

ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРО- ТА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

УДК 621.316.1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ НА СТІЙКІСТЬ РЕЖИМІВ ЛОКАЛЬНИХ СЕГМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Тугай Ю. І.¹, Козирський В. В.², Приступа А. Л.³, Тютюнник Ф. О.²

¹Інститут електродинаміки НАН України (м. Київ),

²ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України (м. Київ),

³Чернігівський національний технологічний університет

Запропоновані шляхи аналізу статичної стійкості локальних сегментів електричної системи при наявності на нижньому рівні ієрархії джерел розосередженої генерації.

Постановка проблеми. Починаючи з кінця минулого тисячоліття спостерігається стійка тенденція до поширення джерел розосередженої генерації різних типів. Цей факт обумовлений комплексом взаємопов'язаних чинників, серед яких можна виділити:

- вимоги до збільшення ефективності використання первинних ресурсів;
- необхідність зменшення собівартості її виробництва та транспорту;
- зростання екологічних вимог до джерел генерації електроенергії.

Як наслідок, склалася певна тенденція переходу від повністю централізованої системи генерації та розподілу електроенергії до комбінованої, з використанням джерел розосередженої генерації.

Одним із факторів, які впливають на надійність електропостачання споживачів є здатність системи в процесі експлуатації протистояти збуренням різної природи, тобто стійкості. Стійкість обумовлюється значною кількістю факторів, які в певному наближенні можна поділити на дві групи:

- системні (задані властивості системи при її проектуванні та побудові);
- режимні (значення параметрів поточних режимів генерації, передачі та споживання).

При вирішенні питання впливу розосередженої генерації на стійкість локальних сегментів енергосистем необхідно враховувати обидві групи факторів. Але крім зазначених груп, на увагу заслуговують також тип джерела розосередженої генерації (залежить від виду первинної енергії) та характеристика зв'язку із системою, який цим типом обумовлений (наприклад, наявність або відсутність інверторного перетворювача).

До ключових факторів можна віднести також значення питомої частки джерел розосередженої генерації в сегменті та потужність перетинів (зв'язків сегмента з енергосистемою в цілому).

Традиційно в електроенергетиці поняття статичної, та, особливо, динамічної стійкості розглядалися в контексті енергосистем та вищих по ієрархії утворень. Але в сучасних умовах, в тому числі з поширенням різномірних джерел розосередженої генерації, досить актуальною є задача оцінки стійкості з урахуванням

нижчих рівнів ієрархії, наприклад розподільчих мереж.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В найбільш розвинених країнах світу принцип розосередженої генерації не є новим, дана тема вже тривалий час знаходиться серед пріоритетних напрямків наукових досліджень. В той же час можна відмітити, що проблема стійкості загалом в електроенергетиці також є досить вивченою. Однак задача локальної стійкості та її оцінки при наявності в сегменті електроенергетичної системи джерел розосередженої генерації є малодослідженою.

В роботі [1] розглядається вплив джерел розосередженої генерації на динамічну стійкість в умовах збільшення частки розосередженої генерації. В результаті встановлено вплив технологій перетворення енергії в джерелах розосередженої генерації на процеси в електроенергетичній системі.

В електроенергетиці України даний підхід є досить новим і перспективним, оскільки впровадження джерел розосередженої генерації знаходиться на початковому рівні. Можна окреслити такі основні напрямки теоретичних досліджень при вирішенні даної задачі:

- пошук альтернативних джерел енергії;
- розробка технології джерел розосередженої генерації (аналіз використання різних первинних видів джерел енергії);
- управління режимами джерел розосередженої генерації різних типів та конструкцій [2].

В роботі [3] розглянуто пошук рішення проблеми вибору місць встановлення джерел розосередженої генерації. Розглянуто питання оптимізації потужності джерел розосередженої генерації в розподільчих електричних мережах сільських регіонів. Запропоновано використання централізованого керування потужністю джерел розосередженої генерації. В роботі [4] розглянуто питання статичної стійкості при підключенні джерел розосередженої генерації до розподільчих мереж, в контексті межі потужності та межі стійкості, при зміні частки розосередженої генерації та її структури в загальних генеруючих потужностях. Проводились дослідження фактору частки та структури джерел розосередженої генерації в певному сегменті електроенергетичної системи. Показано, що при част-

ці джерел розосередженої генерації близькій до 15% має місце зниження межі стійкості нижче межі потужності сегмента, тобто можливе порушення стійкості.

Мета статті. Розглянуті методи аналізу питань стійкості, які можуть бути використані при дослідженні режимів в локальних сегментах електроенергетичних систем на рівні розподільчих мереж. Це дає в подальшому можливість пошуку ефективних засобів підвищення надійності роботи систем електропостачання при наявності як централізованих, так і розосереджених джерел енергії.

