження. Отримано залежності, які дозволяють оцінити вплив несиметрії на енергоспоживання.

Проведен анализ влияния несимметрии генератора и нагрузки на потребление электрической энергии. Оценено неравномерность потребления электроэнергии в трехфазной системе с выделением 7 случаев изменения характеристик нагрузки. Получены зависимости, позволяющие оценить влияние несимметрии на энергопотребление.

The analysis of the influence of asymmetry of the generator and load power consumption. By uneven energy consumption in three-phase system with the release of 7 cases of characteristics of the load. Dependencies which to assess the impact of asymmetry in power consumption.

Вступ

Проблема якості електроенергії проявляється у вигляді виникнення нестандартної напруги, струму або частоти, що призводить до несправності або неправильної роботи обладнання кінцевого користувача. Інженерні розподільчі мережі, чутливі промислові навантаження і критичні комерційні операції страждають від різних типів відключень та перерв у роботі служб, що призводить до значних фінансових втрат. Різноманітність систем силової електроніки, можливість використання високоефективних пристроїв, розумних принципів використання енергії, вважають невід'ємною частиною відновлюваних, природних і ефективних енергетичних систем. З перебудовою енергосистем і зі зміщенням тенденцій щодо розподіленої і розосередженої генерації, питання якості електроенергії набуває нових масштабів.

Однією з найбільш поширених проблем якості електроенергії сьогодні є провали / зростання напруги. Вона часто встановлюється за двома параметрами, глибина та тривалість. Величина провалів / зростання напруги варіюється від 10% до 90% від номінальної напруги і тривалість – від 30 сек. до 1 хв. У трифазній системі провали напруги є природою трифазного явища, яке впливає на напругу фаза-земля і фаза-фаза. Провали напруги обумовлені внаслідок неправильної роботи мереж системи, помилками на об'єкті замовника або значним збільшення струму навантаження, наприклад, початок роботи двигуна або трансформатора. Типовими несправностями є однофазне або багатofазне коротке замикання, що призводить до великих струмів. Великий струм призводить до падіння напруги по мережі опору. На місці пошкодження напруга пошкодженої фази близька до нуля, тоді як непошкодженої фази залишається більш-менш незмінною.

Стрибки напруги є однією з найбільш частіших проблем якості електроенергії. В промисловості стрибки напруги зустрічаються найчастіше і викликають серйозні проблеми

та економічні втрати. Мережі часто зосереджуються на порушеннях обладнання кінцевого користувача як основної проблеми якості електроенергії.

Гармонійні струми в системі розподілу можуть спричинити гармонійні спотворення, низький коефіцієнт потужності і додаткові втрати [4], а також нагрівання електрообладнання. Це також може привести до вібрації та шумів в машинах і несправності чутливого обладнання.

Реструктуризація електроенергетики для інтеграції відновлюваних джерел енергії представляє нові можливості для електроенергетичних систем і енергосистеми в цілому. Нестійкі джерела енергії особливо вимагають стратегії зменшення наслідків, щоб підтримувати постійну потужність в електричній мережі.

Відомо, що втрати потужності мають мінімальне значення в симетричних режимах при незмінному в часі навантаженні. Несиметрія і нерівномірність навантаження в часі призводять до збільшення втрат. Окрім симетричного режиму незмінного навантаження можливий режим незмінного в часі несиметричного навантаження; змінного в часі симетричного навантаження; несиметричний режим змінного навантаження. Зрівнюючи втрати в цих режимах з втратами в базовому режимі, можна оцінити вплив на них різних факторів. Для такої оцінки необхідно отримати закономірність зміни в часі всіх симетричних складових струмів і еквівалентувати їх такими значеннями, які за вибраний інтервал часу дасть ті ж значення втрат енергії, що і змінні в часі [2].

Існують різні способи вирішення проблеми підвищення якості передачі та розподілу електроенергії. Серед них, D-статком є одним з найбільш ефективних пристроїв. Нова схема управління на базі ШІМ була застосована для контролю електронних ламп в D-статкомі. D-статком має додаткові можливості для витримування реактивного струму при низькій напрузі, і може розвиватися як підтримка напруги і частоти заміною конденсаторів з батареями для зберігання енергії для підвищення якості електроенергії при провалах / зростаннях напруги, гармонійних спотвореннях і низькому коефіцієнті потужності в розподільчих системах [3].

