

## ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ ЗАПАСУ СТІЙКОСТІ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ З РІЗНОРІДНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ГЕНЕРАЦІЇ

Досліджено підходи до оцінки стійкості енергетичних систем з точки зору різних наукових теорій. Розглянуто основні критерії стійкості, для енергетичних, економічних та соціальних систем. Запропоновано визначення стійкості для локальних систем електроспоживання з різномірними джерелами енергії. Проаналізовано спотворення, які виникають у локальних системах, та їхній вплив на стійкість систем. Визначено межі стійкості для зазначених локальних систем та граничні режими за яких спотворення сигналів в мережі може викликати порушення стійкості.

**Ключові слова:** Стійкість, локальні системи, межі стійкості.

Сьогодні з'являється все більше досліджень [1-3] стосовно переваг часткової децентралізації і шляхів інтеграції децентралізованих систем виробництва енергії в централізовану систему, створення інтелектуальних мереж Smart Grid.

Одним із прикладів інтелектуальних мереж Smart Grid є локальні електричні систем (ЕС). Особливістю локальних ЕС є те, що вони поєднують властивості великих енергетичних та малих електротехнічних систем з застосуванням пристроїв силової електроніки (СЕ) та мікропроцесорних систем керування, в реальному часі. У виділених системах значною є частка джерел обмеженої потужності, нетрадиційних відновлюваних джерел енергії та джерел, що працюють на органічному паливі [3].

Особливістю функціонування локальних ЕС з джерелами розосередженої генерації є різномірність режимів роботи генеруючого обладнання та наявність пристроїв СЕ, які як вносять спотворення сигналів, так і забезпечують корекцію режимів роботи мережі[4].

Концепція локальних ЕС поєднує всі переваги системи з єдиним джерелом РГ та гібридних систем РГ. Крім того, вона також включає в себе всі переваги звичайної мережі в малому масштабі. Локальні ЕС в поєднанні з пристроями силової електроніки є повністю самодостатніми мережами, часто з автономним управлінням і системою зв'язку та захисту. Вони здатні забезпечити можливість підтримки необхідного рівня енергозабезпечення ліній електропередач в режимі паралельної роботи з мережею, а також забезпечення рівнів пікового електроспоживання.

При керуванні процесів в ЕС, передбачається необхідність постійного відстеження стану об'єкта керування шляхом безперервного моніторингу параметрів процесів для забезпечення можливості оперативної корекції об'єкта керування при неприпустимих відхиленнях від заданого стану.

В локальних ЕС спостереження та керування параметрами системи повинно проводитись безупинно для того, щоб мати можливість у будь-який час втрутитися в поведінку об'єкта керування і привести його до необхідного стану.

Забезпечення стійкої та надійної роботи виділених систем є важливою задачею, яка потребує свого вирішення. В даний час не існує чіткої класифікації видів стійкості. Проте, з позицій системного підходу можна розглядати наступні види стійкості:

- стійкість техніки;
- технологічну стійкість;
- організаційну стійкість;
- стійкість зовнішніх зв'язків;
- екологічну стійкість;
- структурну стійкість і т.п.

Якщо навіть поверхово оцінити тільки наведені види стійкості, то можна з упевненістю сказати, що усі вони впливають на якісні характеристики роботи системи.

Корисно і вчасно буде згадати про те, що собою являє стійкість в уявленні різних дослідників.

Через складність явищ та процесів, у великих електроенергетичних системах, «фізичне» поняття стійкості для зручності моделювання традиційно розкладають на складові. В країнах колишнього СРСР була досить поширена математична декомпозиція стійкості на поняття «стійкість паралельної роботи енергосистем» та «стійкість навантаження» [1]. У той же час, в країнах Європейського енергетичного об'єднання використовується дещо інша класифікація цього явища: «стійкість за кутом» та «стійкість за напругою» [1,3,5].

Стійкість за напругою – це здатність енергосистеми підтримувати стійкі та прийнятні рівні напруги на всіх системах шин (СШ) як в нормальних, так і в післяаварійних та ремонтних режимах. Критерій стійкості енергосистеми за напругою полягає у тому, що в поточному режимі на кожній СШ при

збільшенні напруги величина реактивної потужності на тій самій СШ повинна збільшуватись. Тобто, система стійка за напругою при  $dQ/dV > 0$ . Величина напруги, яка відповідає переходу від стійкого стану до нестійкого (при  $dQ/dV = 0$ ), називається «критичною напругою», а відповідний їй рівень реактивної потужності – «межею за реактивною потужністю».

