РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.316

П.Д. ЛЕЖНЮК, О.Є. РУБАНЕНКО, І.О. ГУНЬКО
Вінницький національний технічний університет

ВПЛИВ ІНВЕРТОРІВ СЕС НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЛЕС

В статті розглядаються проблеми, що виникають в локальних електричних системах (ЛЕС) з розосередженими джерелами енергії (РДЕ). Увага приділяється сонячним електричним станціям (СЕС), що використовують контролери інверторів, які працюють за пропорційно-інтегральним, пропорційно-резонансним та прогнозуючим законами керування. Також в статті проведений порівняльний аналіз коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривої напруги на шинах СЕС з різними законами керування інверторами.

В статті на прикладах доведено, що послідовне або з невеликою різницею в часі неузгоджене між собою увімкнення та вимкнення СЕС та потужних споживачів, особливо за великої кількості інверторів в ЛЕС, призводить до зростання кількості та амплітуд гармонік в напрузі фаз ЛЕС та до затяжних перехідних процесів. Гармонійні складові в напрузі ЛЕС негативно впливають на технічний стан високовольтного обладнання ЛЕС (особливо такого, яке відпрацювало паспортний ресурс), та можуть призвести до його пошкодження.

Ключові слова: локальна електрична система, сонячна електростанція, розосереджені джерела енергії, пропорційно-інтегральний, пропорційно-резонансний та прогнозуючий закони керування, інвертор.

P.D. LEGNUK, O.E. RUBANENKO, I.A. GUNKO
Vinnytsia National Technical University

SOLAR POWER STATIONS INVERTER INFLUENCE ON ELECTRIC ENERGY QUALITY IN LOCAL ELECTRIC SYSTEMS

The article deals with the problems that arise in the local electrical systems (LES) with dispersed sources of power (DSP). Attention is paid to solar power plants (SPP) that use inverter controllers operating under proportional-integral, proportional-resonant and predictive control laws. Also in the article the comparative analysis of voltage sine wave distortion rate on SPP buses with different inverter control laws.

In the article , for example, demonstrated that consistent or with a small difference in time between the co- inconsistent battle on and off SES and powerful consumers , especially when a large number of inverters in Les leads to an increase in the number and amplitudes of harmonics in the voltage phase and the loess transition processes . Harmonic components in voltage Les negative impact on the technical condition of high voltage equipment loess (especially such that the resource exhausted passport) and may cause damage .

Key words: local electrical system, solar power plant, dispersed sources of power, scattered energy, proportional-integral, proportional-resonant and predictive control laws, inverter.

Вступ

Кардинальна зміна економічних відносин, формування енергоринку, поява змішаної приватно-державної форми власності потребують докорінного реформування енергетичного сектору України. Більше 50% експлуатованого в галузі обладнання вимагає заміни, оскільки фізично і морально застаріло [1, 2].

В енергетиці України розвиваються нові технології, впроваджуються інформаційні і діагностичні системи, сучасні засоби вимірювань і управління. В наш час перед споживачами стоїть вибір: орієнтуватися на централізовані джерела або використовувати автономну енергетику [3]. В Україні впроваджується розподілена генерація на основі активного використання альтернативних джерел енергії води, сонця, вітру і т.п. Станом на 1 січня 2015 року в Україні встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики, яким встановлено «зелений» тариф, становила 1462,2 МВт, з яких у 2014 році було введено 280,6 МВт. Різними розосередженими джерелами енергії у 2014 році вироблено 2,01 млрд. кВт*год. електроенергії, що на 32 % більше, ніж у 2013 році. [4].

Ця генерація активно розвивається в багатьох країнах світу [8].

На кінець 2013 року, частка відновлювальної енергетики у світовому енергобалансі становила майже 22,1%, (як показано на рис. 1,а) і з кожним роком зростає, що пов’язано з стрімким ростом цін на викопне паливо. Також з кожним роком зростає і потужність фотоелектричних систем у світі, і на кінець 2013 року становила 139 ГВт (рис. 1,б). В розвинутих країнах світу, таких як Нідерланди, Японія, Данія, Німеччина та інші, створюються навіть цілі міста, що використовують сонячні панелі на дахах будинків (рис. 2) [5, 6].

Проте у мережах, де активно встановлюються та експлуатуються РДЕ, а саме СЕС, має місце погіршення показників якості електричної енергії. Це, наприклад, понад нормоване відхилення напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ, та такого показника якості електричної енергії, як коефіцієнт спотворення синусоїди напруги (K_u) [9–12].

Отже актуальною є задача розробки математичних та комп’ютерних моделей ЛЕС з РДЕ, які дозволяють досліджувати процеси зміни показників якості електричної енергії в цих системах, з метою використання результатів таких досліджень в розробці методів та засобів забезпечення оптимальної

експлуатації обладнання ЛЕС [9]. Для цього широко використовуються такі програмні засоби, як Matlab (Simulink), PS Cad та інші.

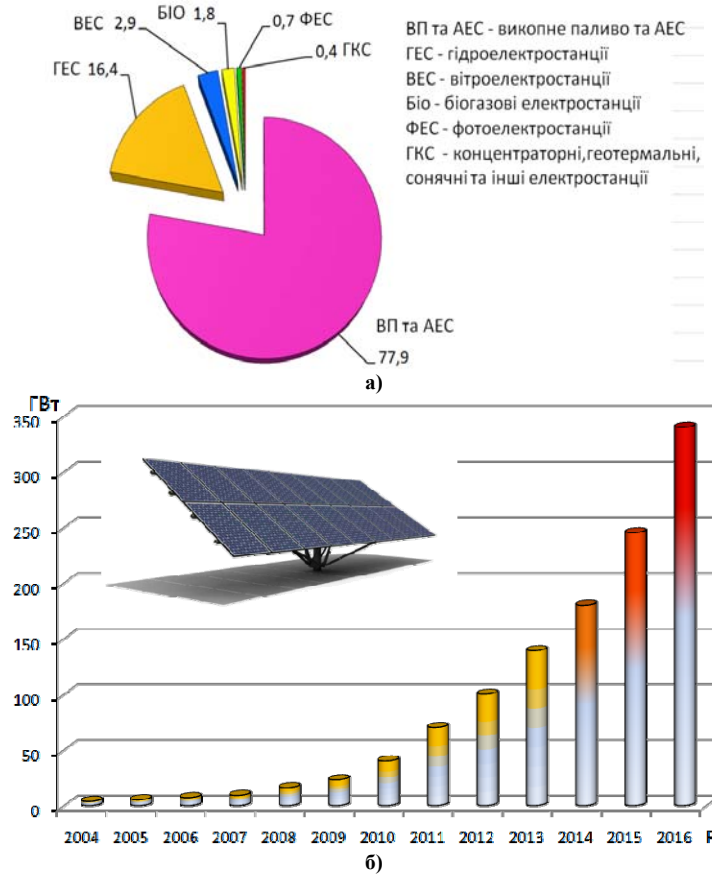


Рис. 1. Розвиток відновлювальної енергетики в світі: а) частка відновлювальної енергетики в світовому енергобалансі; б) встановлена потужність фотоелектричних систем в світі (2004–2012 дані [10], 2016 – [11], 2014-2015 - апроксимовані)