Несиметрія напруг і струмів трифазної системи

Несиметрія напруг і струмів трифазної системи є одним з найважливіших показників якості електроенергії. Причиною появи несиметрії напруг і струмів є різні несиметричні режими системи електропостачання. Широке застосування різного виду однофазних електротермічних установок значної потужності (до 10 000 кВт) і трифазних дугових печей призвело до значного збільшення частки несиметричних навантажень на промислових підприємствах. Підключення таких потужних несиметричних одно- і трифазних навантажень до трифазних мереж викликає в системах електропостачання тривалий несиметричний режим, який характеризується несиметрією напруг і струмів [2].

В системах електропостачання розрізняють короточасні (аварійні) і тривалі (експлуатаційні) несиметричні режими. Короточасні несиметричні режими зазвичай пов'язані з різними аварійними процесами, як, наприклад, несиметричні КЗ, обриви одного або двох проводів повітряної лінії з замиканням на землю і т. д. Тривалі несиметричні режими зазвичай обумовлені несиметрією елементів електричної мережі або підключенням до системи електропостачання несиметричних (одно-, двох- або трифазних) навантажень.

Несиметрію напруг і струмів, обумовлена несиметрією елементів електричної мережі, називають поздовжньою. Прикладом поздовжньої несиметрії є неповнофазні режими повітряних ліній і несиметрія параметрів фаз окремих елементів мережі. Поздовжня несиметрія характерна також для спеціальних систем електропередачі: два провідники - земля (ДПЗ), два провідники - рейки (ДПР), два провідники-труба (ДПТ) і т. д.

Несиметрію напруг і струмів, викликану підключенням до мережі багатозначних і

однофазних несиметричних навантажень, називають поперечною. Поперечна несиметрія виникає також при нерівності активних і реактивних опорів окремих фаз деяких приймачів електроенергії (дугові електропечі).

Для аналізу та розрахунків несиметричних режимів у трифазних ланцюгах в основному застосовують метод симетричних складових, заснований на поданні будь-якої трифазної несиметричної системи величин (струмів, напруг, магнітних потоків) у вигляді суми в загальному випадку трьох симетричних систем величин. Ці симетричні системи, які в сукупності утворюють несиметричну систему величин, називають її симетричними складовими. Симетричні складові відрізняються одна від одної порядком проходження фаз, тобто порядком, в якому фазні величини проходять через максимум, і називаються системами прямої, оберненої і нульової послідовності [1].

Несиметрія міжфазних напруг викликається наявністю складових зворотної послідовності, а несиметрія фазних - ще й наявністю складових нульової послідовності.

В якості міри несиметрії напруг використовують коефіцієнт несиметрії напруг $k_{НСМ,U}$ (в ГОСТ 13109-67* коефіцієнт несиметрії позначений ϵ_2), який визначають як відношення напруги зворотної послідовності основної частоти до номінальної лінійної напруги, %:

$$k_{НСМ,U} = \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100\%.$$

Коефіцієнт несиметрії струмів $k_{НСМ,I}$ визначають аналогічно:

$$k_{НСМ,I} = \frac{I_2}{I_{ном}} \cdot 100\%.$$

Аналіз нерівномірності споживання в трифазних системах

Проаналізуємо нерівномірне споживання енергії в трифазній системі. Розглянемо різні режими несиметрії напруги та струму на навантаженні, які можуть бути обумовлені режимами роботи системи [4].

Виділимо трифазну систему генератор–навантаження. Покладемо, що напруга генератора в системі є симетричною, а навантаження – несиметричне.

Система характеризується діючими значеннями струму I_A, I_B, I_C . Розглянемо різні зміни діючих значень струму через навантаження по фазах, тобто наявність різних форм несиметрії.

Струм фази А будемо вважати незмінною $I_A = const$. Виділимо для струму I_A його активну I_{Aa} і реактивну I_{Ap} складові, $I_A^2 = I_{Aa}^2 + I_{Ap}^2$.

Розглянемо випадки.

Випадок 1

Активний струм фази А незмінний $I_{Aa} = const$.

Відношення реактивного струму до активного по фазах рівні між собою

$$\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}} = \frac{I_{Bp}}{I_{Ba}} = \frac{I_{Cp}}{I_{Ca}} = const.$$

$$3I_{Aa}^2 = I_{Aa}^2 + I_{Ba}^2 + I_{Ca}^2;$$

$$3I_{Ap}^2 = I_{Ap}^2 + I_{Bp}^2 + I_{Cp}^2.$$

Інші струми змінюються довільним чином, однак відношення між струмами однакове.