У радіоелектронних системах та електротехнічних системах з пристроями СЕ невеликої потужності поняття стійкості означає спроможність системи протидіяти малим збуренням, дія яких направлена на виведення її зі стану рівноваги та можливість системи повернутися до цього стану.

Для оцінки стійкості таких систем використовуються алгебраїчні та частотні критерії стійкості (критерії стійкості по Ляпунову, критерії Найквіста та Михайлова), що дозволяють визначати стійкість даних систем без вирішення складних характеристичних рівнянь. Поняття рівноваги і пов'язане з ним поняття стійкості відіграють важливу евристичну роль у вивченні динамічно розвинутих систем, виступаючи в якості однієї з умовних точок відліку. Проблема полягає лише в тому, що на основі цих понять не можна побудувати цілісного пояснення процесів у відповідних системах.

Якщо на систему управління діють два зовнішніх чинники – чинник, який задає вплив  $g$  і збурення  $f$ , – то в загальному випадку вона описується рівнянням

$$a_0^{(n)} y + a_1^{(n-1)} y + \dots + a_n y = b_0^{(m)} g + b_1^{(m-1)} g + \dots + b_m g + c_0^{(l)} f + c_1^{(l-1)} f + \dots + c_l f \quad (1)$$

або, у символічній формі,

$$(a_0^{(n)} + a_1^{(n-1)} + \dots + a_n) y = (b_0^{(m)} + b_1^{(m-1)} + \dots + b_m) g + (c_0^{(l)} + c_1^{(l-1)} + \dots + c_l) f \quad (2)$$

Враховуючи, що  $g$  і  $f$  – деякі функції часу, виконавши необхідні операції в правій частині, отримаємо

$$(a_0 p^n + a_1 p^{(n-1)} + \dots + a_n p) y = \varphi_g(t) + \varphi_f(t), \quad (3)$$

де  $\varphi_g(t)$  та  $\varphi_f(t)$  – функції, що отримуються відповідно з першого і другого доданка в правій частині рівняння (1.3).

З рівняння (3) при  $g \equiv 0$  і  $f \equiv 0$  одержуємо однорідне диференціальне рівняння

$$(a_0 p^n + a_1 p^{(n-1)} + \dots + a_n) y = 0 \quad (4)$$

Для того щоб система була стійкою, необхідно, щоб всі коефіцієнти її характеристичного рівняння були строго одного знака:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, \dots, a_n > 0 \quad (5)$$

або

$$a_0 < 0, a_1 < 0, \dots, a_n < 0. \quad (6)$$

Якщо умова (5) або (6) не виконується, то система нестійка; якщо воно виконується, система може бути стійкою.

Сукупність значень параметрів, при яких система стійка, називають межею стійкості. Близькість системи до межі стійкості оцінюється запасами стійкості за фазою й амплітудою, що визначають за амплітудно-фазовими характеристиками.

Поряд з точними методами дослідження на практиці застосовуються наближені методи, засновані на використанні функцій, що описують, наприклад, методи гармонійної чи статичної лінеаризації. Стійкість систем при впливі на них випадкових збурювань вивчається теорією стійкості стохастичних систем.

Згідно з вищевикладеним, для локальних ЕС поняття статичної стійкості – це спроможність системи повертатися до початкового стану після припинення дії малих збурень, які вивели її з цього стану. За умовами статичної стійкості енергосистем нормують мінімальні коефіцієнти запасу з активної потужності в перетинах і мінімальні коефіцієнти запасу з напруги у вузлах навантаження [2]. Крім того, встановлюють групи збурень, за яких повинні забезпечуватись як динамічна стійкість, так і нормативні запаси статичної стійкості в післяаварійних режимах, а в допустимій області режимів має забезпечуватись відсутність саморозхитування системи.

Значення показників стійкості для електроенергетичних систем нормуються згідно [2] для різних груп збурень у високовольтних мережах ОЕС України напругою 110-750 кВ. В таких системах оцінювання рівня безпеки режимів енергосистем, може проводитися на основі підходу [1], який передбачає створення проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів ОЕС України.

Вимоги до стійкості енергосистем можуть забезпечуватись за рахунок:

- посилення електричної мережі;
- зменшення часу відключення КЗ шляхом удосконалення та оптимізації настроювання пристроїв АПВ;
- використання автоматичного захисту підстанцій (АЗПС);
- зміни режимів роботи енергосистем.

При оцінці ступеня стійкості у виділених системах важливими показниками є керованість та спостережуваність режимів, як обладнання так і системи в цілому.