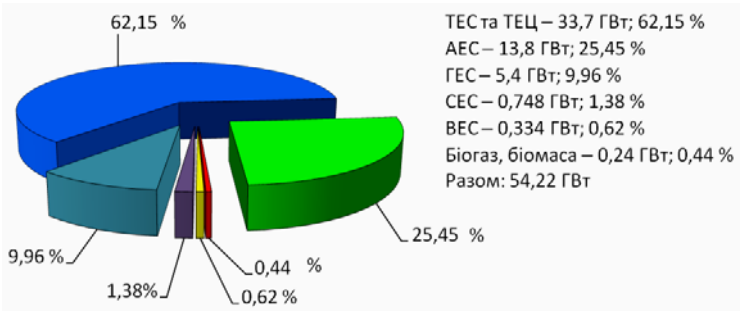


Рис. 2. Діаграма встановленої потужності електроенергетики України на кінець 2013 року

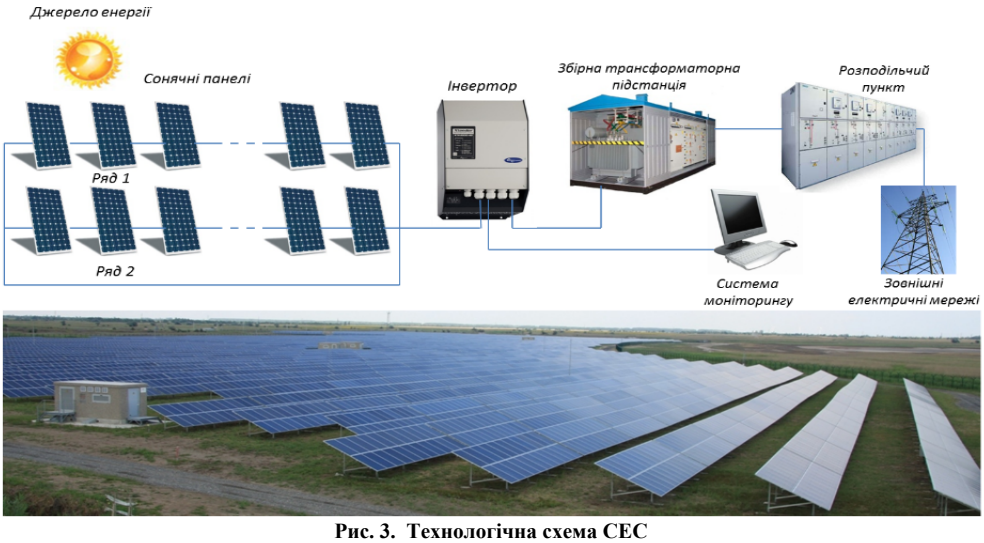


Рис. 3. Технологічна схема СЕС

1. Аналіз особливостей існуючих контролерів інверторів СЕС

Технологічна схема СЕС показана на рис. 3 [7]. Основними елементами СЕС є сонячні панелі, інвертор, збірна трансформаторна підстанція та розподільний пункт. Важливим пристроєм СЕС є інвертор, основне призначення якого – перетворення постійної напруги в зміну трифазну напругу, відслідковування точки максимальної генерації (maximum power tracking point – MPPT), автоматичної синхронізації напруги інвертора з напругою мережі (phase-locked loop-PLL) та інші.

В інверторах СЕС реалізуються різні закони керування, серед яких такі, як: пропорційно-інтегральний (PI), пропорційно-резонансний (PR) та прогнозуючий (DB) закони (рис. 4).

Рис. 4. Класифікація законів керування інверторами СЕС

Кожен з інверторів СЕС має свої переваги та недоліки.

Відомо, що якість електричної енергії в ЛЕС залежить від параметрів, стану, режиму РДЕ взагалі і СЕС, як одного з видів РДЕ. Водночас на показники якості електричної енергії значний вплив мають інвертори цих станцій і контролери. В експлуатації знаходяться СЕС, багатьох виробників у яких реалізуються різні закони керування їх інверторами. Тому актуальною є задача дослідження впливу конструктивних особливостей та законів керування інверторами СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС.

Особливості пропорційно-інтегрального контролера інверторів СЕС

В пропорційно-інтегральному (PI) контролері інверторів СЕС зазвичай реалізовується перетворення напруг і струмів з *abc* системи координат в *dq* систему координат. Передатна функція системи керування інвертором, яка працює за PI законом керування, визначається за виразом (1):

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{1}$$

де K_p, K_i – пропорційний та інтегральний коефіцієнти підсилення контролера, s – оператор Лапласа,.

Структурна схема керування інвертором СЕС з PI контролером показана на рис. 5.

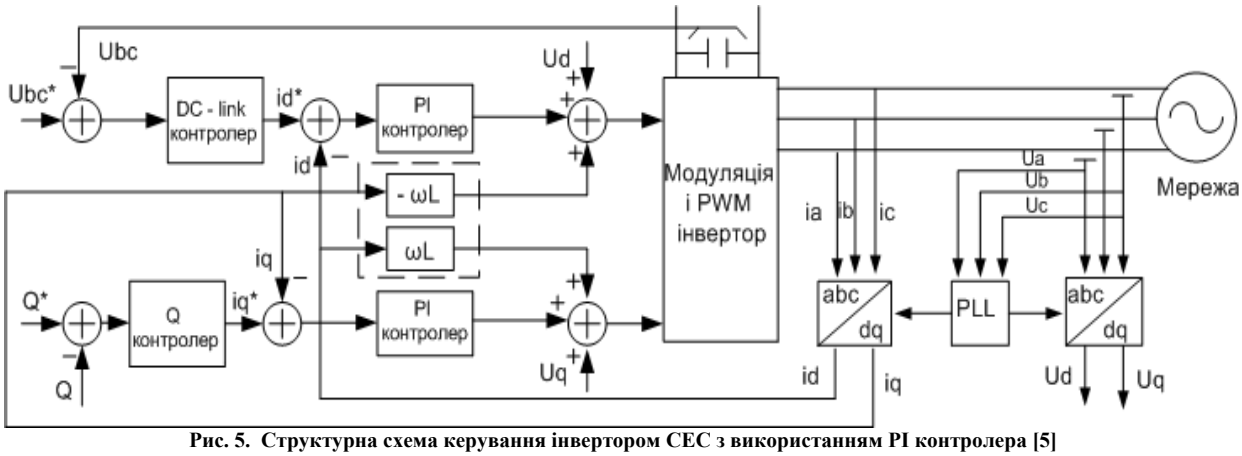


Рис. 5. Структурна схема керування інвертором СЕС з використанням PI контролера [5]

З метою покращення характеристик СЕС програмне забезпечення контролера, який керує інвертором СЕС вдосконалюється. Так, зокрема передатна функція (в *abc* координатах) системи керування інвертором СЕС, в якій застосовується PI закон керування, знаходиться за виразом (2):

$$G^{(abc)}{}_{PI}(s) = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} K_p + \frac{K_i s}{s^2+\omega^2{}_0} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s + \sqrt{3}K_i\omega_0}{2(s^2+\omega^2{}_0)} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s - \sqrt{3}K_i\omega_0}{2(s^2+\omega^2{}_0)} \\ \frac{K_p}{2} - \frac{K_i s - \sqrt{3}K_i\omega_0}{2(s^2+\omega^2{}_0)} & K_p + \frac{K_i s}{s^2+\omega^2{}_0} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s + \sqrt{3}K_i\omega_0}{2(s^2+\omega^2{}_0)} \\ -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s + \sqrt{3}K_i\omega_0}{2(s^2+\omega^2{}_0)} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s - \sqrt{3}K_i\omega_0}{2(s^2+\omega^2{}_0)} & K_p + \frac{K_i s}{s^2+\omega^2{}_0} \end{bmatrix} \tag{2}$$

де K_p, K_i – пропорційний та інтегральний коефіцієнти підсилення контролера, s – оператор Лапласа, $\omega_0 = 2\pi f$ – кутова швидкість та f – частота.

