

РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ

ОГЛЯД ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРИСТРОЇВ, ПРИДАТНИХ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Гаран Я. О., к.т.н., ст. викладач, Войтюк В. М., студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Якість електричної енергії є критичним фактором для забезпечення надійної роботи електрообладнання та енергосистем. Високовольтні мережі, які постачають електроенергію промисловим споживачам, інфраструктурним об'єктам та житловим районам, вимагають постійного контролю показників якості для уникнення аварій, зниження витрат на технічне обслуговування і збільшення терміну служби обладнання. Невідповідність параметрів якості електроенергії, таких як частота, напруга, гармоніки та інші, може призводити до виходу з ладу техніки, перевитрат електроенергії та зниження ефективності роботи енергосистем.

Сучасні низьковольтні пристрої для вимірювання показників якості електроенергії дозволяють здійснювати точний моніторинг та аналіз параметрів енергопостачання в режимі реального часу. Вони забезпечують можливість своєчасного виявлення відхилень і оперативного реагування на зміни, що мінімізує ризики виникнення аварійних ситуацій. Оскільки значна частина передачі електроенергії в енергосистемі України відбувається на високій напрузі (а також транскордонні передачі електроенергії), виникає необхідність визначення таких показників якості електроенергії з використанням масштабних перетворювачів високої напруги, пристосованих для використання разом з низьковольтними пристроями, що дозволяють контролювати показники якості електроенергії. В умовах постійного розвитку технологій та інновацій у сфері енергетики актуальним є огляд сучасних високовольтних масштабних перетворювачів, що використовуються для вимірювання показників якості електроенергії на високій напрузі, їх характеристик та тенденцій розвитку.

Мета. Аналіз основних типів високовольтних масштабних перетворювачів напруги, придатних для визначення показників якості електроенергії, а також порівняння їх характеристик та можливостей застосування в сучасних енергосистемах.

Об'єкт дослідження – високовольтні масштабні перетворювачі напруги.

Предмет дослідження – вплив характеристик високовольтних масштабних перетворювачів напруги на визначення показників якості електроенергії.

Матеріали і результати досліджень. Якість електричної енергії характеризується кількома ключовими параметрами, які безпосередньо впливають на стабільність роботи обладнання та ефективність енергопостачання. Для оцінки якості електроенергії зазвичай використовуються наступні основні показники [1]:

1. Частота електричної мережі. Це основний параметр, що має підтримуватися на рівні 50 Гц (в європейських країнах) або 60 Гц (в США, Японії). Відхилення частоти може призвести до нестабільної роботи обладнання, зниження продуктивності або навіть пошкодження чутливих до частотних змін пристроїв.

2. Напруга. Підтримка стабільного рівня напруги є ключовою умовою для належного функціонування електроустановок. Відхилення напруги, як у бік підвищення, так і в бік зниження, може спричинити перенапругу або недонапругу, що часто призводить до передчасного зносу або пошкодження обладнання. Також швидкоплинні зміни напруги (перенапруги, імпульси напруги) можуть призводити до пошкодження високовольтної ізоляції.

3. Гармоніки. Це додаткові частоти, які виникають у мережі внаслідок роботи нелінійних навантажень (наприклад, перетворювачів частоти або випрямлячів), і є складовими загальної викривленої форми синусоїдної напруги основної (промислової) частоти. Високий рівень гармонік спричиняє збільшене споживання енергії, перегрів трансформаторів та електродвигунів, а також зниження ефективності енергопостачання.

4. Перекоси напруги. Виникають внаслідок нерівномірного розподілу навантаження між фазами в трифазних системах. Це може призвести до перегріву нейтрального провідника, зниження ефективності обладнання та підвищеного зносу систем.

5. Флікер (коливання напруги). Короткочасне коливання напруги (флікер) викликає миготіння у джерелах освітлення та може негативно впливати на роботу чутливого обладнання, як-то комп'ютери або медичні прилади, а також шкідливо впливає на зорову систему людини.

6. Неспівпадіння фаз (асиметрія напруги). Це відхилення векторів напруги від симетричного розташування під кутом 120 градусів по відношенню до векторів сусідніх фаз трифазної системи. Асиметрія спричиняє нерівномірну роботу двигунів, їх перегрів та скорочення терміну експлуатації.