Отже для забезпечення стійкості важливі:

- безперервність керування;
- виключення помилок в оцінці стану об'єкта керування;
- виключення затримок в оцінці стану об'єкта керування.

Практично в локальних ЕС оцінка стійкості може полягати у визначенні запасу стійкості або ж ступеня стійкості системи у відповідності до режимів та процесів.

Зазначимо, що для локальних ЕС, представлених з'єднанням  $\{\Gamma\} - \{H\}$  величини струмів  $i_{PI}(t)$  регулюючого пристрою (РП), в ідеальному випадку мають повністю скомпенсувати реактивні складові струмів генераторів,  $-i_{p,r}(t)$ . Струми компенсації РП  $i_{p,PI1}(t)$  та  $i_{p,PI2}(t)$  можна охарактеризувати спектрами гармонік  $S^{(1)}$  та  $S^{(2)}$ . У ідеальному випадку має виконуватись співвідношення:

$$S^{(1)} \equiv S^{(2)},$$

де « $\equiv$ » – знак тотожної рівності. В залежності від схемотехнічної реалізації РП, нерівність  $S^{(1)} \neq S^{(2)}$  характеризує відмінність спектрів як за амплітудами  $\{\square S_A\}$ , так і за початковими фазами  $\{\square S_\varphi\}$ . У першому наближенні при введенні норм  $S_{H1} \equiv \|S^{(1)}\|, S_{H2} \equiv \|S^{(2)}\|$ , маємо співвідношення із нев'язками  $\Delta_1, \Delta_2$

$$S_{H1} - S_{H2} = \Delta_1; S_{H2} - S_{H1} = \Delta_2, \tag{7}$$

де  $\Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0$ .

Для діючих значень струмів  $I_1$  та  $I_2$  (відповідно миттєвих струмів  $i_{p,PI1}(t)$  та  $i_{p,PI2}(t)$ ) згідно (2) можемо записати:

$$I_1^2 - I_2^2 = \Delta_{1,I}^2; I_2^2 - I_1^2 = \Delta_{2,I}^2, \tag{8}$$

де  $\Delta_{1,I} > 0; \Delta_{2,I} > 0$ .

Аналіз виразів (7) та (8) підтверджує, що відмінність спектрів обумовлює появу «перекомпенсованої» чи «нескомпенсованої» складової струму. Позначимо цей додатковий струм  $\Delta i_p(t)$ . Відмінність струму, що генерує РП  $i_{p,PI}(t)$ , від сумарного струму, який повинен бути скомпенсованим в системі  $-i_{p\Sigma}(t)$  показано на рис. 1, поява даної складової, як видно з рисунку, може викликати порушення стійкості в локальній системі.

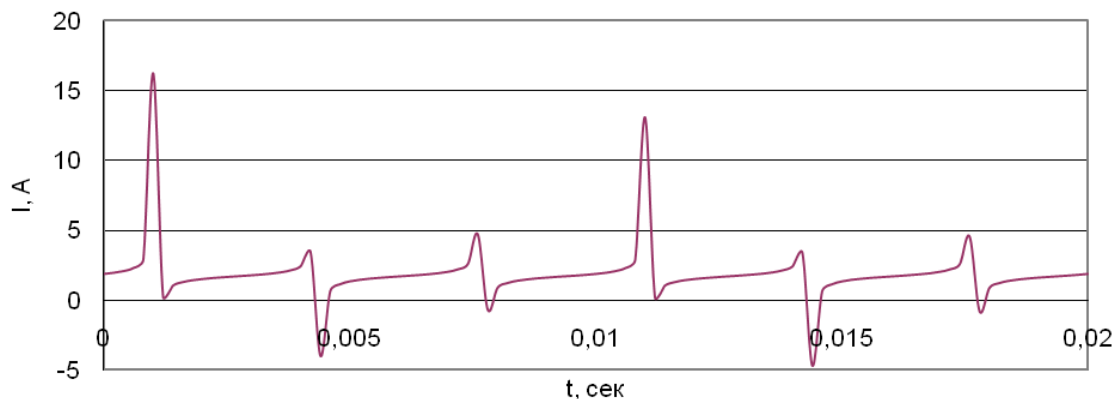


Рис. 1. Відмінність струму, що генерує РП  $i_{p,PI}(t)$ , від сумарного струму, який повинен бути скомпенсованим  $i_{p\Sigma}(t)$

Щоб оцінити межі зміни стійкості роботи даної ЕС проаналізуємо вплив струму, що генерує РП  $i_{p,PI}(t)$ , на сумарний струм, який повинен бути скомпенсованим  $i_{p\Sigma}(t)$ .