На рис. 5 показана структурна схема керування інвертором СЕС з PI контролером, в якому (з використанням перетворення Парка-Горєва) реалізоване перетворення сигналів струмів і напруг з трифазної *abc* системи координат в обертову *dq* систему координат. Контролер інвертора СЕС здійснює узгоджене з напругою ЛЕС на шинах СЕС керування інвертором, таким чином, що увімкнення СЕС стає неможливим за відсутності напруги на шинах. В схемі керування інвертором струмові сигнали після їх перетворення з *abc* системи координат в *dq* систему координат, надходять на блоки, які працюють за PI законами керування. Далі перетворені сигнали подаються на входи PWM (pulse width modulation) – широтно-імпульсного модулятора. На виході PWM отримуємо трифазну напругу. Також в схемі (рис. 5) використовується пристрій PLL (Phase-Locked Loop) автоматичного фазового підстроювання, за допомогою якого інвертор СЕС синхронізується з напругою в мережі.

Перевага PI контролера полягає в простоті його реалізації та в найменшому гармонійному спотворенню сигналу на його виході в нормальних режимах роботи ЛЕС**.**

Недоліком PI контролера є те, що він є керованим напругою ЛЕС на шинах СЕС. Отже, якщо в мережі є спотворення синусоїди напруги або струму (наприклад, під час увімкнення та вимкнення інших РДЕ, або потужних навантажень і т.п.), то і на виході інвертора мають місце спотворення синусоїд напруг та струмів фаз.

Особливості пропорційно-резонансного контролера інвертора СЕС

Пропорційно-резонансні **(**PR) контролери інверторів СЕС стали більш поширені у минулому десятилітті, що пов'язано з тим, що в них використовуються фільтри гармонійних складових. Ці контролери реагують на резонансну частоту фільтра ω та усувають сталу похибку при регулюванні синусоїдального сигналу. Вони мають простий гармонійний компенсатор гармонік низького порядку, який не впливає на динамічні характеристики PR контролерів СЕС, які використовується в ЛЕС, що приєднані до ЕЕС (рис. 6). Передатна функція PR контролера G_{PR} визначається за виразом (3):

$$G_{PR}(s) = K_p + K_i \frac{s}{s^2 + \omega^2} \tag{3}$$

де K_p, K_i – пропорційний та інтегральний коефіцієнти підсилення контролера, s – оператор Лапласа, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – резонансна частота.

Передатна функція фільтра низьких частот G_{HC} знаходиться за виразом (4):

$$G_{HC}(s) = \sum_{h=3,5,7} K_i \frac{s}{s^2 + (\omega^2 h)} \tag{4}$$

де h – порядковий номер гармоніки.

На рис. 6 показана структурна схема керування інвертором СЕС з PR контролером.

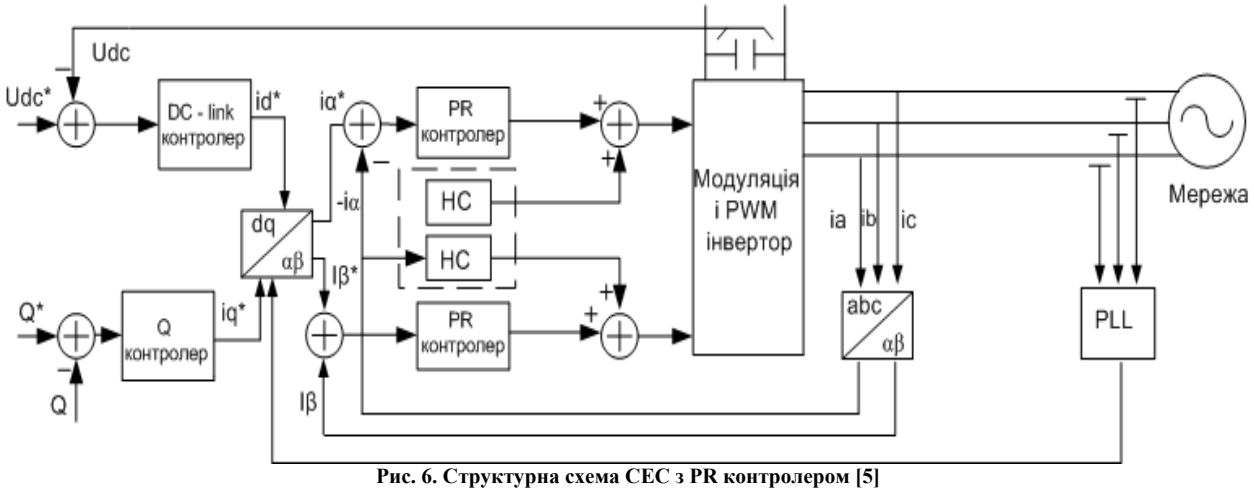


Рис. 6. Структурна схема СЕС з PR контролером [5]

На відміну від рис. 5, на рис. 6 використовується блок перетворення струмів з *abc* трифазної системи координат в $\alpha\beta$ стаціонарну систему координат. Блок PLL (рис. 6) дозволяє, використовуючи напруги фаз в трифазній системі координат, знайти кут зсуву на який необхідно скорегувати сигнал на виході інвертора відповідно до опорного сигналу (напруги на ЛЕС на шинах СЕС). У блоці перетворення *dq* / $\alpha\beta$ струми в *dq* системі координат перетворюються в струми в $\alpha\beta$ системі координат. Порівняно зі схемою на рис. 5 в структурній схемі рис. 6 додатково використовуються блоки HC (harmonic compensator) компенсаторів гармонік, які виконують функції зменшення впливу 3, 5, 7-ї гармонік в напругах на виході інвертора СЕС.

Недоліком PR контролера інвертора СЕС є потреба в складній системі синхронізації інвертора з мережею. Закон керування цього контролера не усуває вплив гармонік високого порядку (вище 11

гармоніки) на напругу на виході інвертора СЕС.

Передатна функція системи керування інвертором СЕС в якій використовується PR контролер (в *abc* системі координат) знаходиться за виразом (5):

$$G^{(abc)}{}_{PR}(s)=\begin{bmatrix} K_p+\dfrac{K_i s}{s^2+\omega^2{}_0} & 0 & 0 \\ 0 & K_p+\dfrac{K_i s}{s^2+\omega^2{}_0} & 0 \\ 0 & 0 & K_p+\dfrac{K_i s}{s^2+\omega^2{}_0} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Особливості прогнозуючого (DB) контролера інвертора СЕС

Однією з властивостей прогнозуючого DB (deadbeat) контролера інвертора СЕС є те, що в його програмному забезпеченні, для прогнозування сигналу на виході контролера, застосовується математичний апарат нечіткої логіки. Для пояснення передатної функції системи керування інвертором СЕС в якій використовується прогнозуючий контролер на рис. 7 показана однолінійну схема з DB контролером (рис. 7).

