

В. Г. Сиченко, д-р техн.наук

(Україна, м. Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак. В.Лазаряна)

ЯКІСТЬ НАПРУГИ НА ПРИЄДНАННЯХ ЗМІННОГО СТРУМУ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Якість електроенергії є істотним чинником, що впливає на ефективність режимів енергосистеми і споживачів. Проблема забезпечення ЯЕ в електричних мережах загального і спеціального призначення набула в останнє десятиліття особливої актуальності. Це викликано широким впровадженням нових прогресивних технологічних процесів і систем і, як наслідок, безперервним ростом числа і потужності нелінійних, несиметричних і швидкозмінних споживачів електроенергії, засобів цифрової техніки, а також відповідними режимними змінами потокорозподілу в електричних мережах.

Нестационарні енергообмінні процеси, які відбуваються в нелінійних колах СТЕ викликають цілу низку негативних явищ та призводять до погіршення якості електричної енергії. Безперервна зміна навантаження, характерна для тягових мереж, викликає зміну рівня напруги, несиметрію і несинусоїдальність напруги. Оскільки всі ці відхилення якості електроенергії викликаються падіннями напруги в елементах електропостачання, то вони залежить не тільки від значення навантаження, але і від параметрів системи. Значимо, що режим напруги в первинній мережі тягових підстанцій електрифікованих залізниць є визначальним фактором в оцінці електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги, в тому числі і постійного струму.

Наявність потужних нелінійних навантажень у системі тягового електропостачання постійного струму негативно впливає на якість електричної енергії як в лініях зовнішнього електропостачання, так і в тяговій мережі, що, в свою чергу, призводить до додаткових втрат електричної енергії та зниження терміну експлуатації електричних апаратів. Розвиток швидкісного руху та транспортних коридорів, впровадження сучасних технологій та обладнання, в тому числі нових типів електрорухомого складу, призводить до збільшення споживання електричної енергії, а, значить, і до збільшення споживання реактивної енергії, збільшення втрат активної енергії та погіршення гармонійного складу струмів і напруг, як на стороні змінного, так і постійного струму.

У зв'язку з вищевикладеним проблема якості електричної енергії в системі тягового електропостачання вимагає розв'язку низки завдань, серед яких можна виділити і необхідність дослідження якості електричної енергії в точці загального приєднання при різних режимах функціонування навантаження в системі тягового електропостачання.

Мета роботи

Аналіз якості електричної енергії на приєднаннях змінного струму тягової підстанції постійного струму для оцінки впливу впровадження швидкісного руху на режим напруги в живлячій мережі.

Аналіз показників якості напруги на шинах 110 кВ

Основною властивістю якості напруги є її рівень, а характер зміни визначається усталеним відхиленням напруги прямої послідовності основної частоти. З Рис. 1 видно, що на деяких досліджуваних тягових підстанціях (поз. 1, 2) усталене відхилення напруги перевищує і нормально і гранично допустимі значення (н.д.з., г.д.з.), які встановлюються рівними $\pm 5\%$ та $\pm 10\%$ незалежно від рівня напруги [1]. На інших підстанціях (Рис. 1, поз. 3, 4) перевищується тільки нормально допустиме значення.

Числові характеристики усталеного відхилення напруги, що приведені в табл. 1, визначають певні властивості режимів напруги на кожній підстанції. Так, математичне очікування, яке змінюється в межах 5,5 – 10,5 %, вказує на те, що середнє значення напруги завищене відносно номінального значення приблизно на 6 – 12 кВ. Мода та медіана, в свою чергу, є додатковими характеристиками положення розподілу ймовірностей відхилень напруги. Для первинної мережі числові характеристики положення практично не відрізняються між собою, оскільки набувають значень одного порядку.

Числові характеристики, що визначають розкид значень відносно математичного очікування – дисперсія та середньоквадратичне відхилення – мають однозначний зв'язок з самим чисельним значенням математичного очікування. Так, наприклад, максимальне значення середньоквадратичного відхилення (1,12 %) приходить на тягову підстанцію з найнижчим середнім значенням напруги (5,51 %, поз. 4), а тягова підстанція з найвищим середнім рівнем напруги (11,4 %, поз. 2) характеризується найменшою зміною напруги (0,35 %). Тобто, чим вище рівень напруги в первинній мережі, тим менший розкид значень напруги відносно середнього значення.