Випадок 2

Активні струми по фазах рівні між собою:

$$I_{Aa} = I_{Ba} = I_{Ca} = const;$$

Відношення реактивного струму I_{Ap} до активного струму I_{Aa} по фазі А постійне

$$\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}} = const;$$

$$3I_{Aa}^2 = I_{Aa}^2 + I_{Ba}^2 + I_{Ca}^2;$$

$$3I_{Ap}^2 = I_{Ap}^2 + I_{Bp}^2 + I_{Cp}^2.$$

Випадок 3

Реактивні струми по фазах постійні $I_{Ap} = I_{Bp} = I_{Cp} = const$;

Відношення реактивного струму I_{Ap} до активного струму I_{Aa} по фазі А постійне

$$\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}} = const;$$

$$I_{Bp} - var; I_{Cp} - var.$$

$$3I_{Aa}^2 = I_{Aa}^2 + I_{Ba}^2 + I_{Ca}^2;$$

$$3I_{Ap}^2 = I_{Ap}^2 + I_{Bp}^2 + I_{Cp}^2.$$

Випадок 4

Активний струм фази А є постійним $I_{Aa} = const$, а відношення реактивного струму I_{Ap} до активного I_{Aa} буде рівним коефіцієнту k . При цьому відношення реактивного струму I_{Bp} до активного I_{Ba} по фазі В буде рівним добутку коефіцієнтів пропорційності $k \cdot \alpha$.

$$\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}} = k;$$

$$\frac{I_{Bp}}{I_{Ba}} = k \cdot \alpha,$$

де k, α – коефіцієнти пропорційності між реактивними і активними струмами фази А та В відповідно.

$$3I_{Aa}^2 = I_{Aa}^2 + I_{Ba}^2 + I_{Ca}^2;$$

$$3I_{Ap}^2 = I_{Ap}^2 + I_{Bp}^2 + I_{Cp}^2.$$

Випадок 5

Активний струм фази А є постійний $I_{Aa} = const$, $\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}} = const$.

Відношення активного струму фази В I_{Ba} до активного струму фази А I_{Aa} рівне коефіцієнту пропорційності k_I ,

$$\frac{I_{Ba}}{I_{Aa}} = k_I,$$

де k_I – коефіцієнт пропорційності між струмами.

$$3I_{Aa}^2 = I_{Aa}^2 + I_{Ba}^2 + I_{Ca}^2;$$

$$3I_{Ap}^2 = I_{Ap}^2 + I_{Bp}^2 + I_{Cp}^2.$$

Випадок 6

Реактивний струм фази А є постійним $I_{Ap} = const$, $\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}} = const$.

Відношення реактивного струму фази В I_{Bp} до реактивного струму фази А I_{Ap} рівне коефіцієнту пропорційності k_I , $\frac{I_{Bp}}{I_{Ap}} = k_I$,

де k_I – коефіцієнт пропорційності між струмами.

$$3I_{Aa}^2 = I_{Aa}^2 + I_{Ba}^2 + I_{Ca}^2;$$

$$3I_{Ap}^2 = I_{Ap}^2 + I_{Bp}^2 + I_{Cp}^2.$$

Випадок 7

Струми по фазах А та В незмінні.

$$I_A = I_B = const;$$

$$I_{Aa} = I_{Ba} = const;$$

$$I_{Ap} = I_{Bp} = const;$$

$$\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}} = const.$$

Активний I_{Ca} та реактивний I_{Cp} струми по фазі С змінюється довільним чином.

$$I_{Ca} - var; I_{Cp} - var.$$

Різні варіанти несиметрії представлено в таблиці 1, в якій зведено умови, графіки та фізична суть аналізу. Більш детально розкриємо суть спотворення форм струму і напруги. Для різних випадків несиметрії побудуємо і оцінимо графіки.

Розглянемо випадок 1.