Основні матеріали дослідження. Досліджуваний локальний сегмент електроенергетичної системи був синтезований на основі загальноприйнятої для аналізу режимів тестової схеми, яка була запропонована Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (США): "IEEE 14 Bus System". Загальний вигляд даної схеми наведено на рис. 1

Запропонована схема представляє собою структуру певної гіпотетичної енергосистеми і застосовується для верифікації результатів моделювання процесів, що відбуваються в реальних системах. До складу системи входять 6 кільцевих сегментів (мереж), два класи напруги 110 та 220 кВ. Кільцеві сегменти, утворені вузлами 1-2-5, 2-4-5 та 2-3-4 відносяться до класу напруги 220 кВ, сегменти 4-5-6-11-10-9, 6-11-10-9-14-13 та 5-12-13 мають клас напруги 110 кВ.

Для подальших досліджень прийmemo, що зв'язок із енергосистемою здійснюється через вузли 1 та 2. Навантаження мають всі вузли, окрім вузла 1.

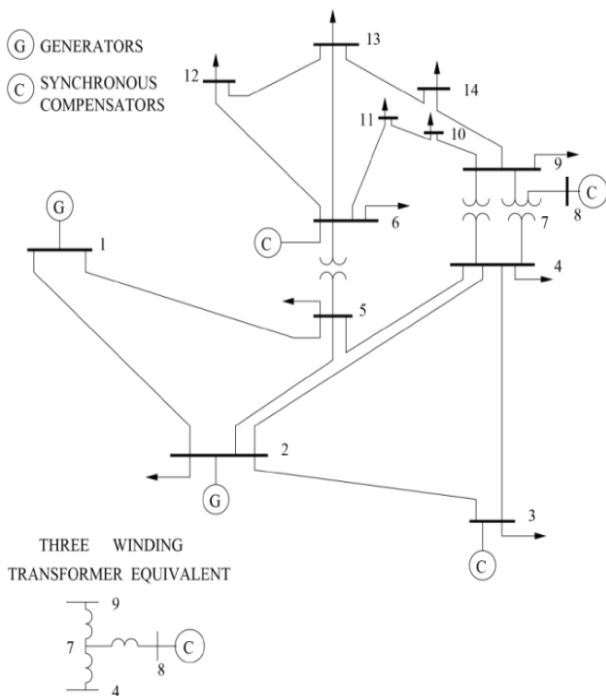


Рисунок 1 – Тестова схема "IEEE 14 Bus System"

Взагалі в електроенергетиці загальноприйнятим є висновок про те, що стійкість системи двох генераторів співрозмірної потужності при малих збуреннях завжди буде забезпечена, оскільки кут між векторами напруги, що відповідає межі стійкості більший від кута, який відображає межу потужності. Даний ви-

сновок є цілком обґрунтованим та підтверджується розрахунками.

Але за наявності джерел розосередженої генерації це твердження не завжди буде вірним, оскільки не враховується структура та конструкція конкретних джерел розосередженої генерації. Ці фактори є суттєвими для отримання висновку про стійкість локального фрагмента енергосистеми.

Для дослідження впливу джерел розосередженої генерації тестова схема "IEEE 14 Bus System" була доповнена фрагментами розподільчих мереж номінальною напругою 10 кВ, які приєднані до вузлів 6, 10 – 14 через відповідні понижувальні трансформатори 110/10 кВ.

Найбільш поширені варіанти схем мереж 10 кВ наведені на рис. 2.

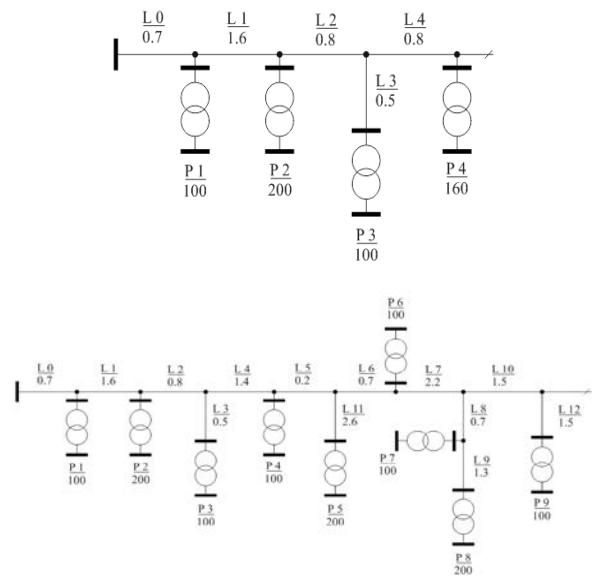


Рисунок 2 – Фрагменти схем мережі 10 кВ

В математичній моделі, що використовується для визначення межі стійкості, загалом фігурує величина постійної інерції, яка визначається на основі величини махового моменту. Вплив значення постійної інерції на результат є суттєвим.

Для розрахунків статичної стійкості було застосовано метод малих коливань. Вибір даного методу в нашому випадку ґрунтується на необхідності врахування динамічних характеристик генераторів.