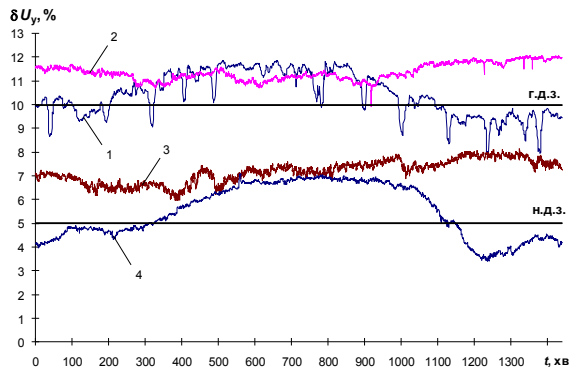


Рис. 1. Усталене відхилення напруги на шинах 110 кВ чотирьох різних підстанцій

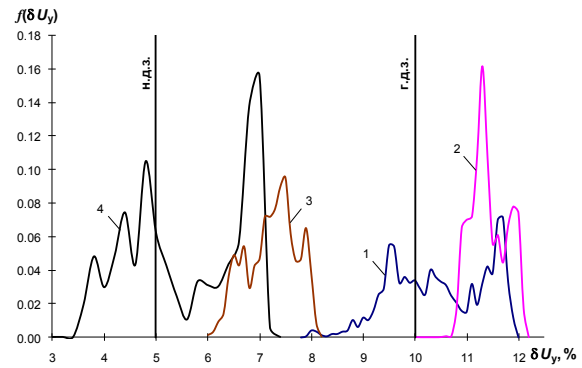


Рис. 2. Емпіричні розподіли відхилень напруги на шинах 110 кВ чотирьох різних підстанцій

Таблиця 1

Числові характеристики відхилень напруги на шинах 110 кВ

№ поз.	Параметр	Номер підстанції			
		1	2	3	4
1	Математичне очікування $M(\delta U_y)$, % / В	$\frac{10,42}{11464,24}$	$\frac{11,37}{12509,26}$	$\frac{7,18}{7896,89}$	$\frac{5,51}{6058,14}$
2	Мода $Mo(\delta U_y)$, % / В	$\frac{9,50}{11245,69}$	$\frac{11,27}{12411,85}$	$\frac{7,45}{7834,17}$	$\frac{6,89}{4651,52}$
3	Медіана $Me(\delta U_y)$, % / В	$\frac{10,38}{11420,50}$	$\frac{11,30}{12431,90}$	$\frac{7,24}{7960,00}$	$\frac{5,43}{5967,17}$
4	Дисперсія $D(\delta U_y)$, % ² / В ²	$\frac{0,855}{1034588}$	$\frac{0,119}{143880}$	$\frac{0,226}{273733}$	$\frac{1,258}{1522411}$
5	Середньоквадратичне відхилення $\sigma(\delta U_y)$, % / В	$\frac{0,925}{1017,15}$	$\frac{0,345}{379,32}$	$\frac{0,476}{523,20}$	$\frac{1,122}{1233,86}$
6	Асиметрія $As(\delta U_y)$	-0,175	0,240	-0,274	-0,123
7	Експес $Ex(\delta U_y)$	-0,980	-0,935	-0,812	-1,486

В якості винятку слід звернути увагу на підстанцію з випрямно-інверторними перетворювачами (Рис. 1, поз. 1), для якої ця закономірність не дотримується, оскільки за наявного завищення напруги до 10,5 % середньоквадратичне відхилення сягає майже 1 %. Розподіли відхилень напруги на ймовірнісній площині (Рис. 2) мають складний характер.

З аналізу цих кривих слідує, що немає жодної підстанції, де відхилення напруги менше нормально допустимого значення (5 %). Виходячи з цього робимо висновок, що показник усталеного відхилення напруги в первинній мережі тягових підстанцій не відповідає встановленим нормам, які регламентуються ГОСТ 13109-97.

Несиметрія напруги в первинній мережі має важливе значення для тягових підстанцій постійного струму, оскільки є визначальним фактором у виникненні неканонічних гармонійних складових в мережі випрямленої напруги. З аналізу отриманих експериментальних даних слідує, що в первинній мережі дослідних тягових підстанцій коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} змінюється в межах 0,2÷0,6 %.

Числові характеристики несиметрії напруги мають при цьому практичну рівність характеристик положення розподілу, оскільки математичне очікування, мода та медіана майже співпадають. Характеристики розкиду значень дисперсія та середньоквадратичне відхилення набувають значень одного порядку, наприклад $\sigma(K_{2U}) = 0,017...0,029$.