Контроль за цими показниками в умовах високовольтних мереж є критично важливим для забезпечення безперебійної та ефективної роботи енергосистем. Вимірювання параметрів якості електроенергії дозволяє не лише вчасно виявляти порушення, але й приймати відповідні заходи для їх усунення. Таким чином, точний моніторинг та аналіз показників якості електроенергії є ключовим елементом забезпечення стабільного та безпечного енергопостачання. Якість електричної енергії визначається як ступінь відповідності фактичних значень її параметрів установленим нормам ГОСТ 13109-97, ДСТУ EN 50160:2023. Основні з цих значень наведені в таблиці 1.

При цьому, згідно ДСТУ EN 50160:2023, для електричних мереж середніх класів напруг мають визначатись рівні інтергармонік та інформаційних сигналів, для яких граничні межі частот складають 100 кГц. Також у сигналі напруги основної частоти може бути постійна складова, внаслідок чого масштабні перетворювачі напруги, які застосовуються для визначення показників якості електроенергії разом з низьковольтними пристроями моніторингу цих показників, мають забезпечувати високу точність масштабного перетворення

напруги в широкому діапазоні частот: щонайменше, від частоти, що менша за промислову на 15% до 100 кГц, або вище (для аналізу швидкоплинних перехідних процесів, таких, як імпульси напруги).

Таблиця 1 – Допустимі значення відхилень показників якості електроенергії [2]

Найменування показника	Допустиме значення показника	
	нормальне	граничне
Відхилення напруги	$\pm 5^*$	$\pm 10^*$
Доза флікера, відн. од.: короткочасна тривала		1,38; 1,00
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, %, не більше,	8	12
Коефіцієнт гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку, %, не більше	5 (2)	7,5 (3)
Несиметрія напруги, %	2	4
Тривалість провалу напруги, с		30
Відхилення частоти, Гц	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$

Серед відомих масштабних перетворювачів високої напруги, які використовуються в електроенергетиці, можна виділити трансформатори напруги та подільники напруги. В свою чергу, трансформатори напруги бувають електромагнітними, ємнісними, оптоелектронними. Подільники напруги також поділяються на індуктивні, омичні, ємнісні та ємнісно-омичні.

Дослідження здатності електромагнітних трансформаторів напруги типу НКФ (НКФ-220, який був прототипом сучасного трансформатора напруги НКФ-245) виконувалось дослідниками у [3]. Ці дослідження виявили, що характеристики електротехнічної сталі, з якої виконано магнітопровід такого трансформатора напруги, можуть суттєво спотворювати високочастотні складові напруги під час її масштабного перетворення за допомогою НКФ-220. При цьому, на виході низьковольтної обмотки НКФ-220 з'являлись високочастотні складові сигналу напруги (гармоніки), які на десятки відсотків відрізнялись від відповідних гармонік напруги на вході НКФ-220. Дослідження виконувались до 25-ї гармоніки, а ДСТУ EN 50160:2023 вимагає визначення параметрів гармонік до 40-ї (частота 2 кГц), що значно менше 100 кГц, які є межею необхідної частоти смуги пропускання масштабного перетворювача високої напруги.

Дослідники в [4] визначили ряд факторів, які впливають на спотворення гармонічних складових напруги при масштабному перетворенні у ємнісних трансформаторах напруги. Наявність складного ємнісно-індуктивного коливального контуру призводить в таких трансформаторах напруги до суттєвих

спотворень масштабного перетворення напруги (моделювались за схемою заміщення напруги частотою до 100 кГц) як по амплітуді, так і по куту зсуву в окремих фазах, які важко забезпечити ідентичністю параметрів ємнісних елементів подільника напруги та електромагнітної активної частини такого трансформатора. Найкращі характеристики точності масштабного перетворення напруги такі трансформатори забезпечують лише на основній частоті і не працюють на постійній напрузі.