Відповідно до [5], для системи, що складається з M генераторів, потужності генераторів можуть бути визначені за допомогою наступних рівнянь

$$\begin{cases} P_1 = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_M y_{1M} \sin(\delta_{1M} - \alpha_{1M}) \\ P_2 = E_2 E_1 y_{21} \sin(\delta_{21} - \alpha_{21}) + E_2 E_M y_{2M} \sin(\delta_{2M} - \alpha_{2M}) \\ P_3 = E_3 E_1 y_{31} \sin(\delta_{31} - \alpha_{31}) + E_3 E_M y_{3M} \sin(\delta_{3M} - \alpha_{3M}) \\ P_M = E_M E_1 y_{M1} \sin(\delta_{M1} - \alpha_{M1}) + E_M^2 y_{MM} \sin \alpha_{MM} \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta_{12} = -\delta_{21} = \delta_1 - \delta_2$$

$$\delta_{23} = -\delta_{32} = \delta_2 - \delta_3 \quad (2)$$

Для системи з M генераторів можна записати рівняння малих коливань, що мають вигляд

$$\begin{cases} T_{J1} \frac{d^2 \Delta \delta_1}{dt^2} + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \dots + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{1M}} \Delta \delta_{1M} = 0; \\ T_{J2} \frac{d^2 \Delta \delta_2}{dt^2} + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \dots + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{1M}} \Delta \delta_{1M} = 0; \\ T_{JM} \frac{d^2 \Delta \delta_M}{dt^2} + \frac{\partial P_M}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \dots + \frac{\partial P_M}{\partial \delta_{1M}} \Delta \delta_{1M} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Поділивши рівняння на відповідні значення постійних інерції, та віднявши від першого наступні по черзі, остаточний вигляд рівнянь малих коливань, які зв'язують відносні кути [5]

$$\begin{cases} \frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} + a_{21}^{12} \Delta \delta_{12} + a_{21}^{13} \Delta \delta_{13} + \dots + a_{21}^{1M} \Delta \delta_{1M} = 0; \\ a_{31}^{12} \Delta \delta_{12} + \frac{d^2 \Delta \delta_{13}}{dt^2} + a_{31}^{13} \Delta \delta_{13} + \dots + a_{31}^{1M} \Delta \delta_{1M} = 0; \\ a_{M1}^{12} \Delta \delta_{12} + a_{M1}^{13} \Delta \delta_{13} + \dots + \frac{d^2 \Delta \delta_{1M}}{dt^2} + a_{M1}^{1M} \Delta \delta_{1M} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Відносні прискорення генераторів, взятих попарно

$$\begin{aligned} a_{21}^{12} &= \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \\ a_{21}^{13} &= \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{13}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{13}} \\ a_{21}^{1M} &= \frac{1}{T_{J1}} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{1M}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{1M}} \end{aligned} \quad (5)$$

Висновки стосовно стійкості можна зробити на основі коренів характеристичного рівняння, складеного на основі відносних прискорень генераторів

$$\begin{aligned} x^{M-1} + A_2 x^{M-2} + A_4 x^{M-3} + \dots \\ + A_{2(M-2)} x + A_{2(M-1)} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Для стійкого стану системи в цілому необхідно щоб корені даного рівняння були дійсними та від'ємними [5].

Висновки. 1. Аналіз стійкості локального сегмента енергосистеми з урахуванням розосередженої генерації в розподільчих мережах є актуальною теоретичною та практичною проблемою, оскільки вплив даного фактору постійно зростає при збільшенні частки розосередженої генерації, що спостерігається останнім часом.

2. На основі проведеного моделювання стандартної тестової схеми "IEEE 14 Bus System" зроблено висновок, що оцінка стійкості в реальному сегменті енергосистеми при наявності розосередженої генерації може бути виконана запропонованим методом з достатньою для експлуатації точністю.

При подальших дослідженнях планується отримати більш точний опис окремих компонентів запропонованої математичної моделі.

Список використаних джерел

1. Slootweg J. G. Impacts of distributed generation on power system transient stability / J. G. Slootweg, W. L. Kling // Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, vol. 2. – 2002. – pp. 862-867.

2. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження розподілених джерел генерації в електричній мережі / В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 1. – с. 46-53.

3. Козирський В. В. Рекомендації щодо вибору потужності джерел розосередженої генерації в розподільчих електричних мережах сільських регіонів" / В. В. Козирський, О. В. Гай, В. М. Бодунов // Науковий вісник НУБІП України, Серія: "Техніка та енергетика АПК". – 2012. – № 12. – с. 24-30.

4. Tiutiunnyk F. Improving methods for evaluating the stability of electrical systems with distributed generation / F. Tiutiunnyk, A. Prystupa and V. Bodunov // 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), Kharkiv, Ukraine. – 2016. – pp. 37-40. doi: 10.1109/YSF.2016.7753795

5. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов; ред. Л. А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССРЕДОТОЧЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМОВ ЛОКАЛЬНЫХ СЕГМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Тугай Ю. И., Козырский В. В.,
Приступа А. Л., Тютюнник Ф. А.

Предложены пути анализа статической устойчивости локальных сегментов электрической системы при наличии на нижнем уровне иерархии источников рассредоточенной генерации.

Abstract

THE STUDY OF STABILITY IN A LOCAL SEGMENT OF THE POWER SYSTEM WITH DISTRIBUTED GENERATION

Y. Tugai, V. Kozyrskiy,
A. Prystupa, F. Tiutiunnyk

The means of the stability analysis in local segments of the power system with distributed generation at the lower level of the system hierarchy are proposed.