Скошеність розподілу, що характеризується коефіцієнтом асиметрії, практично одного порядку для всіх досліджуваних підстанцій. Лише експес розподілу значень несиметрії змінюється в широких межах та може набувати від'ємних значень, $Ex(K_{2U}) = -0,2...2,0$.

Показником, що характеризує гармонійні спотворення напруги в мережі є коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги K_U . Для дослідних тягових підстанцій в первинній мережі зафіксовано досить значні межі зміни цього коефіцієнта від 0,8 до 3,1 %.

Числові характеристики положення розподілу K_U мало відрізняються між собою для кожної дослідної підстанції. Характеристики розкиду значень можуть відрізнятися між собою на один порядок, так наприклад, $D(K_U)$ змінюється в межах 0,014...0,162 %².

Асиметрія розподілу несиметрії може набувати як позитивних, так і від’ємних значень. Ексцеси розподілів несиметрії набувають тільки від’ємних значень в межах від -0,865 до -0,185.

Якість напруги на шинах 35 кВ

Усталене відхилення напруги на шинах 35 кВ для різних тягових підстанцій (Рис. 3) в основному перевищує і гранично і нормально допустимі значення (+5 % та +10 %).

Числові характеристики усталеного відхилення напруги приведені в табл. 2. Математичне очікування, яке змінюється в межах 6,3 – 11,0 %, вказує на те, що середнє значення напруги завищене відносно номінального значення приблизно на 2,2 – 3,9 кВ. Мода та медіана майже не відрізняються між собою та набувають значень одного порядку.

Дисперсія змінюється в інтервалі 0,29 ... 0,76 %², середньоквадратичне відхилення – в межах від 0,54 – 0,87 %. Розподіли відхилень напруги на ймовірнісній площині приведені на Рис. 4 мають складний характер.

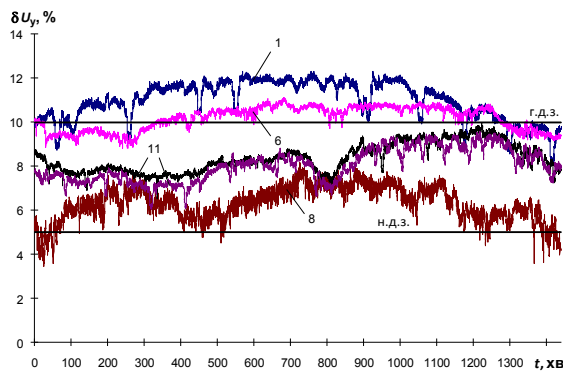


Рис. 3. Усталене відхилення напруги на шинах 35 кВ чотирьох різних підстанцій

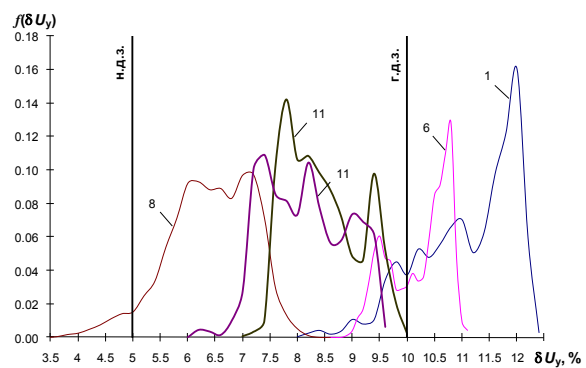


Рис. 4. Емпіричні розподіли відхилень напруги на шинах 35 кВ чотирьох різних підстанцій

Таблиця 2

Числові характеристики відхилень напруги на шинах 35 кВ

№ п/п	Параметр	Номер підстанції			
		1	6	8	11
1	Математичне очікування $M(\delta U_y)$, % / В	<u>10,99</u> 3848,03	<u>10,17</u> 3561,04	<u>6,32</u> 2210,80	<u>8,36</u> 2926,80
2	Мода $Mo(\delta U_y)$, % / В	<u>11,90</u> 4135,13	<u>10,72</u> 3783,28	<u>7,01</u> 2481	<u>7,61</u> 2668,06
3	Медіана $Me(\delta U_y)$, % / В	<u>11,21</u> 3923,82	<u>10,37</u> 2628,27	<u>6,36</u> 2226,97	<u>8,25</u> 2886,88
4	Дисперсія $D(\delta U_y)$, % ² / В ²	<u>0,759</u> 92917	<u>0,294</u> 35965	<u>0,598</u> 73300	<u>0,429</u> 52557
5	Середньоквадратичне відхилення $\sigma(\delta U_y)$, % / В	<u>0,871</u> 304,82	<u>0,542</u> 189,64	<u>0,774</u> 270,74	<u>0,655</u> 229,25
6	Асиметрія $As(\delta U_y)$	-0,709	-0,491	-0,520	0,385
7	Ексцес $Ex(\delta U_y)$	-0,328	-1,128	0,036	-1,004