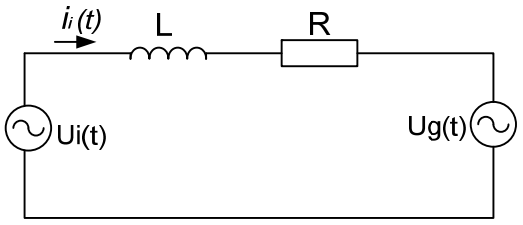


Рис. 7. Однолінійна схема СЕС з DB контролером

На рис. 7 показані: індуктивність $L= +L_g$ та активний опір $R= R_i+R_g$, де $R_і$, L_i – індуктивний та активний опір інвертора, L_g, R_g – індуктивний та активний опір мережі).

Струм в електричному колі інвертора визначається за виразом (6).

$$\frac{di_i(t)}{dt}=\frac{R}{L}i_i(t)+\frac{1}{L}(U_i(t)-U_g(t)), \quad (6)$$

де i_i – струм в колі інвертора, R – загальний активний опір, L – загальна індуктивність, U_i – напруга на шинах інвертора, U_g – напруга в на шинах СЕС.

Після перетворення отримаємо вираз (7):

$$i_i((k+1)T_s)=e^{-(R/L)T_s}i_i(kT_s)-\frac{1}{R_T}(e^{-(R/L)T_s}-1)(U_i(kT_s)-U_g(kT_s)), \quad (7)$$

де T_s – постійна інерції, R – загальний активний опір, L – загальна індуктивність.

Передатна функція DB визначається за виразом (8):

$$G^{(abc)}{}_{DB}=(\frac{1}{b})(\frac{1-az^{-1}}{1-az^{-1}}), \quad (8)$$

де $a=e^{-(R/L)T_s}$, $b=-\dfrac{1}{R}(e^{-(R/L)T_s}-1)$, T_s – постійна інерції.

В цьому контролері використовується LCL фільтр та блок, в якому реалізована спрощена розрахункова модель ЛЕС та параметрів режиму на шинах СЕС. Це дає можливість контролеру бути чутливим до невідповідності параметрів моделі до параметрів поточного режиму ЛЕС на шинах СЕС.Недоліком цього контролера є затримка в часі, що значно погіршує його швидкодію та якість реакції на зміну параметрів режиму в ЛЕС.

2. Дослідження режимів роботи та параметрів інверторів СЕС на гармонійні складові в ЛЕС

Досить активно будуються СЕС у Вінницькій області, так, наприклад, в Ямпільських районних електричних мережах є такі СЕС, як: Слобода-Бушанська СЕС, Гальжбіївська СЕС, Цекинівська СЕС та Порожнянська СЕС. Розглянемо фрагмент схеми ЛЕС Ямпільських РЕМ та під'єднання Слобода-Бушанської СЕС до них (рис. 8).

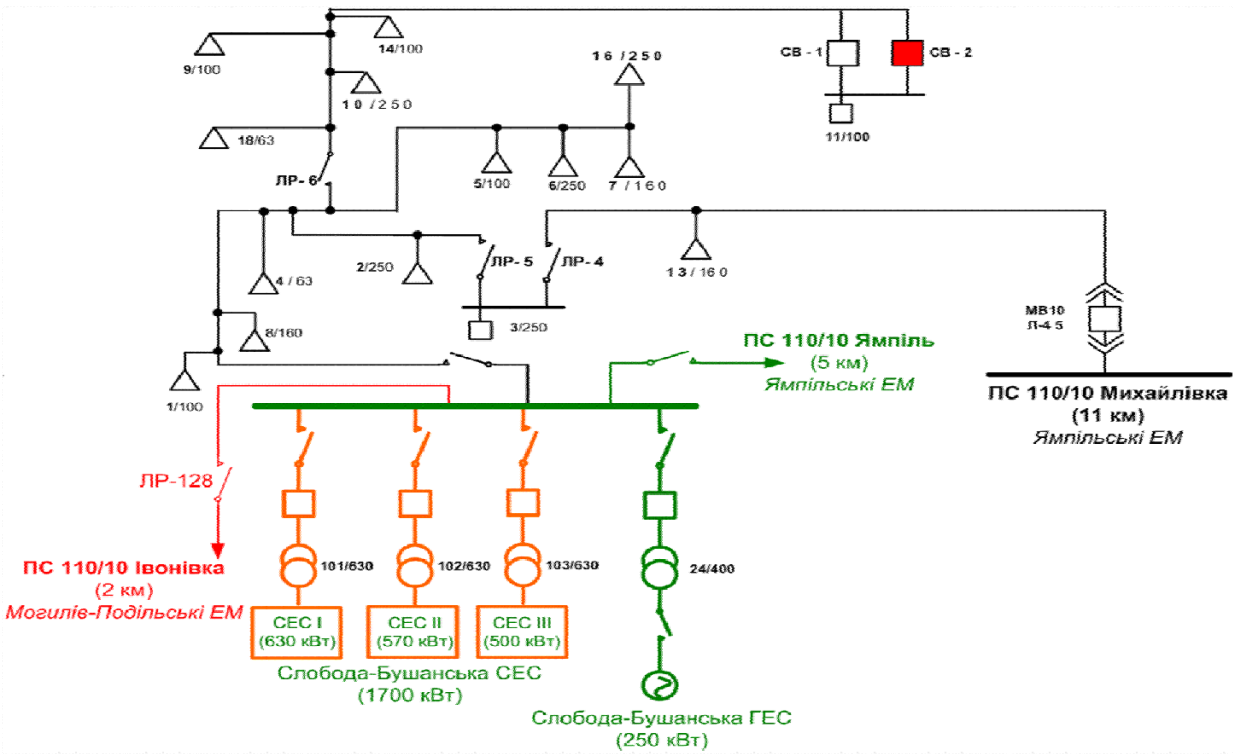


Рис. 8. Фрагмент схеми Слобода-Бушанської СЕС та ГЕС в Ямпільських РЕМ

З метою аналізу процесів, що відбуваються в ЛЕС з СЕС, було створено модель ЛЕС напругою 110/10/0,4 кВ в програмному середовищі PS CAD (Power System Simulation) показану на рис. 9. У комп'ютерній моделі, схема якої показана на рис. 9, в якості джерел електричної енергії, використовуються: енергосистема, яка приєднана до шин 110 кВ ЛЕС, СЕС1 та СЕС2 (потужність яких вибиралася в межах 0,5 до 1 МВт). Також на схемі показані батарея статичних конденсаторів (БСК) для компенсації реактивної потужності, три понижувальні трансформатори (110/10 кВ та 10/0,4кВ) та два підвищувальні трансформатори (0,4/10 кВ) на підстанціях СЕС, а також дві лінії 10 кВ для живлення споживачів (під час моделювання потужність навантаження змінювалась в межах 0,3 МВт до 1,23 МВт). Схема СЕС в якій використовується контролер інвертора, що реалізує PI закон керування в *dq* системі координат показана на рис. 10.