Згідно вищевикладеного для різних початкових умов сформуємо таблиці залежностей величини  $K_{ст}$  (відмінність струму, що генерує РП  $i_{p,PI}(t)$ , від сумарного струму, який повинен бути скомпенсованим

$i_{p2}(t)$ ), від коефіцієнтів пульсації за напругою та струмом а також для різнонаправлених перетоків енергії (значень кута  $\phi_3$ ) при зміні зсуву фаз між напругою та струмом першої гармоніки у діапазоні від 0 до 180°, наведені нижче:

Табл. 1. Фактичні значення  $K_{CT}$  для наведених табличних даних

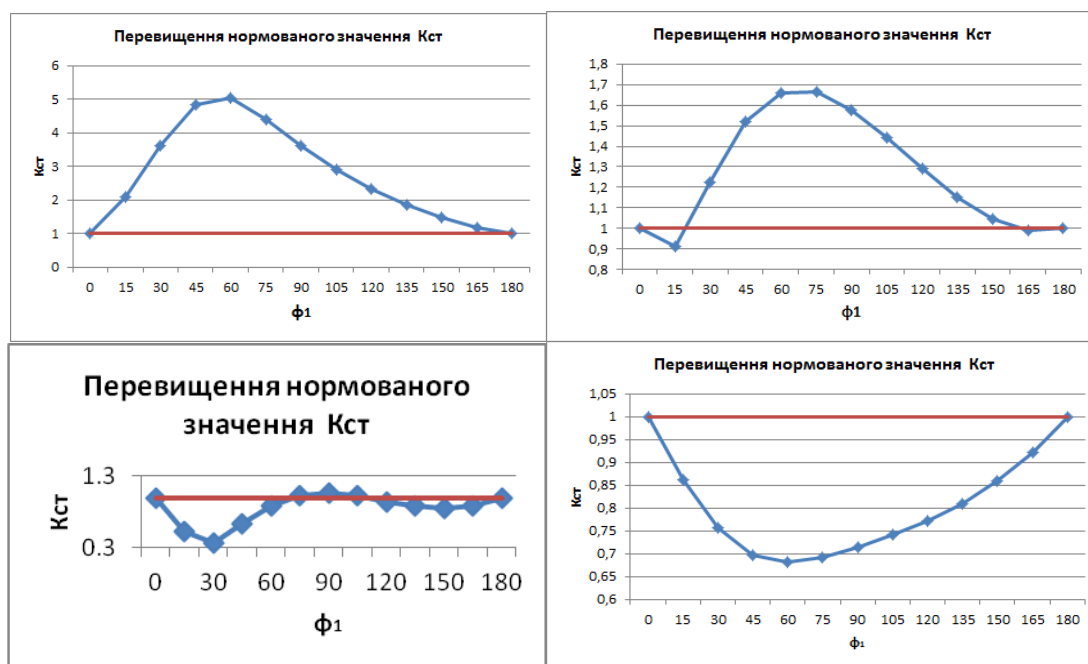
$\phi_3=15^\circ$ , $\phi_1=0\dots 180^\circ$	$K_{CT} \text{ i var}$			$K_{CT} \text{ i const}$		
	$K_{CTmin}$	$K_{CTmax}$	$K_{CTcp}$	$K_{CTmin}$	$K_{CTmax}$	$K_{CTcp}$
$K_{CT} \text{ uvar}$	0,99446	8,96467	3,34354	0,77487	8,96467	1,90985
$K_{CT} \text{ uconst}$	0,91277	5,14584	1,18464	0,98325	1	0,98987

Отримані результати (див. табл. 1) за мінімальним, середнім та максимальним значенням дозволяють визначити режими роботи системи (амплітуди вищих гармонік, величини та напрями перетоків потужності) за яких можливе порушення стійкості в локальних ЕС.

У відповідності до отриманих результатів визначимо, для тих самих умов, величину відхилення коефіцієнта  $K_{CT}$  від граничного допустимого значення ( $K_{CT} = 1$ ), що дасть змогу оцінити межі стійкості для конкретної системи (див. табл. 2, рис. 2).

Табл. 2. Процентні значення відхилення величини  $K_{CT}$  від 1 (границі стійкості) для наведених табличних даних.