Виходячи з отриманих кривих (Рис. 4) робимо висновок, що показник усталеного відхилення напруги в районній мережі 35 кВ тягових підстанцій не відповідає встановленим нормам, які регламентуються ГОСТ 13109-97, оскільки для жодної підстанції усталене відхилення напруги не набуває значення менше 5 %.

Значення K_{2U} на шинах 35 кВ змінюється в межах 0,2 – 1,4 %, що в порівнянні з мережею первинної напруги вище, проте не перевищує встановленого нормально допустимого значення 2 %. Числові ха-

характеристики несиметрії напруги також мають практичну однаковість характеристик положення розподілу, оскільки математичне очікування, мода та медіана практично дорівнюють одне одному. Характеристики розкиду значень дисперсія та середньоквадратичне відхилення можуть відрізнятися на величину не більше одного. Наприклад $\sigma(K_{2U})$ змінюється в інтервалі 0,02...0,12.

Коефіцієнт асиметрії, який характеризує скошеність розподілу, змінюється в межах 0,08 – 1,2. Експес розподілу значень несиметрії змінюється в широких межах, набуває тільки додатних значень, $Ex(K_{2U}) = 0,17...4,2$.

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги K_U , який характеризує гармонійні спотворення напруги в мережі змінюється в досить широких межах. Для дослідних тягових підстанцій на шинах 35 кВ в окремі моменти часу зафіксовано досить значні межі зміни цього коефіцієнта від 1,5 до 7,0 %.

Числові характеристики положення розподілу мало відрізняються між собою для кожної дослідної підстанції. Характеристики розкиду значень можуть відрізнятися між собою на один порядок, так наприклад, $D(K_U)$ змінюється в межах 0,014...0,162 %².

Якість напруги на шинах 10 кВ

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що усталене відхилення напруги на шинах 10 кВ для різних тягових підстанцій (Рис. 5) може перевищувати і гранично, і нормально допустимі значення (+5 % та +10 %).

Числові характеристики усталеного відхилення напруги приведені в табл. 3. Математичне очікування змінюється в меншій мірі у порівнянні з рівнем напруги 35 кВ і, відповідно, рівні відхилень напруги менші. При цьому мода і медіана на більшості підстанцій близькі до математичного очікування, та досить мало відрізняються між собою, набуваючи значень одного порядку. Дисперсія ж та середньоквадратичне відхилення змінюються в більш значних межах у порівнянні з рівнями напруги 35-110 кВ. Розподіли відхилень напруги на ймовірнісній площині приведені на Рис. 6.

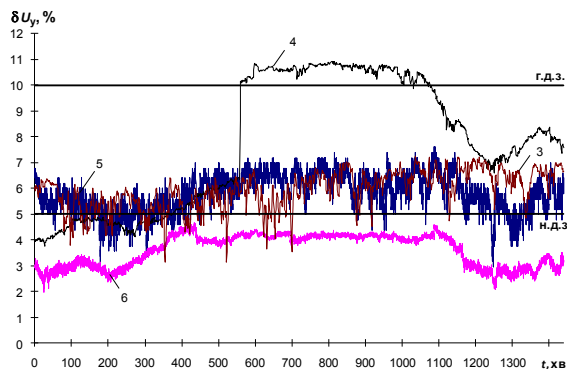


Рис. 5. Усталене відхилення напруги на шинах 10 кВ чотирьох різних підстанцій

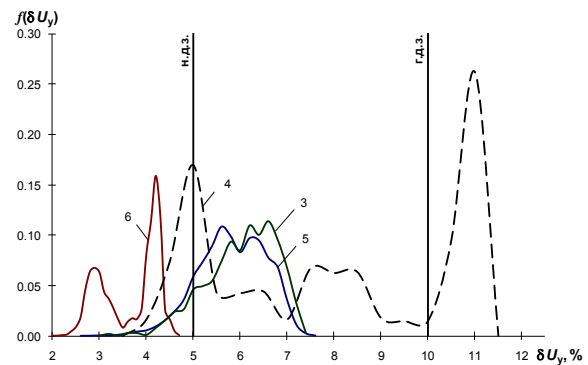


Рис. 6. Емпіричні розподіли відхилень напруги на шинах 10 кВ чотирьох різних підстанцій

З аналізу кривих (Рис. 6) робимо висновок, що показник усталеного відхилення напруги на шинах 10 кВ на більшості тягових підстанцій перевищує н.д.з., які регламентуються ГОСТ 13109-97.

Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю на шинах 10 кВ дослідних тягових підстанцій K_{2U} змінюється в менших межах в порівнянні з рівнем напруги 35 кВ, та також не перевищує встановленого нормально допустимого значення 2 %.

Отримані числові характеристики несиметрії напруги, показують практичну однаковість характеристик положення розподілу, оскільки математичне очікування, мода та медіана практично дорівнюють одне одному, що ідентичне даним, отриманим для рівня напруги 35 кВ. При цьому характеристики розкиду значень дисперсія та середньоквадратичне відхилення мають менші межі змін, що характерно також і для експесу та асиметрії.

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги K_U на шинах 10 кВ змінюється в більш широких межах у порівнянні з рівнем напруги 35 кВ. Для дослідних тягових підстанцій зафіксовано досить значні межі зміни цього коефіцієнта від 0,75 до 9,1 %.

Числові характеристики положення розподілу мало відрізняються між собою для кожної дослідної підстанції, тобто емпіричний розподіл K_U має симетричні властивості, що також характерно і для раніше розглянутих показників.

Числові характеристики відхилень напруги на шинах 10 кВ

№ п/п	Параметр	Номер підстанції			
		3	4	5	6
1	Математичне очікування $M(\delta U_y)$, % / В	$\frac{5,93}{592,65}$	$\frac{7,73}{772,62}$	$\frac{5,81}{581,04}$	$\frac{3,61}{360,72}$
2	Мода $Mo(\delta U_y)$, % / В	$\frac{6,11}{577,06}$	$\frac{10,78}{1078,20}$	$\frac{5,59}{558,58}$	$\frac{4,15}{415,98}$
3	Медіана $Me(\delta U_y)$, % / В	$\frac{6,04}{603,91}$	$\frac{7,76}{775,38}$	$\frac{5,79}{578,79}$	$\frac{3,93}{392,88}$
4	Дисперсія $D(\delta U_y)$, % ² / В ²	$\frac{0,543}{5431,75}$	$\frac{6,239}{62395,90}$	$\frac{0,520}{5202,42}$	$\frac{0,384}{3840}$
5	Середньоквадратичне відхилення $\sigma(\delta U_y)$, % / В	$\frac{0,737}{73,70}$	$\frac{2,498}{249,79}$	$\frac{0,721}{72,13}$	$\frac{0,620}{61,97}$
6	Асиметрія $As(\delta U_y)$	-0,617	-0,067	-0,382	-0,406
7	Експес $Ex(\delta U_y)$	-0,029	-1,586	-0,124	-1,437

Висновки

1. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що усталені відхилення напруги на шинах тягових підстанцій можуть перевищувати і гранично, і нормально допустимі значення.

2. Значення коефіцієнту несиметрії для всіх приєднань тягових підстанцій менші нормально допустимого і немає значень K_{2U} , які б перевищували гранично допустимі значення, на підставі чого робимо висновок про відповідність несиметрії напруги діючому стандарту.

3. Несинусоїдність напруги погіршується зі зниженням рівня споживання. При цьому для дослідних підстанцій для рівнів напруги 110 та 35 кВ показник спотворення синусоїдності відповідає вимогам стандарту, оскільки його значення не перевищують нормально допустимого значення (2 %) і не зафіксовано значень, які б перевищували гранично допустиме (3 %).

Для дослідної підстанції № 1 з випрямно-інверторними перетворювачами, якість напруги за коефіцієнтом спотворення синусоїдності не відповідає вимогам стандарту, оскільки значення коефіцієнта перевищує нормально допустиме (2 %) і наявні значення, які перевищують гранично допустиме значення (3 %).

З аналізу спотворення синусоїдності напруги на шинах 10 кВ можна зробити висновок, що на деяких підстанціях значення K_U можуть перевищувати г.д.з., тобто є невідповідність вимогам діючого стандарту.

4. Таким чином, при впровадженні швидкісного руху доцільно реалізовувати концепцію “глибокого вводу” для поліпшення електромагнітної сумісності з живлячою енергосистемою та підвищення енергоефективності.

Список літератури

1. ГОСТ 13109-97 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення». – К.: Держстандарт, 1999, – 24 с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Гетьманом Г.К.