В якості показника якості електричної енергії пропонуємо використовувати коефіцієнт гармонійних складових напруги (K_u), який визначається за виразом (9):

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \times 100\%, \tag{9}$$

де U_1 – амплітуда основної гармоніки, U_n – амплітуда n-ї гармонійної складової.

Використання в схемі двох СЕС рис. 9 дає можливість проаналізувати коефіцієнти гармонійних складових в напрузі на шинах ЛЕС при різних законах керування інверторів СЕС. На рис. 9 показані результати досліджень гармонійних складових в напрузі на шинах СЕС, які використовують контролери інверторів, що працюють за різними законами керування.

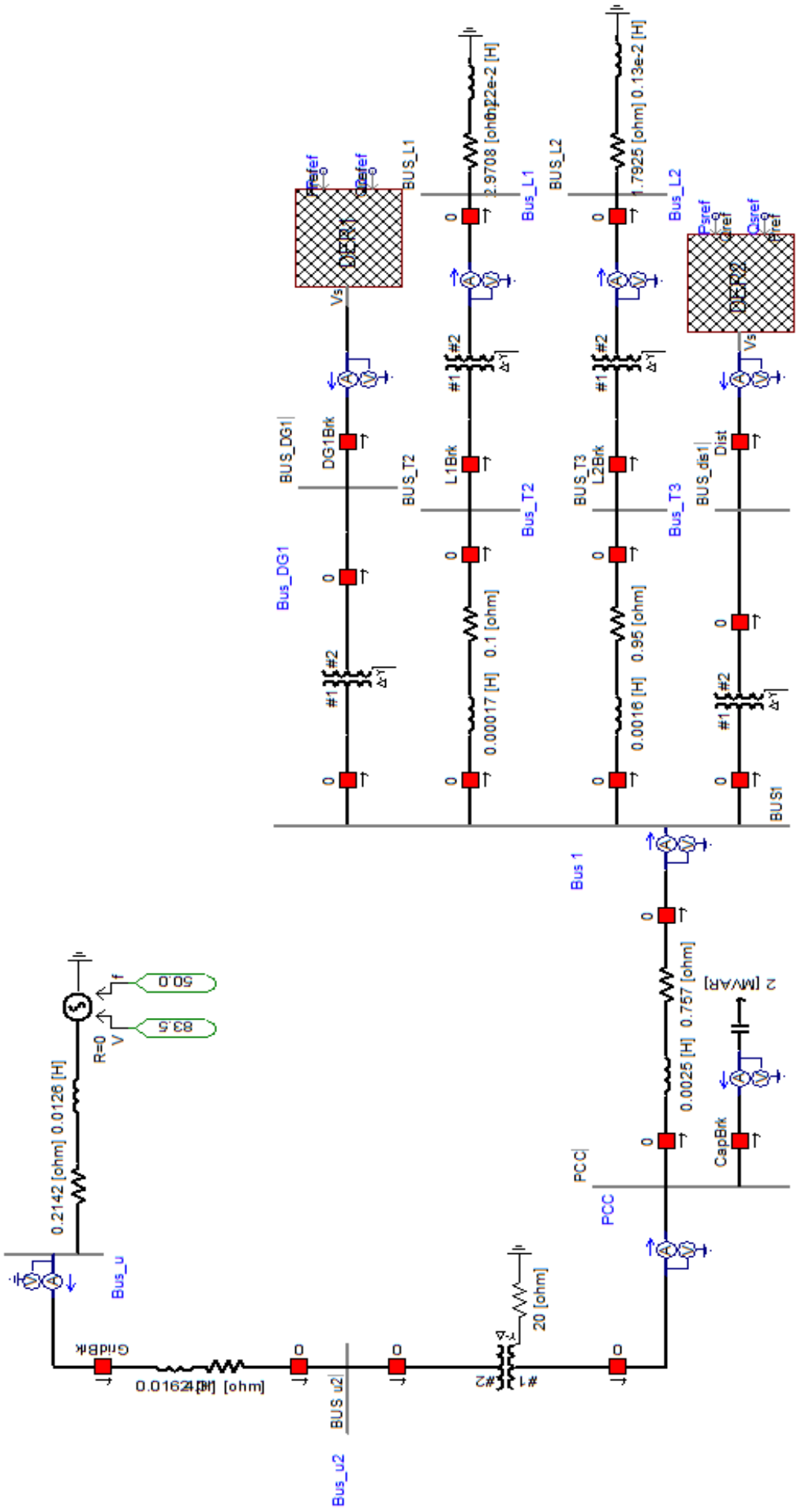


Рис. 9. Схема моделі ЛЕС напругою 110/10/0,4 кВ в програмному середовищі PS CAD

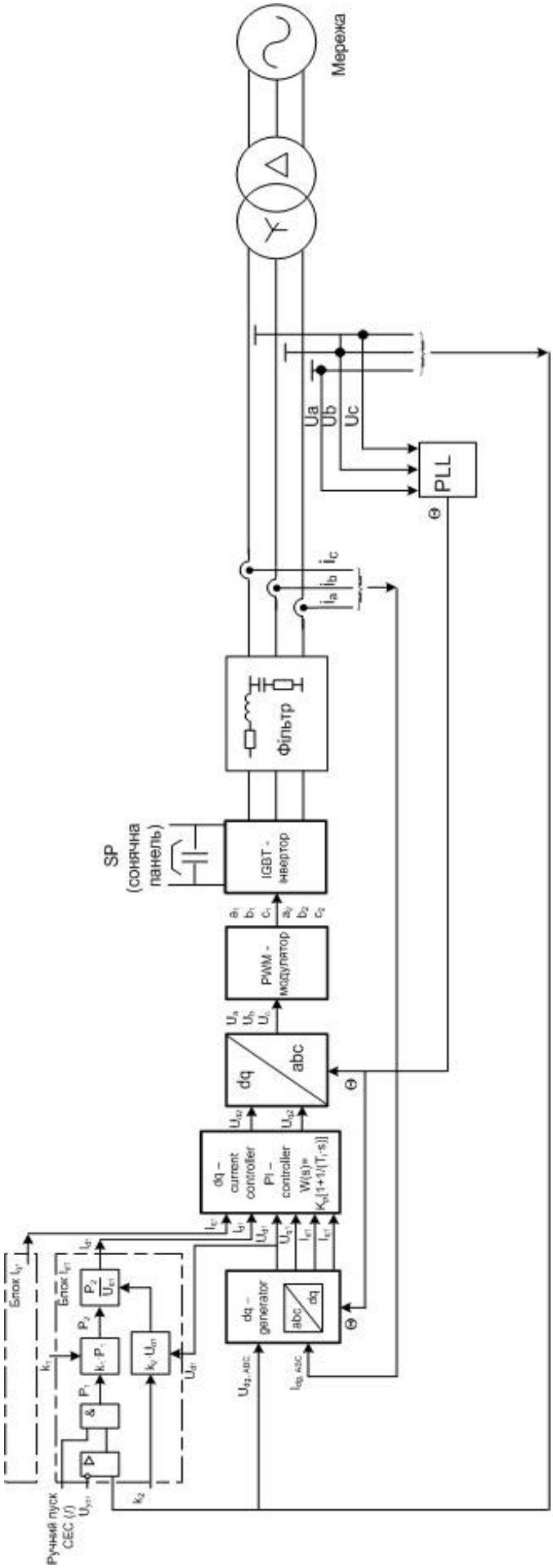
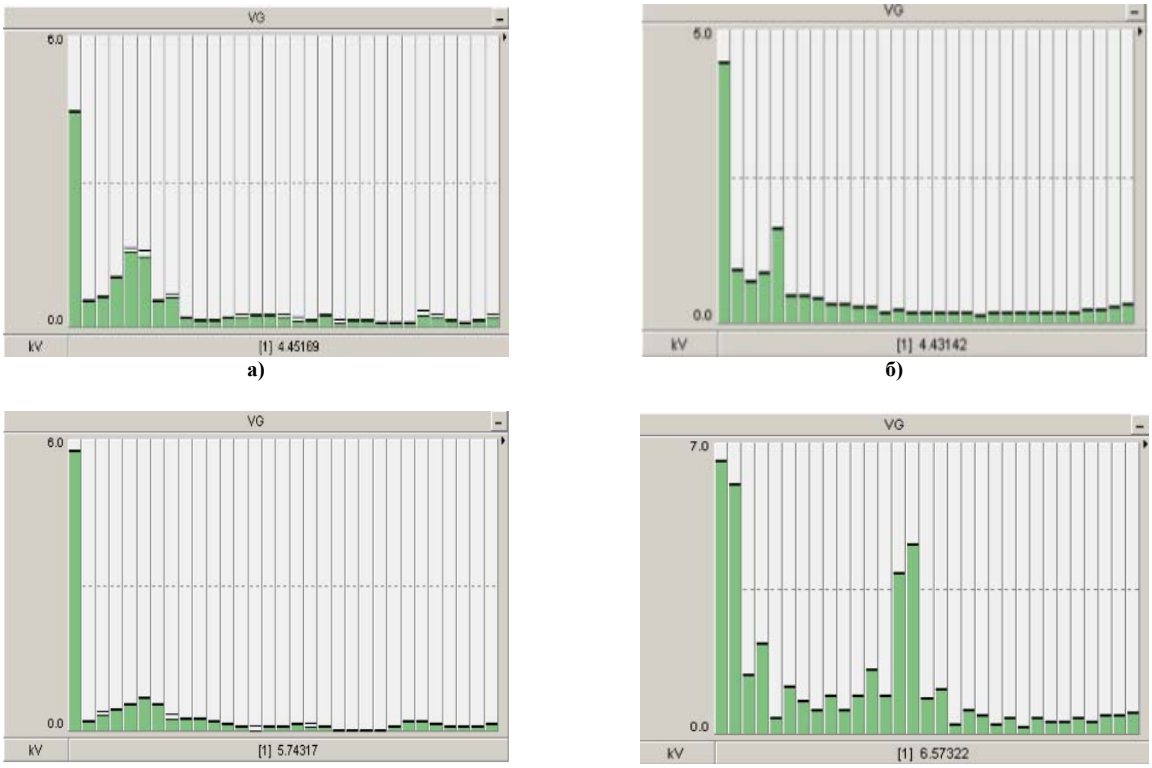


Рис. 10. Схема моделі СЕС з PI контролером в програмному середовищі PS CAD



а) б)

в) г)

Рис. 11. Спектр гармонійних складових в напрузі на шинах СЕС

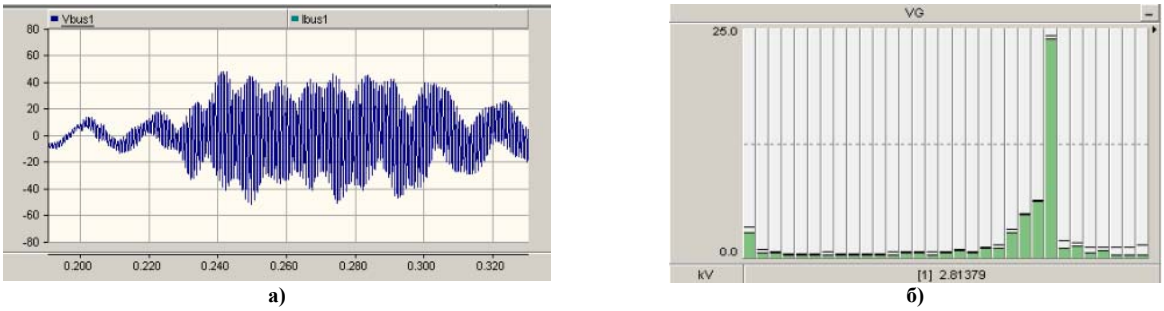
На рис 11 показані гармонійні складові в напрузі на шинах СЕС за умови використання на СЕС: а) PI контролера, в якому застосовується перетворення в *dq* систему координат; б) PR контролера, в якому застосовується перетворення в *бв* систему координат; в) PI