$\phi_3=15^\circ$ , $\phi_1=0\dots 180^\circ$	$K_{CT} \text{ i var}$			$K_{CT} \text{ i const}$		
	$K_{CTmin}$	$K_{CTmax}$	$K_{CTcp}$	$K_{CTmin}$	$K_{CTmax}$	$K_{CTcp}$
$K_{CT} \text{ uvar}$	0,55%	796,47%	234,35%	22,51%	796,47%	-90,99%
$K_{CT} \text{ uconst}$	8,72%	414,58%	-18,46%	1,68%	0,00%	1,01%

Рис. 2. Зміна значень коефіцієнта  $K_{CT}$  в залежності від величини струмів вищих гармонік та напрямку перетоків реактивної потужності

Запропонований підхід до оцінки керованості процесів в локальних ЕС дозволяє при розділенні режимів роботи елементів системи виділити граничні режими, які визначають межі стійкості за зміною режимів роботи системи та можливість систем поглинати збурення які виникають в даних системах.

Результати наведені у таблицях та на рисунках дозволяють за мінімальним, середнім та максимальним значенням коефіцієнта  $K_{CT}$  і мінімальним, середнім та максимальним процентним відхиленням від межі стійкості системи (для даного коефіцієнта =1) оцінити та визначити режими в яких порушується стійкість системи а також величину запасу стійкості для локальних ЕС.

**Література**

1. Буткевич О.Ф., Запаси статичної стійкості та пропускна спроможність контрольованих перетинів енергосистем – деякі ретроспекції та сьогодення // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – Вип. 18. – С. 3 – 12.
2. ГКД 34.20.575-2002 // Стійкість енергосистем, керівні вказівки / К.: ОЕП «Гріфре», 2009. – 23 с.
3. Денисюк С.П., Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією / Денисюк С.П., Дерев'янку Д.Г., Колесник П.С. // Зб. пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Спец. вип. – 2011. – С. 30 – 37.
4. Денисюк С.П., Рибіна О. Б., Дерев'янку Д.Г. Аналіз електромагнітної сумісності елементів систем електропостачання при змінних параметрах генератора та навантажень // Спец. випуск Праць Ін-ту електродинаміки НАН України (Матеріали I Міжнародної конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС'10») – К.: ІЕД НАНУ, 2010.
5. Kundur P., Paserba J., Ajjarapu V. and other. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions // IEEE Trans. On Pow. Sys. - 2004. - V. 19 - № 2. -Pp. 1387-1401.

D. DEREVIANKO

**MAIN FEATURES OF THE LOCAL SYSTEMS STABILITY ANALYSES WITH DIVERSE SOURCES OF GENERATION**

Еру approaches to the stability assessment of power systems in terms of various scientific theories was explored. The main criteria of stability for energy, economic and social systems was shown. A definition of stability for local electricity systems with different types of sources of energy was given. The distortion arising in local systems and their impact on the stability of systems was analyzed. The limits of stability for these local systems and boundary regimes in which the signal distortion in the network may cause resistance were calculated.

**Key words:** Stability, local systems, stability limits.

**References**

1. Butkevych A.F, Stocks static stability and capacity controlled intersections power systems - some retrospection and present // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. – K. IED NAS, 2007. - Issue. 18. - Pp. 3 - 12.
2. GKD 34.20.575-2002 // Power systems stability, guidelines / K. OEP "Hrifre", 2009. - 23 p.
3. Denysyuk SP, Optimization of regimes of power supply in local systems with distributed generation / Denysyuk S.P, Derevianko D.G, Kolesnik P.S // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Special. issue. – 2011. – Pp. 30 – 37.
4. Denysyuk S.P., Rybina O.B., Derevianko D.G. Analysis of electromagnetic compatibility of electrical items with variable parameters of the generators and load // Spec. issue of Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine (Materials of the International Conference "Energy Smart Systems – ESS'10") – K. IED National Academy of Sciences, 2010.
5. Kundur P., Paserba J., Ajjarapu V. and other. Definition and classification of power system stability IEEE / CIGRE joint task force on stability terms and definitions // IEEE Trans. On Pow. Sys. – 2004. – V. 19 - № 2. – Pp. 1387-1401.

УДК 621.31

Д.Г. ДЕРЕВ'ЯНКО

**ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ С РАЗНОРОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ГЕНЕРАЦИИ**

Исследованы подходы к оценке устойчивости энергетических систем с точки зрения различных научных теорий. Рассмотрены основные критерии устойчивости, для энергетических, экономических и социальных систем. Предложено определение устойчивости для локальных систем электроснабжения с разнородными источниками энергии. Проанализированы искажения, возникающие в локальных системах, и их влияние на устойчивость систем. Определены границы устойчивости для указанных локальных систем и предельные режимы при которых искажения сигналов в сети могут вызвать нарушение устойчивости.

**Ключевые слова:** Устойчивость, локальные системы, грани устойчивости.