Дослідники в [5] створили модель оптоелектронного масштабного перетворювача напруги до 4 кВ, яку в подальшому пропонують масштабувати на високі та надвисокі класи напруг вимірювальних масштабних перетворювачів. Запропонована дослідниками модель забезпечувала точність масштабного перетворення напруги 2-6% для перехідних процесів, пов'язаних зі зникненням та відновленням напруги (комутаційні перенапруги), що є непоганим результатом, проте, дослідники не враховують, що при масштабуванні оптоелектронної частини такого трансформатора напруги необхідне використання елементів подільника напруги, які додатково збільшуватимуть цю похибку, внаслідок чого електрооптичний трансформатор напруги за своїми показниками точності масштабного перетворення напруги не буде кращим за відповідні омичні подільники напруги, проте, матиме широкий діапазон вхідних частот, у порівнянні з електромагнітним трансформатором напруги.

Омичний подільник напруги, згідно дослідження [6], має стабільні показники точності масштабного перетворення напруги, приблизно, до частоти 3 кГц, проте далі, зі збільшенням частоти, показники точності масштабного перетворення напруги суттєво знижуються внаслідок впливу паразитних ємностей на розподілення напруги по резистивних елементах. Крім того, суттєвим недоліком омичних подільників напруги є температурна залежність опорів елементів, внаслідок чого їх нагрівання в процесі роботи (не кажучи вже про коливання температури навколишнього середовища) спотворює коефіцієнт масштабного перетворення до декількох відсотків (такі саме впливи мають ці фактори і на кут зсуву фаз при такому масштабному перетворенні напруги). Внаслідок цього, омичні подільники напруги частіше використовуються в лабораторних умовах і мало придатні для умов відкритих розподільних пристроїв високої напруги.

Ємнісний подільник напруги на основі високовольтного еталонного конденсатора на напругу до 200 кВ, який розглядається в [7], використовувався для оцінки похибки масштабного перетворення напруги в діапазоні від промислової частоти до 3 кГц. В результаті були одержані похибки масштабного перетворення в межах 0,5%, які були більші в області низьких частот, тобто, ємнісний подільник напруги не призначений для якісного масштабного перетворення напруги низької частоти і взагалі не здатен перетворювати постійну напругу, що обмежує його застосування як по точності, так і по діапазону частот вхідної напруги.

Найкращі показники точності масштабного перетворення напруги забезпечують ємнісно-омичні широкосмугові подільники напруги, які здатні

забезпечувати точність масштабного перетворення напруги за амплітудою та кутом в діапазоні від постійної напруги до сотень кілогерц. В дослідженні [8] розглянута математична модель ємнісно-омічного широкосмугового подільника напруги, для якого можна теоретично одержувати точність масштабного перетворення напруги до 0,02% (реальні прототипи таких подільників напруги можуть забезпечувати точність масштабного перетворення високих напруг 0,2% в діапазоні частот до 10 кГц та 3% на частоті до 250 кГц).

Виходячи з розглянутих типів високовольтних масштабних перетворювачів напруги та показників якості електроенергії, зазначених в табл. 1 та діючих нормативних документах, які стосуються показників якості електроенергії, можна констатувати, що найбільш близькими до виконання всіх вимог щодо точності масштабного перетворення показників якості електроенергії є оптоелектронні трансформатори напруги та ємнісно-омічні широкосмугові подільники напруги.

Перевагою оптоелектронних трансформаторів напруги можна вважати цифровий вихід, внаслідок чого такі масштабні перетворювачі здатні бути інтегровані в цифрові інтелектуальні мережі (Smart Grid), проте питання температурної залежності характеристик складових електричного кола таких оптоелектронних трансформаторів напруги досі не вирішене і є актуальною науково-практичною задачею.

Перевагою ємнісно-омічних широкосмугових подільників напруги є розширений діапазон входних напруг, в межах якого точність масштабного перетворення показників якості електроенергії може бути доведена до відповідності класу А низьковольтних аналізаторів показників якості електроенергії (найвищий клас точності). Проте, основними недоліками подільників напруги є необхідність узгодження їх вторинних кіл з входніми параметрами навантаження (ця задача може бути вирішена оцифровуванням вихідного сигналу за аналогією з оптоелектронними трансформаторами напруги) та досі не вирішені остаточно питання можливості їх серійного виробництва для застосування на відкритих розподільних пристроях.