контролера, в якому застосовується перетворення в *abc* систему координат; г) використання DB контролера, в якому застосовується перетворення в *abc* систему координат. Результати досліджень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнту гармонійних складових

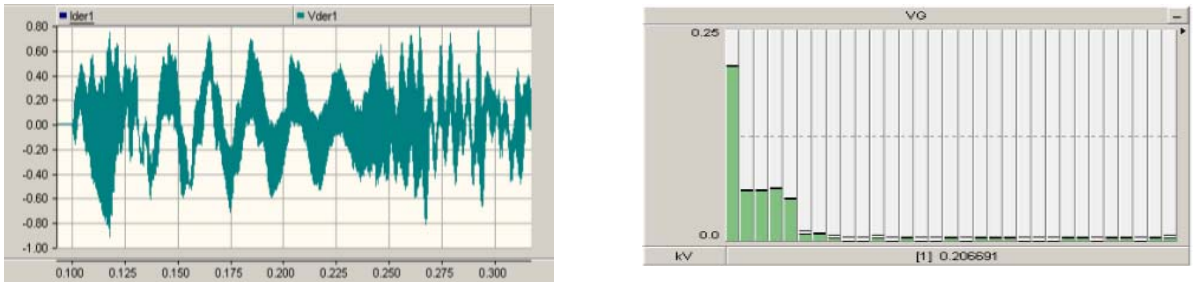
Закон керування контролером і система координат	Значення коефіцієнту K_u, %
PI (abc)	6,3
PI (dq)	6,9
DB (abc)	7,5
PR (αβ)	7,8

Отже, порівнявши отримані результати можна зробити висновок, що найменше гармонійне спотворення синусоїди напруги буде при використанні PI контролера, що реалізує перетворення в *abc* систему координат, а використання PR контролера, що реалізує перетворення в *бв* систему координат дасть найбільше гармонійне спотворення на виході інвертора. В подальший дослідженнях використовувались PI контролери на обох СЕС. Результати комп'ютерного моделювання свідчать про те, що найбільші спотворення форми синусоїди напруг та струмів на виході СЕС викликають перехідні процеси, пов'язані з увімкненням та вимкненням потужних споживачів, самих СЕС, потужної БСК і т. п. Особливо значні спотворення виникають в режимі увімкнення різних СЕС та потужних споживачів з малим інтервалом часу між ними (наприклад, у разі успішного АПВ на різних ділянках ЛЕС). Результати досліджень наведені на рис. 12 та 13.