Вихідні дані:

Активний струм фази А вважаємо незмінним $I_{Aa} = const$;

Відношення реактивного струму до активного в кожній фазі рівне між собою

$$\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}} = \frac{I_{Bp}}{I_{Ba}} = \frac{I_{Cp}}{I_{Ca}} = const.$$

Відношення між струмами приймемо в діапазоні від 0,5 до 0,9 з кроком 0,1.

$$3I_{Aa}^2 = I_{Aa}^2 + I_{Ba}^2 + I_{Ca}^2;$$

$$3I_{Ap}^2 = I_{Ap}^2 + I_{Bp}^2 + I_{Cp}^2.$$

Для випадку 1.1 задамо активний струм фази А $I_{Aa} = 100$, а відношення реактивного струму до активного $\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}} = 0,5$, тобто реактивний струм фази А $I_{Ap} = 50$;

$$3I_{Aa}^2 = 30000; 3I_{Ap}^2 = 7500.$$

Інші струми змінюються довільним чином, однак відношення між струмами однакове. Розрахунок величин представимо в таблиці 1.

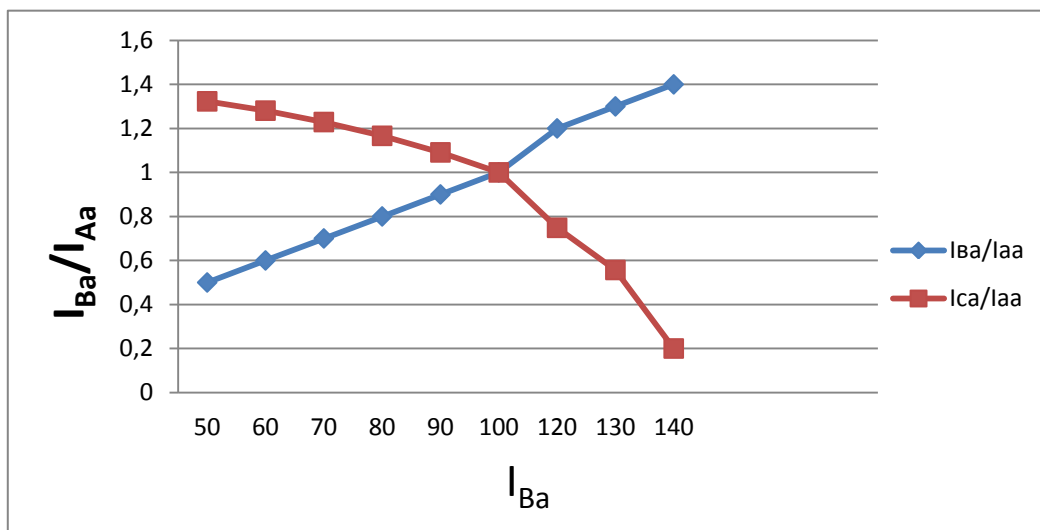
Таблиця 1

Величина	Зміна величини								
$I_{Ba}, A \uparrow$	50	60	70	80	90	100	120	130	140
I_{Bp}, A	25	30	35	40	45	50	60	65	70
I_{Bp}/I_{Ba}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
I_{Ba}^2, A^2	2500	3600	4900	6400	8100	10000	14400	16900	19600
I_{Bp}^2, A^2	625	900	1225	1600	2025	2500	3600	4225	4900
I_B^2, A^2	3125	4500	6125	8000	10125	12500	18000	21125	24500
I_B^2/I_A^2	0,25	0,36	0,49	0,64	0,81	1	1,44	1,69	1,96
I_{Ba}/I_{Aa}	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4
I_{Bp}/I_{Ap}	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,4
$I_{Ca}, A \downarrow$	132,2876	128,0625	122,8821	116,619	109,0871	100	74,83315	55,67764	20
I_{Cp}, A	66,14378	64,03124	61,44103	58,30952	54,54356	50	37,41657	27,83882	10
I_{Ca}^2, A^2	17500	16400	15100	13600	11900	10000	5600	3100	400
I_{Cp}^2, A^2	4375	4100	3775	3400	2975	2500	1400	775	100
I_C^2, A^2	21875	20500	18875	17000	14875	12500	7000	3875	500
I_{Cp}/I_{Ca}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
I_{Ca}/I_{Aa}	1,322876	1,280625	1,228821	1,16619	1,090871	1	0,748331	0,556776	0,2
I_{Cp}/I_{Ap}	1,322876	1,280625	1,228821	1,16619	1,090871	1	0,748331	0,556776	0,2
I_C^2/I_A^2	1,75	1,64	1,51	1,36	1,19	1	0,56	0,31	0,04

За отриманими даними побудуємо такі залежності:

$\frac{I_{Ba}}{I_{Aa}}(I_{Ba}); \frac{I_{Ca}}{I_{Aa}}(I_{Ba}); \frac{I_B^2}{I_A^2}(I_B^2); \frac{I_C^2}{I_A^2}(I_B^2)$, які наведені на рис. 1(а, б)

а)



б)

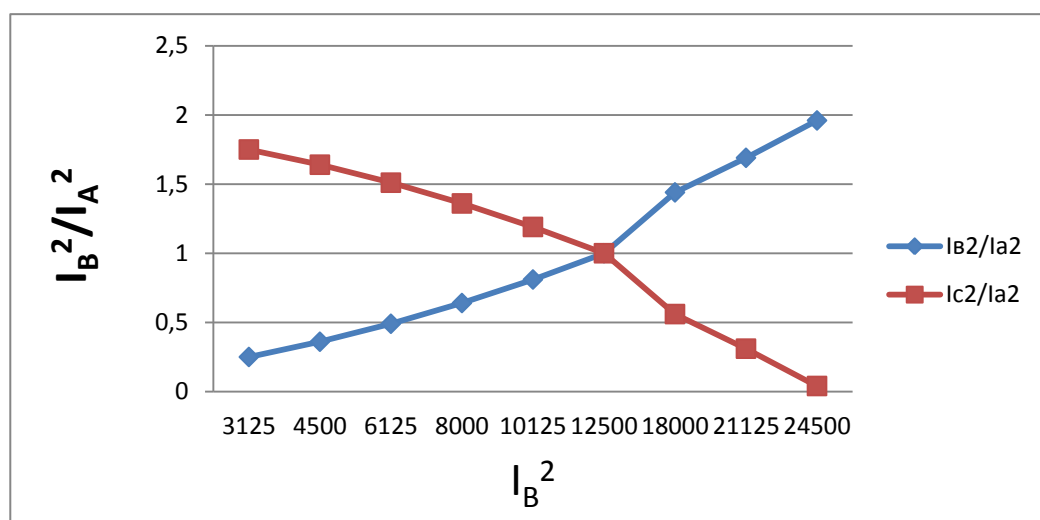


Рис.1. Графічні залежності струмів для першого варіанту випадку 1.

З отриманих результатів і побудованих графіків бачимо, що графік залежностей $\frac{I_{Ba}}{I_{Aa}}(I_{Ba})$ і $\frac{I_{Ca}}{I_{Aa}}(I_{Ba})$ при всіх випадках ведуть себе однаково. $\frac{I_{Ba}}{I_{Aa}}(I_{Ba})$ монотонно зростає,

а $\frac{I_{Ca}}{I_{Aa}}(I_{Ba})$ спадає, так як зростання струму I_B призводить до зменшення струму I_C , при

даних вибраних умовах. Графіки залежностей $\frac{I_B^2}{I_A^2}(I_B^2)$ і $\frac{I_C^2}{I_A^2}(I_B^2)$ теж ведуть себе однаково

для всіх випадків, однак зі зростанням відношення $\frac{I_{Ap}}{I_{Aa}}$ від 0,5 до 0,9 зростає діапазон

значень I_B^2 . При 0,5 діапазон для I_B^2 становить 3125 ... 24500, а при 0,9 – 4525 ... 35476.

Висновок

В роботі було проведено дослідження впливу несиметрії генераторів та навантажень на споживання електроенергії. Проаналізовано нерівномірне споживання енергії в трифазній системі з виділенням 7 різних випадків режимів несиметрії напруги та струму на навантаженні, які можуть бути обумовлені режимами роботи системи. Отримали нелінійні залежності струмів, із зростанням струму фази В спостерігається спадання струму фази С при постійному струмі фази А.

Перелік використаних джерел

1. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. – М: Энергоатомиздат, 1985. – 112с.
2. Баланс энергии установившихся режимов цепей несинусоидального тока и напряжения // В.Е. Тонкаль, В.Я. Жуйков, С.П. Денисюк и др. // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1987. – № 7. – С. 71–74.
3. Sai Kiran Kumar.Sivakoti, Y.Naveen Kumar, D.Archana / International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) - Power Quality Improvement In Distribution System Using D-Statcom In Transmission Lines
4. Денисюк С.П., Самелюк О.Г. Особливості аналізу нерівномірності енергоспоживання в системах енергопостачання // Збірник праць науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» - 2010. - С. 50 - 57.