В патенті на корисну модель [9] запропоновані рішення, які можуть бути основою для усунення частини недоліків високовольтних широкосмугових подільників напруги за рахунок їхнього виконання секційованими однотипними модулями на будь-які класи напруг, при цьому діапазон частот входних напруг, для якого забезпечуватиметься прийнятна точність масштабного перетворення напруги може бути ще додатково розширеним.

Висновки. Забезпечення якості електроенергії згідно її нормованих показників є критично важливим для стабільної роботи електричних систем та ефективного використання ресурсів. В Україні доступні різноманітні низьковольтні прилади для моніторингу якості електроенергії, які охоплюють як традиційні аналогові, так і сучасні цифрові технології. Високовольтні масштабні перетворювачі напруги, які проаналізовані в даній роботі, дозволяють визначити їх переваги та недоліки для забезпечення необхідної, згідно діючих нормативних документів, точності масштабного перетворення високої напруги.

Серед високовольних масштабних перетворювачів напруги найбільш придатними для визначення показників якості електроенергії на високій напрузі на даний момент є оптоелектронні трансформатори напруги та ємнісно-омічні широкосмугові подільники напруги. Дані типи масштабних перетворювачів напруги досі розвиваються і удосконалюються, покращуються їх амплітудно-частотні характеристики, тому можна вважати ці типи високовольного електрообладнання перспективними з точки зору визначення за їх допомогою всіх показників якості електроенергії на високій напрузі, у відповідності до діючих нормативних документів. Подальші дослідження нових конструкційних рішень, які застосовуються для підвищення точності масштабного перетворення та розширення діапазону частот вхідних високих напруг електрооптичними трансформаторами та ємнісно-омічними широкосмуговими подільниками напруги дозволить застосовувати такі пристрої в концепції Smart Grid та підвищить надійність та безпечність електроенергетики в цілому.

Перелік посилань

1. Суржиков М.В. Підвищення точності визначення показників якості електричної енергії [Електронний ресурс] / Суржиков М.В. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/21eb30c1-705d-44d8-ba30-17cd86ea8efc/content>
2. ГОСТ 13109-97 [Електронний ресурс]. – 1999. – Режим доступу до ресурсу: <https://vseghost.com/Catalog/37/3761.shtml>.
3. Бржезицький В. О. Трансформування вищих гармонічних складових напруги електромагнітними трансформаторами (експериментальне дослідження) / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Наукові праці НУХТ. – 2013. – № 49. – С. 98-103.
4. Annabattula, J. Factors Influencing The Frequency Response Of Capacitive Voltage Transformer / J. Annabattula, D. Yelamanchi, T. S. Sirish // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2014. – Vol. 3, Issue 8, pp. 11079-11085.
5. Gonçalves MN, Werneck MM. Optical Voltage Transformer Based on FBG-PZT for Power Quality Measurement. *Sensors (Basel)*. 2021;21(8):2699. Published 2021 Apr 12. doi:10.3390/s21082699.
6. Garnacho, F.; Khamlichi, A.; Rovira, J. The Design and Characterization of a Prototype Wideband Voltage Sensor Based on a Resistive Divider. *Sensors* 2017, 17, 2657. <https://doi.org/10.3390/s17112657>.
7. De Paula Campos, Ana & Cardoso, Keyla & Cruz, Vanessa & Fortes, Marcio. (2019). Frequency Response of Capacitive Voltage Dividers for Evaluation of Harmonic Components. 10.1109/ISGT-LA.2019.8895310.
8. V. Brzhezitsky, Y. Haran, A. Derzhuk, Y. Trotsenko and O. Protsenko, "Amplitude-Frequency Characteristic of Broadband Voltage Divider with Ultimate Adjustment of Its Low-Voltage Arm," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 111-115, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160094.
9. Патент України № 155502, МПК G01R 15/04, G01R 15/06, G01R 15/16, H02M 3/06. Високовольтний широкосмуговий подільник напруги / Гаран Я. О. Проценко О. Р., Троценко Є. О.; заявник та власник патента: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – u 2023 03098; заявл. 26.06.2023; опубл. 06.03.2024, Бюл. № 10. – 9 с.