а) б)

Рис. 12. Послідовне увімкнення СЕС1 та СЕС2, та потужного споживача: а) спотворення синусоїди напруги на шинах ПС 10кВ; б) спектр гармонійних складових напруги на ПС 10 кВ



а) **б)**

Рис. 13. Одночасне ввімкнення СЕС1 та СЕС2, та потужного споживача (за успішного АПВ): а) спотворення синусоїди напруги на шинах СЕС1 0,4 кВ; б) спектр гармонійних складових напруги на СЕС1 0,4 кВ

Як видно з рис. 12 та 13 в мережах з РДЄ виникає явище резонансу та ферорезонансу. На спотворення синусоїди напруги впливають як потужності навантажень, так і параметри самих інверторів СЕС. Одним з параметрів, що характеризує СЕС є постійна інерції (Т) в законах керування. Результати досліджень свідчать про те, що при зменшенні T зростають гармонійні складові в напрузі на шинах СЕС (рис. 14).

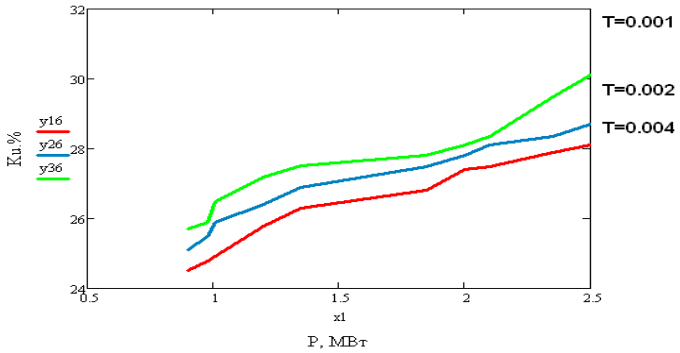


Рис. 14. Залежність K_u від постійної інерції T та навантаження СЕС P

3. Дослідження впливу гармонійних складових напруги на технічний стан високовольтного обладнання ЛЕС

Високовольтне обладнання розподільних електричних мереж швидко старіє [1, 2]. За таких умов актуальною постає задача дослідження впливу гармонійних складових напруги на технічний стан високовольтного обладнання ЛЕС з метою розробки заходів щодо раціонального використання залишкового ресурсу та безаварійної його експлуатації. В якості прикладу дослідимо вплив гармонійних складових напруги технічний стан високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги та муфти кабельних ліній.

Відомо, що кабельні лінії (КЛ) мають більшу ємність ізоляції ніж повітряні лінії електропередач. Велика ємність ізоляції особливо у кабельних муфт. Тому для розрахунку впливу зростання частоти гармонійних складових в напрузі фаз кабельних ліній на струм через ізоляцію їх кабельних муфт, було використано спрощену схему наведену на рис. 15.

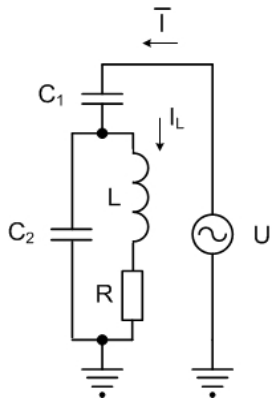


Рис. 15. Заступна схема електричної мережі з КЛ

В наведеній на рис. 15 заступній схемі C_1 – міжконтактна ємність вимикача, C_2 – ємність кабельної лінії, R – загальний активний опір ЕМ, L – індуктивність навантаження, наприклад вимірювального трансформатора напруги і т. п.

Струм, що протече через ізоляцію кабелю визначається за виразом (10):

$$\bar{I}_{C_2} = \frac{\bar{U} \cdot \omega \cdot C_2 \cdot (\omega \cdot L + R)}{z_{\Sigma}(\omega \cdot L \cdot C_2 - j\omega \cdot R \cdot C_2 - 1)} \qquad (10)$$

де I_{C2} – струм що протікає через ізоляцію КЛ; $\omega = 2\pi \cdot f$ – кутова швидкість, f – частота в мережі.

Для КЛ 10кВ з ємністю в 0,0016 мкФ при збільшенні частоти до 300 Гц, струм в ізоляції КЛ становитиме 10,56 А, при гранично допустимому значенні – 300 мкА, а отже це може призвести до передчасного пошкодження ізоляції КЛ.

Дослідження свідчать про те, що при порядку гармонійних складових в напрузі фаз кабельних ліній, збільшується значення сили струму, що протікає через ізоляцію КЛ. Залежність струму в ізоляції КЛ від частоти показана на рис. 16.

Іншим видом досліджуваного обладнання були вимірювальні трансформатори напруги. Для розрахунку струму, що протече в обмотці трансформатора, було використано узагальнену схему заміщення

(рис. 15).

Струм, в обмотці трансформатора визначається за виразом (11):

$$\overline{I}_L = \frac{\overline{U}}{z_\Sigma \left[(R + j\omega \cdot L) \cdot j\omega \cdot C_2 + 1 \right]}, \quad (11)$$

де I_L – струм що протікає через обмотку трансформатора; C_1 – міжконтактна ємність вимикача, C_2 – міжвиткова

ємність обмотки трансформатора, R – активний опір обмотки трансформатора, L – індуктивність обмотки трансформатора.

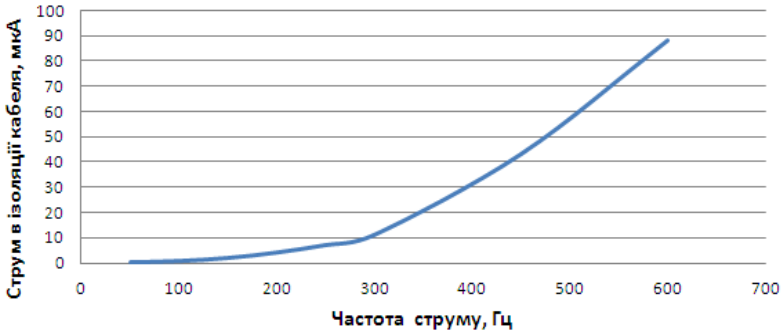


Рис. 16. Залежність величини струму в ізоляції КЛ від частоти в мережі

Максимально допустимий струм через обмотку трансформатора не повинен перевищувати 0,3 А для трансформатора типу НТМИ-10. Підставивши паспортні данні трансформатора НТМИ-10 (C_2 – 200–400 пФ, R –1800 Ом, L – 74 Гн) в вираз 11, було отримано залежність струму в обмотці ТН від частоти цього струму, яка показана на рис. 17.

Аналіз результатів досліджень свідчить про те що, при зменшенні частоти струму в обмотці зростатиме струм, тому поява в струмі на напрузі трансформатора напруги гармонік низьких частот (менше 50 Гц), може призвести до зростання струму, який значно перевищує гранично допустимі межі, що (за певних умов) може призвести до пошкодження обмотки трансформатора.

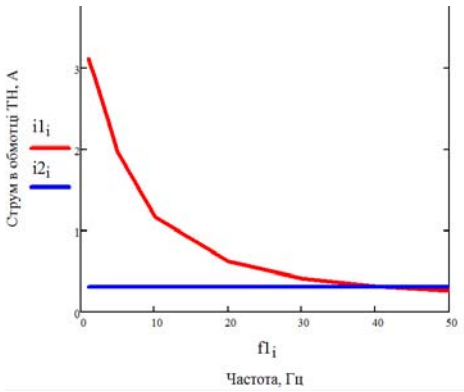


Рис. 17. Залежність струму в обмотці НТМИ від частоти цього струму

Висновки

В усталених режимах роботи ЛЕС з СЕС норми якості електричної енергії не порушуються, а при перехідних режимах роботи ЛЕС порушуються по параметру коефіцієнту гармонійних складових напруги.

Послідовне або з невеликою різницею в часі неузгоджене між собою ввімкнення та вимкнення СЕС та потужних споживачів, особливо при великій кількості інверторів в ЛЕС, призводить до зростання кількості та амплітуд гармонік в напрузі фаз ЛЕС та до затяжних перехідних процесів.

Гармонійні складові в напрузі ЛЕС негативно впливають на технічний стан високовольтного обладнання ЛЕС (особливо такою, яке відпрацювало паспортний ресурс), та можуть призвести до його пошкодження.

Необхідно розробити методичне, апаратне та програмне забезпечення узгодженого увімкнення та вимкнення СЕС в ЛЕС, що відповідає впровадженню в експлуатацію засад концепції Smart Grid – створенню активних інтелектуальних ЛЕС.

Література

1. Лежнюк П.Д. Оперативне діагностування високовольтного обладнання в задачах оптимального керування режимами електроенергетичних систем / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, О.В. Нікіторович // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 35–36.

2. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Алексеев Б.А. – М. : НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.

3. Кириленко А. В. Оптимизация режимов энергосистем в условиях рынка / А. В. Кириленко, В. Л. Прихно // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. Енергетичні ринки: перехід до нової моделі ринку двосторонніх контрактів і балансуючого ринку. – К., 2009. – С. 3–10.

4. Ковальчук О. А. Малі ГЕС в локальних електричних системах з розосередженим генеруванням / О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик // Гідроенергетика України. – 2011. – № 1. – С. 54–58. – ISSN 1812-9277.

5. Timbus A., Lisser M., Teodorescu R., Rodriguez P., Blaabjerg F. Evaluation of current controllers for distributed power generation system. IEEE Transactions on power electronics. 2009. V.24, № 3. P. 654–664.

6. Enslin J., Heskes P. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network. IEEE Transactions on power electronics. 2004. V.19, № 6. P. 1586–1593.

7. Будівництво промислових СЕС [Електронний ресурс] / Інжинірингова компанія – Нові енергетичні технології. – Режим доступу : http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses

8. Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., Belmans R., D'haeseleer W. Distributed generation: definition, benefits and issues. Energy Policy. 2005. № 33. P. 787–798.

9. Degeroote L., Vandevelde L., Renders B. Fast harmonic simulation method for the analysis of network losses with converter-connected distributed generation. Electric Power Systems Research. 2010. № 80. P. 1332–1340.

10. Power sector. Global status report. Renewables. Steering committee. Ren. 21. 2014. P. 25–27. URL: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf

11. Solar PV industry. Market and industry trends. Global status report. Renewables. Steering committee. Ren. 21. 2014. P. 48–50. URL: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf

12. Перспективы солнечной энергетики в 2015 году [Електронний ресурс] / Иркутский национальный исследовательский технический университет. – 2014. – Режим доступу : http://www.istu.edu/structure/57/3943/

References

1. Lezhnyuk P.D. Operativne diagnostuvannya visokovoltnogo obladnannya v zadachakh optimalnogo keruvannya rezhimami yelektroyenergetichnikh sistem / P.D. Lezhnyuk, Rubanenko O.I., O.V. Nikitorovich // Tekhnichna yelektro-dinamika. 2012. № 3. S. 35-36.

2. Alekseyev B.A. Kontrol sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov / Alekseyev B.A. M .: NTS ENAS, 2002. 216 s.

3. Kirilenko A. V. Optimizatsiya rezhimov energosistem v usloviyakh rynka / A. V. Kirilenko, V. L. Prikhno // Pratsi institutu yelektrodinamiki NAN Ukraini. Spetsialniy vipusk. Yenergetichni rinki: perekhid do novoi modeli rinku dvostoronnikh kontraktiv i balansuyuchogo rinku. - K .: 2009. - S. 3-10.

4. Koval'chuk O. A. Mali GES v lokalnikh yelektrichnikh sistemakh z rozoseredzhenim generuvannyam / O. A. Koval'chuk, O. V. Nikitorovich, P. D. Lezhnyuk, V. V. Kulik // Gidroyenergetika Ukraini. 2011. №1. S. 54-58. ISSN 1812-9277.

5. Timbus, A. Otsenka tekushchikh kontrollerov dlya raspredelennoy generatsii energii sistemy / A. Timbus, M. Lisser, R. Teodorescu, P. Rodriges, F. Blaabjerg // IEEE Transactions na silovoy elektroniki. 2009. V.24, № 3. S. 654-664.

6. Enslin, J. garmonik vzaimodeystviye mezhdu bol'shim chislom raspredelennykh silovykh preobrazovateley i raspredelitel'noy seti / J. Enslin, P. Heskes // IEEE Transactions na silovoy elektroniki. 2004. V.19, № 6. S. 1586-1593.

7. Budivnitstvo promislovikh SES: inzhiringova kompaniya - Novi yenergetichni tekhnologii. URL: http://iknet.com.ua/uk/presentation/full/ses

8. Pepermans, G raspredelennoy generatsii: opredeleniye, preimushchestva i problemy / G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W.D'haeseleer // energeticheskoy politiki. 2005. № 33. P. 787-798.

9. Degeroote, L. Bystraya garmoniki metod modelirovaniya dlya analiza setevykh poter' s preobrazovatelem podklyuchennykh DISTRIB-prostranyayetsya pokoleniya / L. Degeroote, L. Vandevel'de, B. delayet / Elektroenergeticheskiye sistemy issledovaniy. 2010. №80. S. 1332-1340.

10. Energeticheskiy sektor. Doklad o sostoyanii. vozobnovlyayemykh istochnikov energii. Rukovodyashchiy komitet – Ren. 21. 2014 P. 25-27. URL: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf

11. Solnechnyye fotoelektricheskiye promyshlennosti. Rynochnyye i otraslevyye tendentsii. Doklad o sostoyanii. vozobnovlyayemykh istochnikov energii. Derzhites'-ki komitet – Ren. 21. 2014 P. 48-50. URL: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf

12. Perspektivy solnechnoy energetiki v 2015 godu. Irkutskiy natsional'nyy issledo-vatel'skiy tekhnicheskiy universitet. Glavnaya. 2014. URL: http://www.istu.edu/structure/57/3943/

Рецензія/Peer review : 20.3.2015 р. Надрукована/Printed :15.4.2015 р.
Рецензент: д.т.н. проф. Злепко С.М.